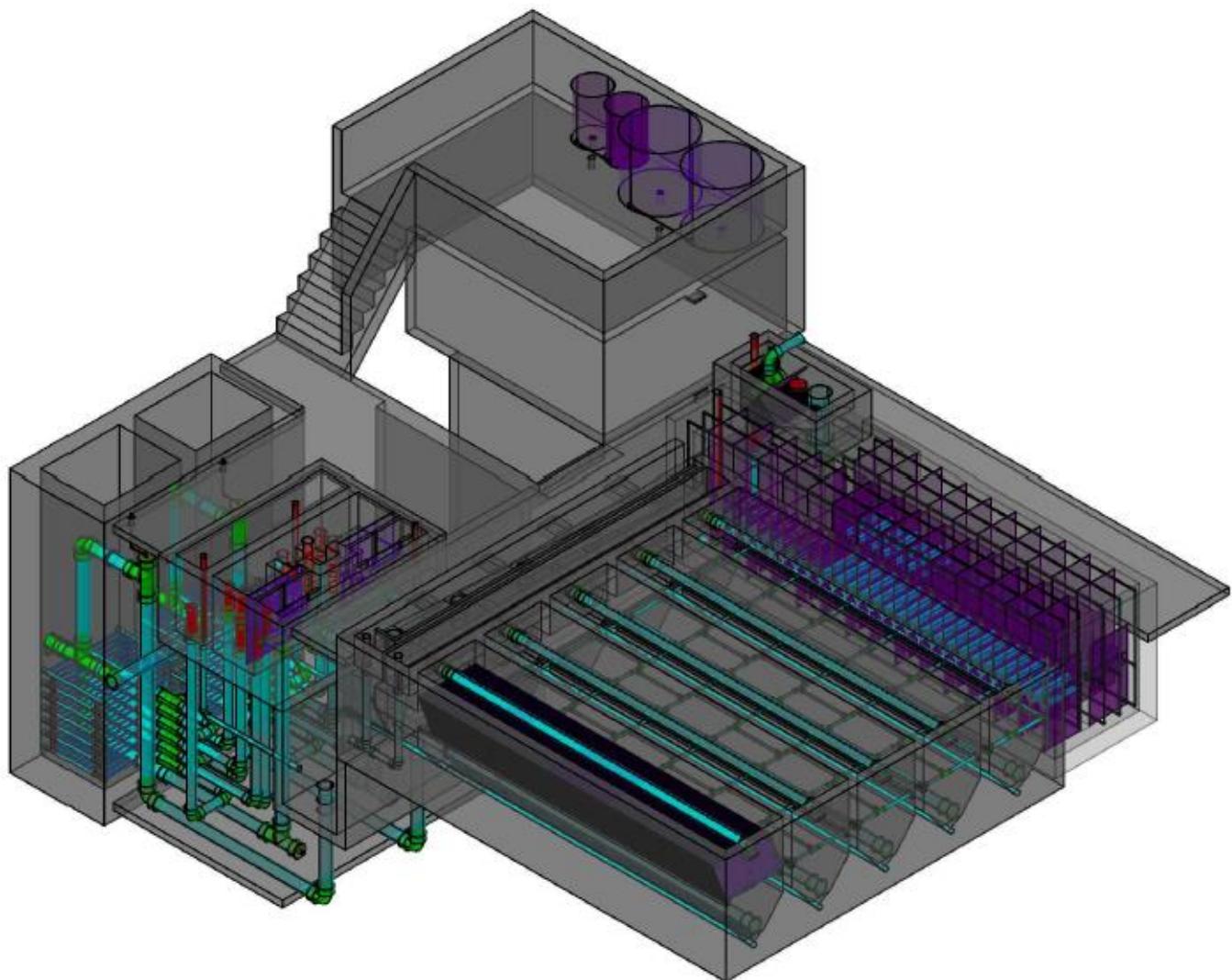

MEMORIA DESCRIPTIVA

PLANTA POTABILIZADORA AGUACLARA

Caudal de Diseño: 48.0 L/s

Versión de la Herramienta de Diseño: 7667



Contenidos

| | |
|--|-----------|
| 1 . INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA AGUACLARA..... | 4 |
| 1.1 – HISTORIA..... | 4 |
| 1.2 – PROCESOS DE TRATAMIENTO..... | 4 |
| 1.3 – NECESIDADES PARA OPERAR UNA PLANTA AGUACLARA..... | 6 |
| 1.4 – LA HERRAMIENTA DE DISEÑO AUTOMÁTICA..... | 7 |
| 2 . MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | 9 |
| 2.1 – TUBERÍA..... | 9 |
| 2.2 – ALBAÑILERÍA..... | 10 |
| 3 . TANQUE DE ENTRADA | 12 |
| 3.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN..... | 12 |
| 3.2 – MEDIDOR LINEAL DE CAUDAL (LFOM) | 15 |
| 3.3 – DATOS DEL DISEÑO | 17 |
| 3.4 – ALGORITMO DE DISEÑO | 18 |
| 4 . DOSIFICACIÓN DE QUÍMICOS..... | 20 |
| 4.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN..... | 20 |
| 4.2 – ALGORITMO DE DISEÑO | 23 |
| 4.3 – DATOS DEL DISEÑO | 26 |
| 5 . MEZCLA RÁPIDA..... | 27 |
| 5.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN..... | 27 |
| 5.2 – ALGORITMO DE DISEÑO | 29 |
| 5.3 – DATOS DEL DISEÑO | 30 |
| 6 . FLOCULACIÓN | 31 |
| 6.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN..... | 31 |
| 6.2 – DATOS DEL DISEÑO | 35 |
| 6.3 – CONCEPTOS DE DISEÑO..... | 36 |
| 6.4 – ALGORITMO DE DISEÑO | 44 |
| 7 . SEDIMENTACIÓN..... | 54 |
| 7.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN | 54 |
| 7.2 – EL MANTO DE LODOS | 56 |
| 7.3 – RECORRIDO DEL AGUA | 57 |
| 7.4 – CANALES DEL TANQUE DE SEDIMENTACIÓN | 58 |
| 7.5 – MANIFOLD DISTRIBUIDOR..... | 61 |
| 7.6 – VÁLVULAS DE DRENAJE | 63 |
| 7.7 – PLACAS DE SEDIMENTACIÓN | 63 |
| 7.8 – TUBOS RECOLECTORES | 65 |
| 7.9 – DATOS GENERALES..... | 67 |
| 8 . FILTRACIÓN RÁPIDA CON ARENA..... | 68 |
| 8.1 – PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN | 68 |
| 8.2 – DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO..... | 72 |
| 8.3 – DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO | 73 |
| 8.4 – ARENA..... | 74 |
| 8.5 – MANIFOLDS DE ENTRADA | 75 |
| 8.6 – MANIFOLDS DE SALIDA | 78 |
| 8.7 – SIFÓN DEL RETROLAVADO | 80 |
| 8.8 – VERTEDEROS DE CONTROL DE CAUDAL | 82 |
| 8.9 – DATOS GENERALES..... | 85 |
| 9 . APÉNDICE: DATOS GENERALES DEL DISEÑO | 86 |
| 10 . APÉNDICE: PERMISOS E INFORMACIÓN DE LA LICENCIA DE LA UNIVERSIDAD DE CORNELL | 88 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1. GUÍA GENERAL PARA LAS ESPECIFICACIONES DE TUBERÍA DENTRO DE LA PLANTA..... | 9 |
| TABLA 2. EXCEPCIONES A LA GUÍA GENERAL PARA LAS ESPECIFICACIONES DE TUBERÍA..... | 10 |
| TABLA 3. GROSORES DE ALGUNOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES | 11 |
| TABLA 4. DISEÑO DEL MEDIDOR LINEAL DE CAUDAL..... | 15 |
| TABLA 5. DATOS DEL TANQUE DE ENTRADA | 17 |
| TABLA 6. DATOS DEL DOSIFICADOR DE COAGULANTE | 26 |
| TABLA 7. DATOS DEL DOSIFICADOR DE CLORO | 26 |
| TABLA 8. DATOS DE LA MEZCLA RÁPIDA | 30 |
| TABLA 9. DATOS DEL FLOCULADOR | 35 |
| TABLA 10. ENTRADAS AL ALGORITMO DEL FLOCULADOR | 44 |
| TABLA 11. DATOS DE LOS CANALES DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN..... | 61 |
| TABLA 12. DATOS DEL MANIFOLD DISTRIBUIDOR DEL TANQUE DE SEDIMENTACIÓN..... | 63 |
| TABLA 13. DATOS DE LAS PLACAS DE SEDIMENTACIÓN | 65 |
| TABLA 14. DATOS DE LOS TUBOS RECOLECTORES DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN..... | 66 |
| TABLA 15. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN | 67 |
| TABLA 16. DATOS CONSTRUCTIVOS GENERALES DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN | 67 |
| TABLA 17. DATOS DE LA ARENA DEL FRAMCA..... | 74 |
| TABLA 18. DATOS DEL MANIFOLD DE ENTRADA INFERIOR (NÚMERO 4) | 77 |
| TABLA 19. DATOS DE LOS MANIFOLDS DE ENTRADA EN EL CENTRO (NÚMEROS 2 Y 3)..... | 77 |
| TABLA 20. DATOS DEL MANIFOLD DE ENTRADA SUPERIOR (NÚMERO 1) | 77 |
| TABLA 21. DATOS DE LOS MANIFOLDS DE SALIDA..... | 79 |
| TABLA 22. DATOS DEL SIFÓN | 81 |
| TABLA 23. DATOS DEL SISTEMA DE VERTEDEROS DE ENTRADA DEL FRAMCA..... | 84 |
| TABLA 24. DATOS DEL FRAMCA..... | 85 |
| TABLA 25. DATOS GENERALES DEL DISEÑO | 86 |

1. Introducción a la Tecnología AquaClara

1.1 – Historia

AquaClara inició en 2005 como programa de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Cornell que tenía como propósito diseñar tecnologías robustas de tratamiento de agua potable. Vinculado con la ONG Hondureña Agua Para el Pueblo (APP) como socio de implementación en Centroamérica, el programa AquaClara pretendía desarrollar soluciones sostenibles para proveer agua de calidad en la zona rural y periurbana de ese país.

Empezando con el proyecto piloto en el casco urbano del municipio de Ojojona en 2006 y 2007, la tecnología AquaClara ha evolucionado con cada proyecto mediante un proceso de integración de las experiencias del campo en las investigaciones y diseños de la Universidad. El resultado es un producto que está a la vez basado en las necesidades de las comunidades, en la experiencia de los implementadores, y en los experimentos e innovaciones del laboratorio de Cornell. Las plantas son sostenibles por cuanto se construyen empleando materiales disponibles localmente y el proceso de tratamiento y los sistemas de suministro de insumos químicos se diseñan aprovechando la fuerza de gravedad, de esta forma eliminando la necesidad de energía eléctrica. Además, las versiones más recientes de la tecnología producen agua que cumple con las normas más estrictas de calidad.

Hoy en día el programa tiene iniciativas en diversos contextos alrededor del mundo. En Honduras, APP sigue diseñando y construyendo plantas, con diez proyectos exitosos ya funcionando. Además de la implementación de la tecnología y la capacitación de nuevos operadores y juntas de agua, APP brinda asistencia técnica para las plantas existentes, distribuye los insumos para su operación, y ha facilitado la formación de una asociación de juntas de agua con plantas AquaClaras, denominada ACACH (Asociación Comunitaria de AguaClara de Honduras). APP trabaja con la versión más actualizada de los diseños de la Universidad de Cornell, de esta manera facilitando la innovación en cada etapa del desarrollo del programa.

1.2 – Procesos de Tratamiento

Las plantas producen agua limpia y segura, tras la remoción de sedimentos y patógenos. La tecnología AquaClara emplea los procesos unitarios de coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida con arena, y desinfección con cloro (Ilustración 1).

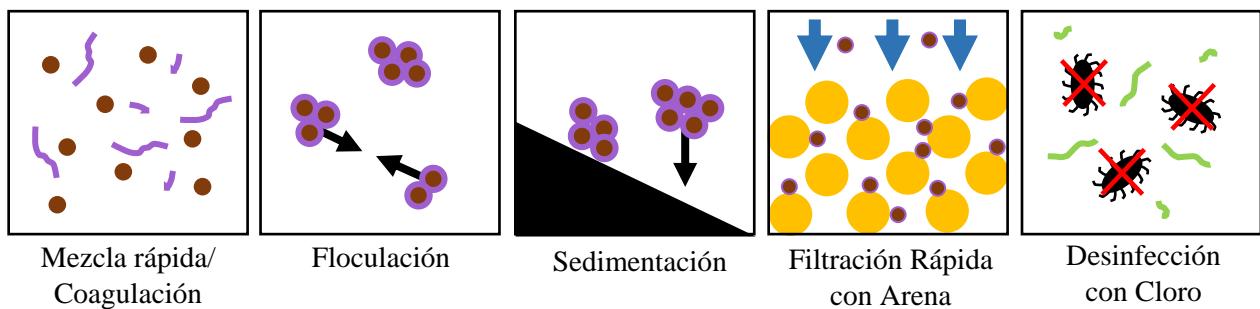


Ilustración 1. Los procesos de tratamiento que se utilizan en la planta AquaClara.

El tanque de entrada

El proceso inicia en el **tanque de entrada**, que sirve tanto para quitar del agua el material grueso como para medir el caudal de agua para la dosificación de los químicos. El tanque de entrada funciona como tanque de sedimentación en que las partículas gruesas se caen al fondo del tanque por gravedad. Debido al diseño especial de la salida, el nivel de agua en el tanque varía en proporción al caudal de agua en la planta. Este nivel de agua está conectado con el sistema semi-automático de dosificación de químicos, de tal forma que las dosis del coagulante y del cloro se mantienen aun cuando cambia el caudal de agua en la planta. Mediante el dosificador de químicos, en la salida del tanque de entrada se aplica un coagulante, que se une con el agua cruda en la **mezcla rápida**.

Mezcla rápida

La mezcla rápida distribuye uniformemente el coagulante en el agua cruda. Es simplemente un orificio, más angosto que el tubo que transmite el agua. Cuando el flujo vuelve a expandirse después del orificio la turbulencia de la expansión es suficiente para distribuir el químico. Con la mezcla del químico con el agua comienza el proceso de **coagulación**, en que las partículas finas suspendidas, denominadas coloides, se cubren con una forma sólida del químico. En efecto, el químico actúa de pegamento de tal manera que cuando las partículas se chocan entre sí ya no se repelan, sino que se quedan pegadas.

Floculación

Luego la mezcla de agua y coagulante entra en el **floculador**, una serie de canales con deflectores que dirigen el flujo de agua. La mezcla suave en el flujo del floculador promueve choques entre partículas, y estas se quedan pegadas por el efecto del coagulante. Durante este proceso, que se llama la floculación, las partículas crecen, formando aglomeraciones pesadas (**flóculos**). Al final han alcanzado un tamaño visible, y tienen peso suficiente para eliminarse en el siguiente proceso, la **sedimentación**.

Sedimentación

El **tanque de sedimentación** elimina la mayoría de las partículas suspendidas aprovechando la fuerza de gravedad. El agua sube lentamente mientras los flóculos se caen y se quedan en el piso del tanque. Además, los tanques de sedimentación cuentan con una serie de láminas inclinadas en la parte superior. Estas placas de sedimentación permiten la captura de partículas mucho más finas. El agua sedimentada sale del tanque arriba de las placas a través de un tubo perforado.

Manto de lodos

En la parte inferior, donde entra el agua floculada, los tanques de sedimentación cuentan con instalaciones que mantienen un **manto de lodos**, un lecho denso de flóculos suspendidos. El agua que entra en el tanque tiene que pasar primero por el manto de lodos antes de alcanzar las placas arriba. Los flóculos suspendidos en efecto sirven como filtro para captar o flocular las partículas más finas, que de otra manera pasarían el proceso de sedimentación. Los chorros de agua que entran en el tanque levantan los lodos que se han sedimentado, manteniéndolos en suspensión.

Filtración con arena

Después de sedimentación, la planta utiliza la **filtración rápida con arena** en forma del FRAMCA (Filtro Rápido de Arena en Múltiples Capas Abierto) de AquaClara. El proceso consiste en pasar el agua sedimentada por un lecho de arena donde se captan las partículas suspendidas. Sirve para bajar aún más la turbiedad y para captar cualquier parásito que permanezca después de sedimentación. Es necesario *retrolavar* el filtro con regularidad para eliminar el sedimento acumulado en la arena. El FRAMCA de AquaClara está diseñado para hacer el ciclo de retrolavado sin ninguna bomba. Además, el diseño en capas reduce el área necesitada para la construcción comparado con otros sistemas de filtros rápidos.

Desinfección

Antes de distribuirse, el agua **se desinfecta** con cloro para inactivar cualquier microorganismo nocivo que permanezca. La solución de hipoclorito de calcio se dosifica utilizando el mismo sistema que se usa para el coagulante, ubicado en el tanque de entrada, y se transmite por un tubo de PVC hasta la salida de la planta. Este último paso se realiza después de la remoción de los sólidos suspendidos porque la desinfección no funciona con agua sucia por la intervención de las partículas y los materiales orgánicos. El cloro también sirve para proteger contra la contaminación en la red de distribución y en las casas. Por tanto, la dosis debe ser suficiente para mantener un residuo en la última conexión del sistema de agua.

1.3 – Necesidades para Operar una Planta AquaClara

Personal e insumos

- Operador capacitado en el manejo de la tecnología AquaClara presente siempre cuando la planta está funcionando, las 24 horas en la mayoría de los casos.
- Dosis adecuada y constante de un químico coagulante (sulfato de aluminio o policloruro de aluminio) para la remoción de turbiedad.
- Dosis adecuada y constante de hipoclorito de calcio (cloro) para la desinfección.

Equipo básico de laboratorio:

- Un turbidímetro portátil, la herramienta más fundamental para la operación de la planta (Ilustración 2). Este instrumento se usa para medir la cantidad de sedimento que trae el afluente a la planta para elegir la dosis de coagulante, para evaluar el rendimiento de cada proceso con medidas de su efluente, y para registrar la calidad de agua que la planta produce durante el día. En las plantas AquaClaras existentes se ha usado el MicroTPI turbidímetro portátil con luz infrarroja de HF Scientific con un rango efectivo de 0.02 UTN a 1100 UTN.
- El kit de calibración del turbidímetro para asegurar mediciones precisas.
- Comparador de cloro para comprobar con regularidad que la concentración de cloro libre residual está dentro del rango aceptable en la red de distribución.
- Probetas para medir volúmenes pequeños de líquidos, especialmente para pruebas del sistema de dosificación de químicos.
- Una escala para medir las masas de químicos en polvo para la preparación de las soluciones madres del coagulante y cloro.
- Un cronómetro para medir caudales de agua y químicos.



Ilustración 2. El MicroTPI turbidímetro de HF Scientific.

Equipo de trabajo general y protección

- Un foco brillante y sumergible para observar el carácter de los flóculos saliendo del floculador, goteos de químicos, el color del agua saliendo de las válvulas de purga, y la condición del manto de lodos entre las láminas de sedimentación.
- Mascarilla con filtro químico para el cloro y el ácido
- Anteojos protectores
- Guantes de hule
- Botas de hule
- Gabacha de hule
- Herramientas y equipo básico de fontanería: martillo, tenazas, desarmadores, lija, cinta teflón, y pegamento de PVC
- Botella de vinagre para la limpieza de los tubos y las mangueras del sistema de cloro
- Baldes de cinco galones
- Escobas y cepillos para el aseo de los recipientes
- Mesa de plástico, sillas, y cama

1.4 – La Herramienta de Diseño Automática

Concepto: diseño paramétrico generalizado

La *Herramienta de Diseño Automática* de AquaClara es un software desarrollado en la Universidad de Cornell para facilitar la diseminación de la tecnología. A la interfaz en la página web de AquaClara se le ingresa el caudal de diseño y otras entradas que el usuario puede especificar. El programa se ejecuta para producir un modelo de AutoCAD en tres dimensiones que contiene todas las estructuras, tuberías, y accesorios hidráulicos para una planta AquaClara de esa capacidad. De este modelo se puede sacar la información necesaria para la construcción de esa instalación, tal como los cortes que se adaptan para los planos de construcción y la configuración de todos los accesorios y tubería.

Funcionamiento del programa

El código principal se ha escrito en el programa Mathcad de PTC. Este código está dividido entre archivos para:

1. Funciones y definiciones generales.
2. Los cálculos que definen las dimensiones y especificaciones de cada proceso de tratamiento.
3. Los algoritmos que por fin dibujan la planta en AutoCAD.

Los archivos de la tercera categoría producen el texto que se le ingresa a la línea de comando de AutoCAD para ejecutar el proceso del dibujo. De igual manera, los valores de muchos variables del programa se le ingresan a Microsoft Word para producir esta documentación del diseño. El software que facilita la comunicación entre la interfaz, Mathcad, Microsoft Word, y AutoCAD está escrito en el programa LabVIEW (Ilustración 3).

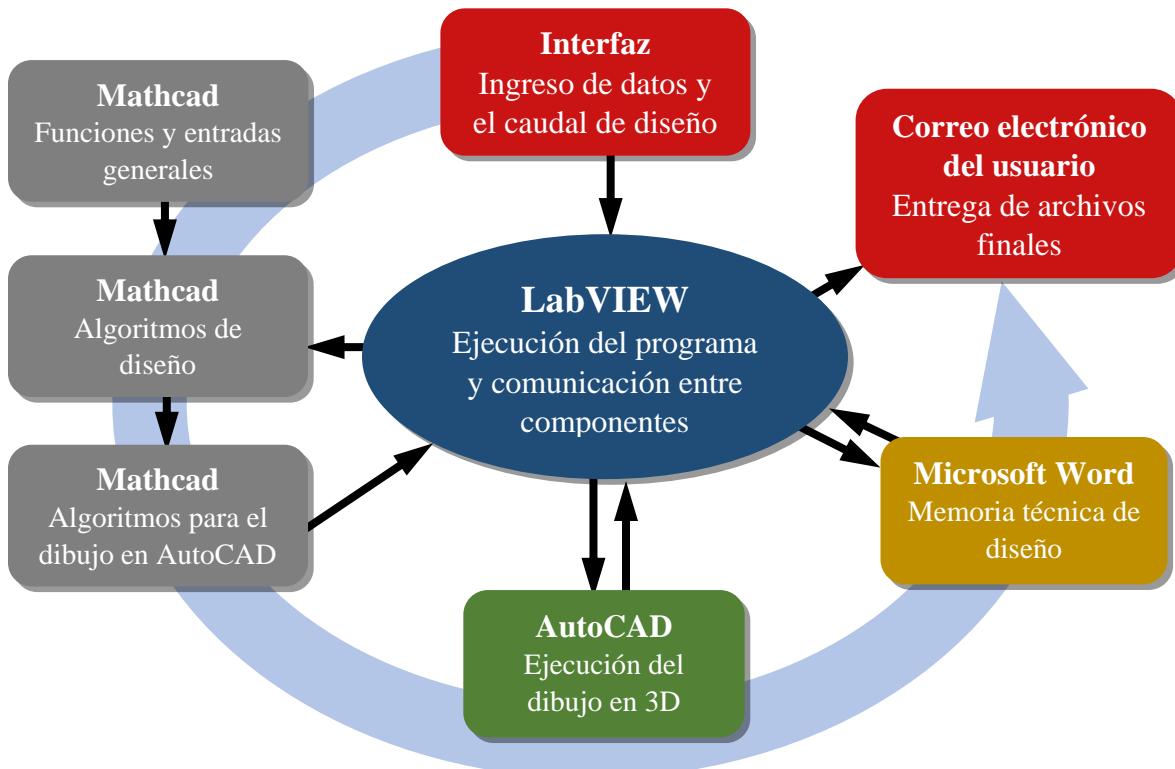


Ilustración 3. La secuencia de ejecución y el flujo de información en la Herramienta de Diseño Automática de AguaClara.

2. Materiales de Construcción

2.1 – Tubería

La planta AquaClara utiliza tubería y accesorios de PVC para toda la fontanería con la excepción de:

1. La tubería de entrada, salida, y drenaje que está expuesta fuera del edificio (Ilustración 4). Aquí se usan tubos y accesorios de hierro galvanizado por su durabilidad.
2. Algunas conexiones de los sistemas de dosificación de químicos, que tienen que ser flexibles (capítulo 4). Se usan mangueras de varios tamaños.

En la planta no existen altas presiones estáticas, pues la mayor se produce en la parte inferior del filtro, que tiene 4.52 m de profundidad, y no pasa de los 7 psi. La tubería de drenaje más delgada podría aguantar la presión en cualquier punto de la planta, y por tanto las especificaciones de los tubos no están basadas en las presiones sino en la durabilidad general y otras consideraciones prácticas.



Ilustración 4. La tubería entrada de hierro galvanizado de la planta AquaClara de Morocelí, El Paraíso.

Se ha observado que los tubos de diámetro pequeño y paredes delgadas se deforman bajo el peso de los materiales que están encima al fundirlos en las paredes de ladrillo que se construyen en la planta, provocando fugas de agua. Además, hay más probabilidad de romper los que están expuestos durante la operación normal. Con los tubos de mayor diámetro las especificaciones de drenaje tienen paredes lo suficiente gruesas para no deformarse al fundirlos y aguantar el abuso normal de la operación. Como regla general, se recomiendan las especificaciones de la tubería de la planta en base a la siguiente guía:

Tabla 1. Guía general para las especificaciones de tubería dentro de la planta

| Diámetro de tubería de PVC | Especificación |
|----------------------------|----------------|
| ½" | SDR 13.5 |
| ¾" | SDR 17 |
| 1" – 4" | SDR 26 |
| > 4" | SDR 41 |

La siguiente tabla resume algunos casos en que se recomienda a veces una especificación diferente de la guía general:

Tabla 2. Excepciones a la guía general para las especificaciones de tubería

| Descripción | Diámetro nominal | Especificación | Justificación |
|--|---|----------------|--|
| Líneas troncales de los manifolds del filtro | 15.2 cm (6.00 pulgadas) (superior) – 20.3 cm (8.00 pulgadas) (inferior) | SDR 26 | El grosor hace más segura la conexión especial que se hace con los ramales. |
| Ramales de los manifolds del filtro | 2.54 cm (1.00 pulgadas) (superior) – 3.81 cm (1.50 pulgadas) (inferior) | Sch 40 | El grosor es necesario para la fabricación de las ranuras finas. |
| Receptores de los ramales de los manifolds del filtro | 5.08 cm (2.00 pulgadas) | Sch 40 | El grosor hace más segura la conexión especial que se hace con los ramales. La durabilidad también facilita el trabajo de instalación. |
| Obstáculos del floculador | 25.4 cm (10.0 pulgadas) | SDR 41 | La rigidez no es necesaria aquí aunque se usen tubos de diámetro menor de 6”. |
| Cualquier pistón de PVC que se usa para tapar un desagüe | - | SDR 41 | Para facilitar la operación de los desagües es mejor que los pistones sean livianos. |

2.2 – Albañilería

Todo lo que no es tubería en la planta en Honduras se ha construido de piedras, varillas, ladrillos, y concreto. Las paredes del tanque de entrada, el floculador, los tanques de sedimentación, y los filtros de arena han sido de ladrillo reforzado (Ilustración 5). La base de los tanques de sedimentación, incluyendo las tolvas inclinadas, ha sido de mampostería de piedras. En algunos casos las paredes exteriores del edificio se han construido de bloques de concreto, aunque este material no es adecuado para las paredes de los tanques por su permeabilidad.



Ilustración 5. Los materiales comunes que se usan en la construcción de las plantas en Honduras: paredes de ladrillos reforzados, cimentaciones de piedras, y paredes exteriores de bloque.

Sin embargo, el diseño estructural de la planta es la responsabilidad del socio de implementación. El programa AquaClara de la Universidad de Cornell no pretende hacer recomendaciones acerca de los elementos estructurales del edificio; el diseño hidráulico simplemente da las dimensiones internas de cada recipiente, los diámetros de la tubería, las ubicaciones relativas de las instalaciones, y la orientación de cada una. Todo el trabajo de diseñar el edificio alrededor de las instalaciones hidráulicas de acuerdo con las

normas técnicas del país del proyecto y los materiales disponibles le cae al socio. Es posible que en el futuro las mismas geometrías funcionales de la planta se construyan con distintos métodos y materiales.

Ya que el diseño estructural influye en el diseño hidráulico, el usuario de la herramienta de diseño puede especificar el grosor de varias paredes y losas de la planta, con el fin de producir un diseño que corresponda a los materiales y métodos de construcción que en realidad se usarán. Por ejemplo, en Honduras se han construido paredes de ladrillo de aproximadamente 15cm de grosor para la mayoría de los tanques, pero en otros países es posible que haya que construir con concreto reforzado de otro grosor para cumplir con el reglamento nacional. Si los grosores de este diseño no corresponden al diseño estructural, siempre se puede pedir otro diseño de la herramienta para evitar cualquier conflicto entre el diseño estructural y el diseño hidráulico en el momento de construir. La siguiente tabla resume los grosores de los elementos estructurales para este diseño específico.

Tabla 3. Grosores de algunos elementos estructurales

| | |
|---|---------|
| Pared exterior de los tanques de sedimentación | 0.150 m |
| Paredes que dividen los tanques de sedimentación adyacentes | 0.150 m |
| Pared del canal de salida del tanque de sedimentación | 0.150 m |
| Pared exterior del floculador | 0.150 m |
| Paredes que dividen los canales adyacentes del floculador | 0.150 m |
| Paredes de los filtros de arena | 0.250 m |
| Paredes de las cajas auxiliares de los filtros de arena | 0.150 m |
| Paredes exteriores del edificio | 0.150 m |
| Paredes del canal de limpieza | 0.150 m |
| Losa del floculador | 0.150 m |
| Losa de la plataforma de químicos | 0.200 m |
| Losa del piso de la planta | 0.200 m |

3. Tanque de Entrada

3.1 – Propósito y Descripción

Funciones

Las funciones principales del tanque de entrada son:

1. Remover los sólidos gruesos del agua por sedimentación.
2. Medir el caudal de agua para la dosificación de los químicos.
3. Colar materiales gruesos tal como las hojas para que no se acumulen en el floculador.
4. Proveer un espacio para la observación del agua cruda.

Ubicación

El tanque de entrada está ubicado en la primera parte del primer canal del floculador (Ilustración 6). Con los procesos integrados de esta forma se mantiene un diseño eficiente con respecto al área ocupada. Se diseñan el tanque de entrada y el floculador en conjunto para así optimizar el espacio necesario, minimizando el costo y cumpliendo con los requisitos operacionales (sección 6.4).

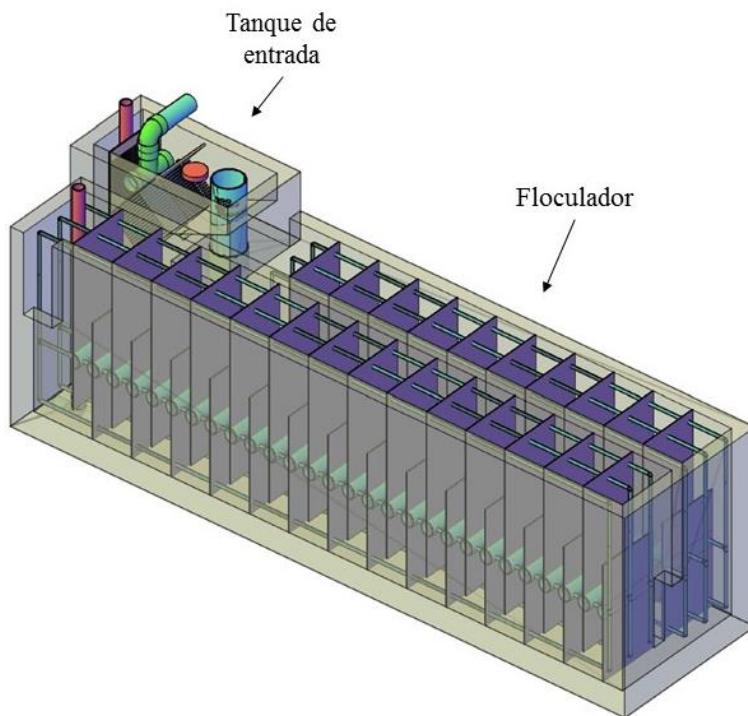


Ilustración 6. El tanque de entrada está ubicado en la primera parte del primer canal del floculador.

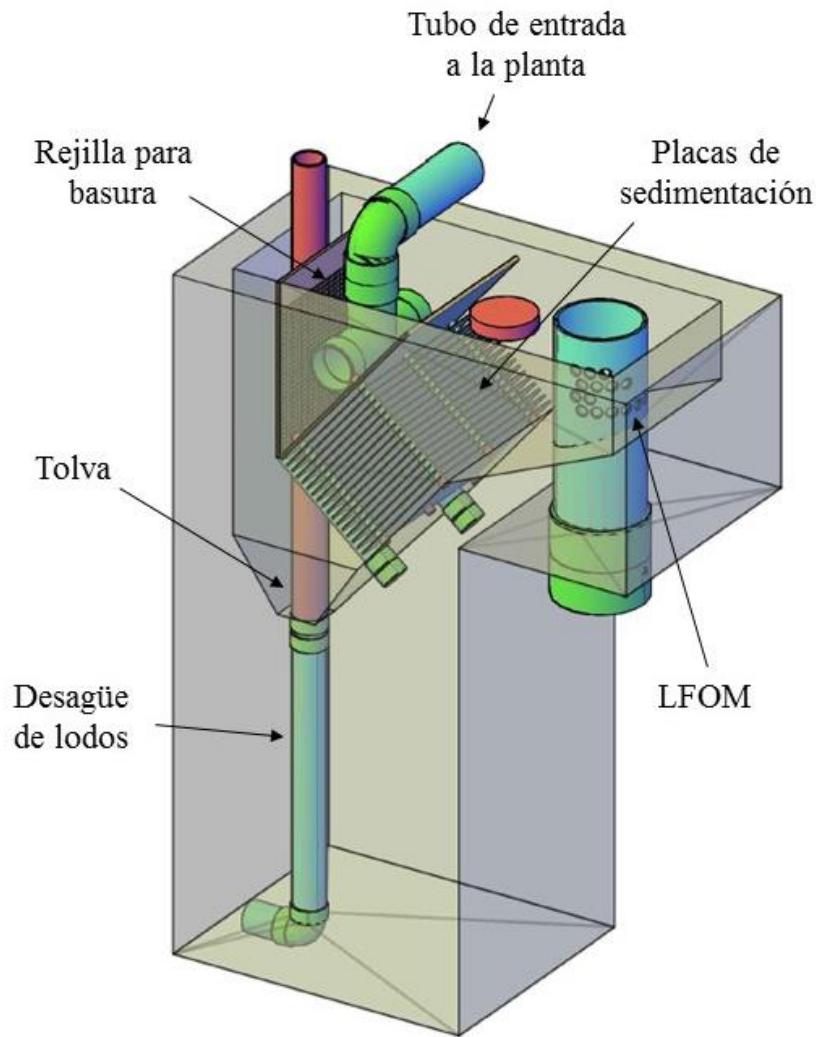


Ilustración 7. Vista isométrica del tanque de entrada con paredes transparentes.

Flujo de agua

Se coloca una te de PVC en cada tubo de entrada que dirige los chorros hacia las paredes laterales del tanque, así evitando las corrientes fuertes en la dirección de las placas de sedimentación. De la entrada el agua pasa por una rejilla que cuela los materiales gruesos tal como las hojas. Luego el flujo se da vuelta en la parte inferior del tanque para después subir, dividiéndose entre las 24 placas de sedimentación.

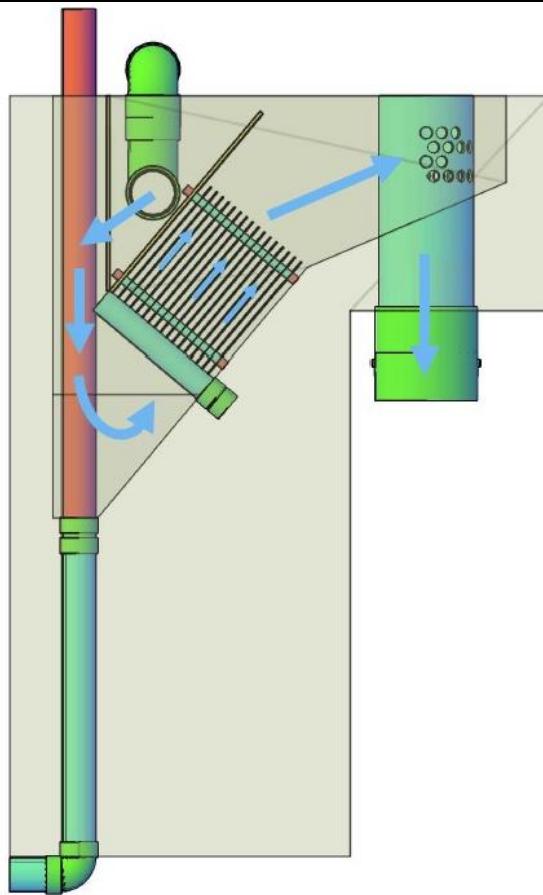


Ilustración 8. Vista frontal del tanque de entrada con paredes transparentes. Las flechas azules demuestran la dirección del flujo de agua.

El medidor de caudal lineal

El tanque de entrada también sirve para medir el caudal de agua en la planta. El Medidor de Caudal Lineal de Orificios (LFOM por sus siglas en inglés) es una serie de agujeros en el tubo de salida del tanque que crea una relación lineal entre el nivel de agua y el caudal. La altura del agua está conectada al sistema de dosificación de químicos a través de un flote para que el operador no tenga que cambiar el flujo de químicos cada vez que cambia el caudal en la planta. El LFOM está descrito en más detalle en la siguiente sección.

3.2 – Medidor Lineal de Caudal (LFOM)

El vertedero tipo Sutro

El vertedero tipo Sutro es una apertura que, al pasar agua de un lado al otro, mantiene una relación **lineal** entre el nivel de agua y el caudal que está pasando (Ilustración 9). En la planta AquaClara se imita la función del vertedero tipo Sutro con un diseño de orificios que crea la misma relación en la salida del tanque de entrada. El cálculo de este diseño está basado en el principio de Torricelli, el cual dice que el caudal que pasa por cada orificio sumergido es proporcional a la raíz cuadrada de la altura de agua arriba del centro del orificio:

$$Q = A\sqrt{2gh}$$

Donde:

Q = el caudal que pasa por el orificio

A = el área del orificio

g = la aceleración debida a la gravedad

h = la altura del agua arriba del centro del orificio

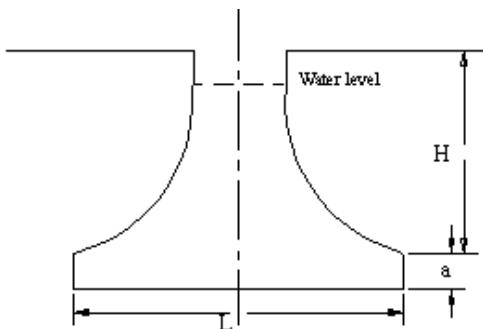


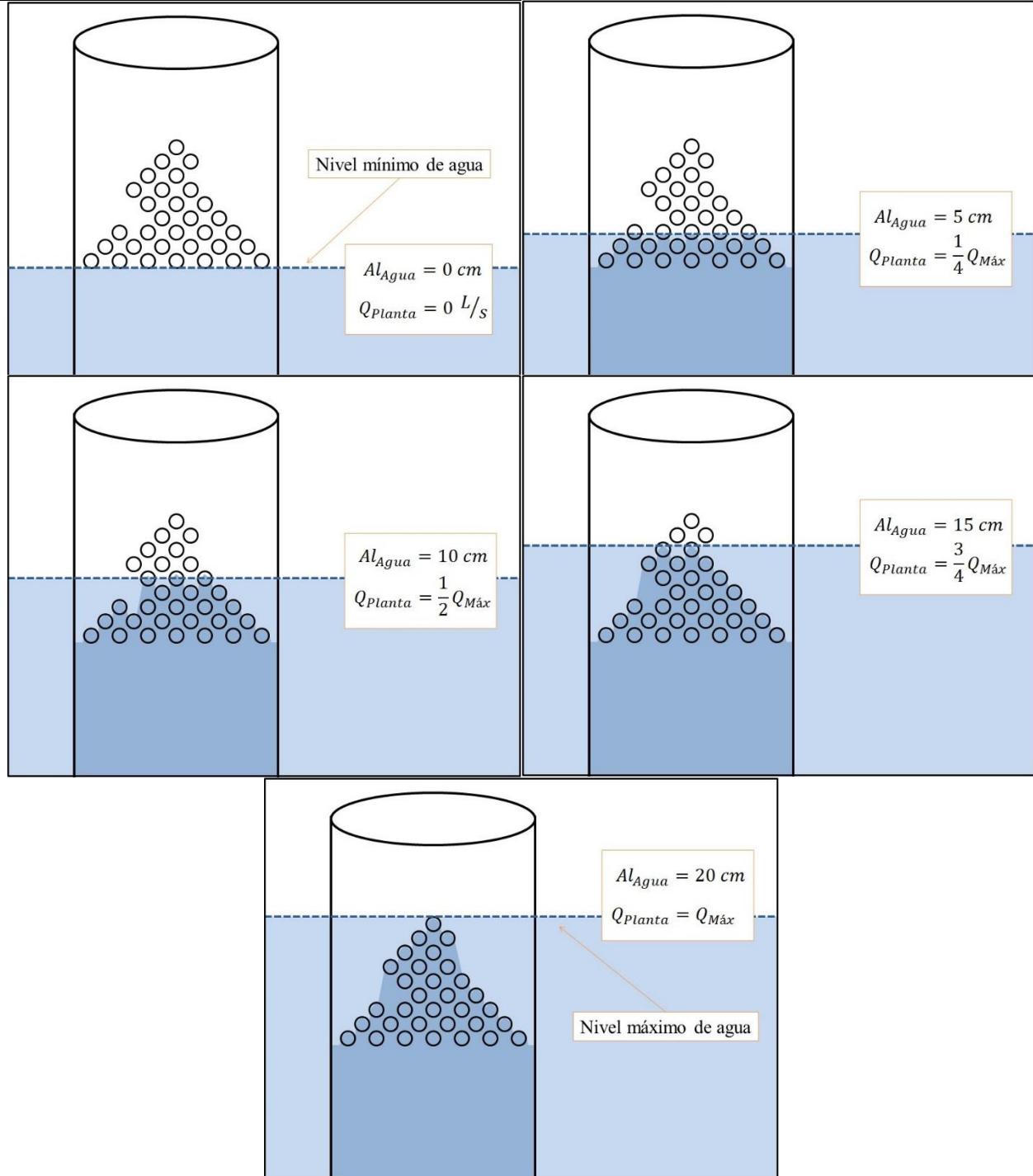
Ilustración 9. La forma de un vertedero tipo Sutro.

Diseño de los orificios

Para diseñar el Medidor Lineal de Caudal (LFOM por sus siglas en inglés) el algoritmo de la herramienta de diseño optimiza el número de agujeros en cada fila de tal forma que el nivel cero (debajo de la primera fila de agujeros) corresponde un caudal de cero, el nivel máximo (la parte arriba de la última fila de orificios) corresponde al caudal máximo de diseño, y la relación entre el caudal y la altura de la superficie del agua entre los dos puntos es lineal.

Tabla 4. Diseño del medidor lineal de caudal

| | |
|---|------------------------------------|
| Rango de niveles de agua (distancia vertical entre el nivel cero y el nivel máximo) | 20.0 cm |
| Diámetro de los agujeros | 4.45 cm (1.75 pulgadas) |
| Separación entre las filas de agujeros (centro a centro) | 5.00 cm |
| Número de agujeros en cada fila, empezando con la fila inferior | 17, 5, 5, 5 |
| Altura de cada fila arriba del nivel cero, empezando con la fila inferior | 2.22 cm, 7.22 cm, 12.2 cm, 17.2 cm |



Con el medidor de caudal lineal de 20cm, cada incremento en el caudal provoca el mismo incremento en el nivel de agua en el tanque de entrada.

Ilustración 10. Funcionamiento de un medidor lineal de caudal (LFOM) de 20cm.

3.3 – Datos del Diseño

Tabla 5. Datos del tanque de entrada

| Datos constructivos | |
|---|---------------------------------------|
| Largo (la dirección del flujo de agua) | 2.02 m |
| Ancho | 53.0 cm |
| Profundidad | 1.98 m |
| Altura de la pared medida de la losa del floculador (incluyendo cualquier relleno en la parte inferior) | 2.50 m |
| Ángulo de la primera pendiente (en la dirección del flujo de agua) | 50 degrees |
| Ángulo de la segunda pendiente | 29 degrees |
| Grosor de la pared que lo separa del floculador | 0.150 m |
| Grosor de la losa (compartida con el floculador) | 0.150 m |
| Placas de sedimentación | |
| Número de placas de sedimentación | 24 |
| Longitud de las placas | 80.0 cm |
| Longitud de la placa superior | 1.11 m |
| Separación entre las placas | 2.50 cm |
| Ángulo de inclinación de las placas | 50 degrees |
| Tubería | |
| El desagüe | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 41 |
| El tubo de mezcla rápida (con el LFOM) | 38.1 cm (15.0 pulgadas), SDR 41 |
| Los conectadores del módulo de placas | 1.27 cm (0.500 pulgadas), SDR 13.5 |
| Los separadores del módulo de placas | 1.90 cm (0.750 pulgadas), SDR 17 |
| Los tubos de apoyo del módulo de placas | 7.62 cm (3.00 pulgadas), SDR 26 |
| Medidor lineal de caudal | |
| Rango de niveles de agua (distancia vertical entre el nivel cero y el nivel máximo) | 20.0 cm |
| Diámetro de los agujeros | 4.45 cm (1.75 pulgadas) |
| Separación entre las filas de agujeros (centro a centro) | 5.00 cm |
| Número de agujeros en cada fila, empezando con la fila inferior | 17, 5, 5, 5 |
| Altura de cada fila arriba del nivel cero, empezando con la fila inferior | 2.22 cm, 7.22 cm, 12.2 cm, 17.2 cm |
| Parámetros hidráulicos | |
| Velocidad de captura de diseño | 8.00 mm/s |
| Velocidad de captura final de las placas de sedimentación | 7.66 mm/s |

3.4 – Algoritmo de Diseño

Placas de sedimentación

El número de placas de sedimentación necesario para lograr la velocidad de captura de diseño está relacionado con la longitud de las placas. Al incrementar la longitud, se necesitan menos placas. La longitud total del módulo de placas,

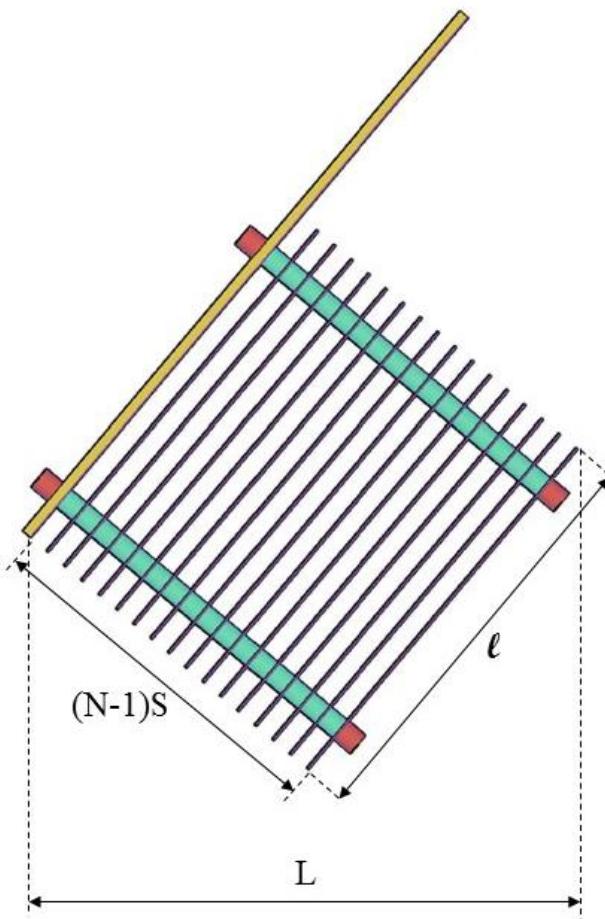


Ilustración 11. Vista lateral del módulo de placas. La longitud total L del módulo depende tanto del número de placas N como de la longitud de las placas ℓ . Ya que se puede compensar el efecto de menos placas con placas más largas hay un número óptimo para minimizar la longitud total.

$$N = \text{ceil} \left(\sqrt{\frac{Q}{(S + T)WV_C \sin \alpha}} \right)$$

Donde:

N = el número de placas = 24

La función $\text{ceil}(x)$ redondea el valor x para arriba al número entero más cercano

Q = el caudal de diseño

S = la separación perpendicular entre las placas = 2.50 cm

T = el grosor de las placas = 2.00 mm

W = el ancho del tanque = 53.0 cm

V_C = la velocidad de captura de diseño = 8.00 mm/s

α = el ángulo de inclinación de las placas = 50 degrees

La longitud de las placas que corresponde al número óptimo se encuentra por:

$$L = \text{Ceil} \left(\frac{Q}{NWV_C \cos \alpha} - S \tan \alpha, 10\text{cm} \right)$$

Donde:

L = la longitud de las placas = 80.0 cm

La función $\text{Ceil}(x, 10\text{cm})$ redondea el valor x para arriba al múltiple de 10cm más cercano

Se redondea la longitud de las placas para arriba al múltiple de 10cm más cercano para 1) facilitar la fabricación del módulo de placas y 2) producir un diseño conservador con respecto a la velocidad de captura, para compensar cualquier ineficiencia debida a la distribución de caudal entre las placas.

4. Dosificación de Químicos

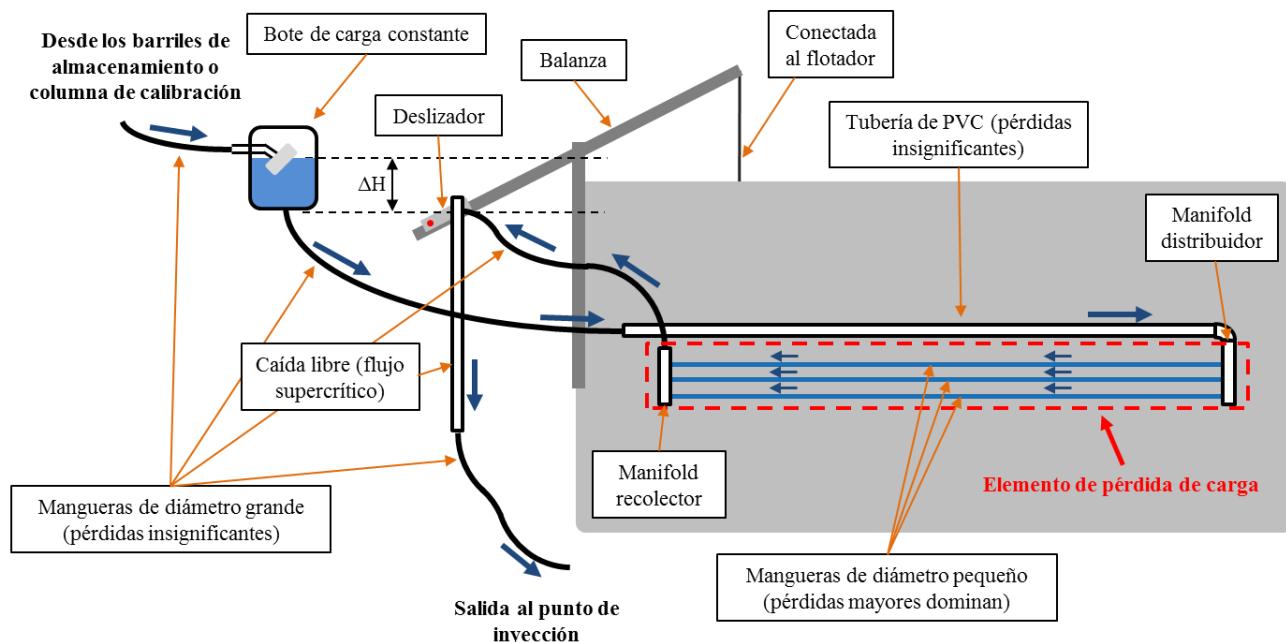
4.1 – Propósito y Descripción

Los procesos de coagulación y desinfección requieren de la dosificación precisa de coagulante y de hipoclorito de calcio. Para realizar este proceso sin bombas, la planta AguaClara utiliza un sistema de dosificación por gravedad.

Componentes principales

Los componentes principales del sistema son:

- Dos barriles para almacenar la solución madre de cada químico (cuatro en total).
- Una plataforma para elevar los barriles.
- Dos botes de carga constante para cada químico (4 en total) que mantienen un reservorio a un nivel constante usando una válvula flotadora en la entrada.
- Una balanza que conecta el nivel de agua en el tanque de entrada de la planta con el nivel de la salida del sistema de químicos.
- Una serie de mangueras en el recorrido del químico del bote de carga constante a la balanza, que provee la relación necesaria entre la pérdida de carga y el caudal del químico.
- Una columna de medición de caudal para cada químico.



Las flechas azules indican el recorrido del químico. La altura de la salida de la manguera en el deslizador controla el caudal del químico.

Ilustración 12. Esquema de un dosificador de AguaClara montado en la pared del tanque de entrada.

Sistema semi-automático

Este sistema tiene las siguientes características:

1. El flujo del químico se detiene automáticamente cuando no hay flujo de agua en la planta.
2. Cambia el caudal de los químicos automáticamente en proporción al nivel de agua en el tanque de entrada, que es proporcional al caudal de la planta gracias al medidor lineal de caudal (sección anterior).

La primera provee seguridad contra una sobredosis y el derroche de químicos en el caso de que se para el flujo de agua en la planta sin que se detenga el flujo de químico manualmente. La segunda permite que un(a) operador(a) con experiencia elija la dosis del químico fácilmente, sin hacer ningún cálculo, y sin necesidad de manipular el sistema cada vez que cambia el caudal en la planta.

El sistema no es completamente automático porque requiere de un operador para elegir la dosis de cada químico y verificar que esa dosis se está aplicando.

Bote de carga constante

El bote de carga constante mantiene un nivel constante de fluido que define la altura de inicio del recorrido del químico. El nivel se mantiene con una válvula flotadora en la entrada de la botella. Con el bote la altura del inicio del recorrido del químico es independiente de la cantidad de químico almacenada.



Ilustración 13. Bote de carga constante de sulfato de aluminio.

La balanza

Con el bote de carga constante definiendo la altura del inicio del recorrido y los tubos y mangueras que conducen el químico instalados permanentemente, el caudal del químico depende únicamente de la altura del final del recorrido. Este extremo del sistema está conectado a una balanza montada en la pared del tanque de entrada. Al otro lado de la balanza está conectado un flote sumergido en el tanque de entrada que inclina la balanza dependiendo del nivel de agua en el tanque (Ilustración 14), el cual depende del caudal de agua (sección 3.2).

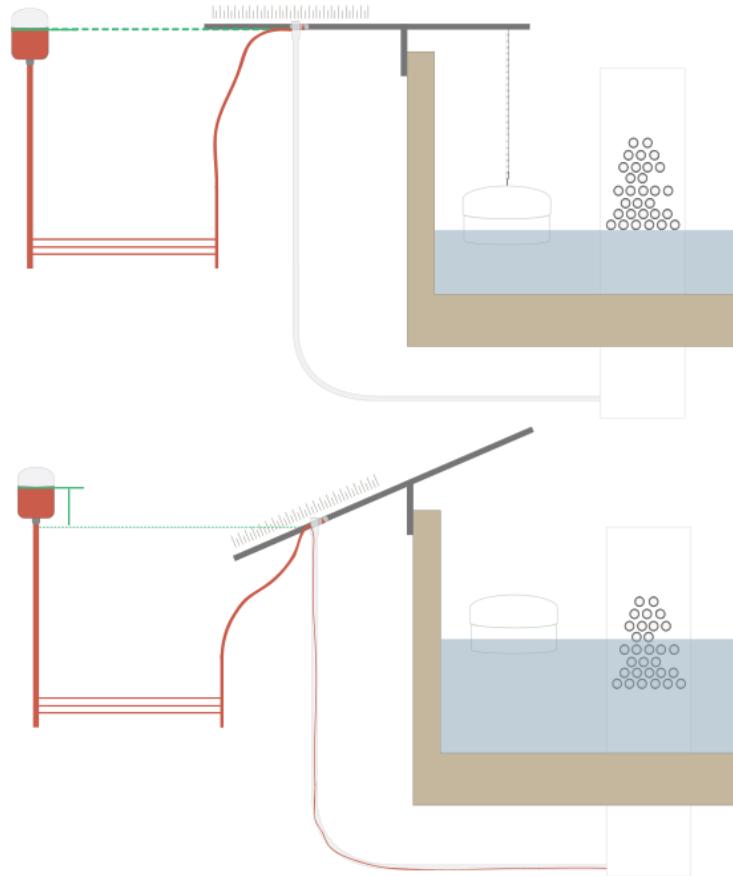


Ilustración 14. La balanza se inclina dependiendo del nivel de agua en el tanque de entrada.

El punto donde la manguera que conduce el químico a la balanza está montada en ella es un deslizador que puede correr a lo largo de la balanza. Se elige la dosis del químico manipulando la posición del deslizador, así cambiando la altura del final del recorrido (Ilustración 15).

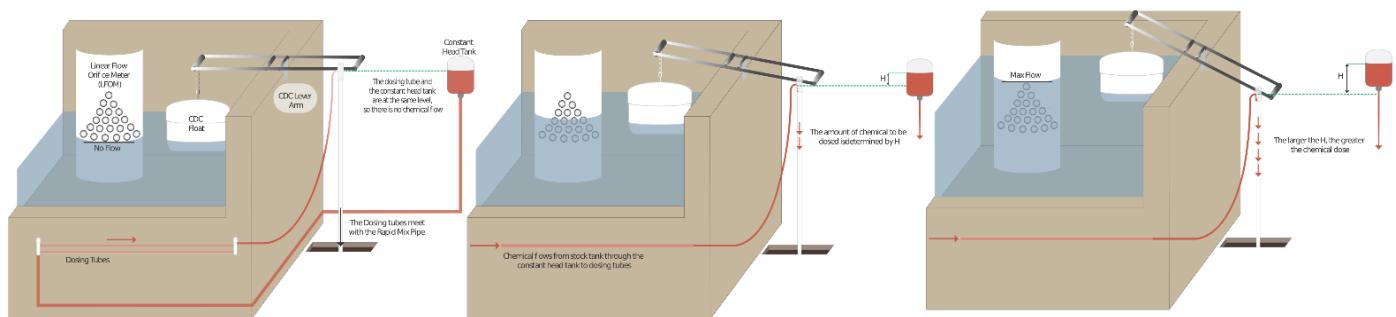


Ilustración 15. La altura final del recorrido del químico puede cambiar porque 1) cambia el caudal de agua en la planta o 2) se manipula la posición del deslizador para cambiar la dosis.

Cuando no hay flujo de agua en la planta la balanza está a nivel, de tal manera que la altura final del recorrido es igual al nivel de agua en el bote de carga constante. En esta situación el químico no fluye. Cuando sube el caudal en la planta, el flote hace que la balanza se incline más, bajando la altura de la manguera y aumentando el caudal del químico en proporción al caudal en la planta.

Para manipular la dosis de coagulante, el operador cambia la posición del deslizador en la balanza. Entre más bajo en la balanza inclinada se coloca este deslizador, mayor es el caudal del químico y la dosis correspondiente. En la posición más alta posible (marcado como 0% en la numeración) la salida de la manguera está a nivel del fluido en el bote de carga constante y el químico no fluye independientemente de la inclinación de la balanza. En la posición más baja posible (marcado como 100% en la numeración), se aplicará la dosis máxima (40.0 mg/L de coagulante o 2.00 mg/L de cloro para este diseño). Entre estos dos extremos la relación es lineal, de tal forma que el porcentaje indicado por la numeración en la balanza es el porcentaje de la dosis máxima que se aplica con la balanza en esa posición.

Al alcanzar el deslizador en la balanza, el químico cae libremente por un tubo de $\frac{1}{2}$ ", así aislando el recorrido a la balanza hidráulicamente. Para que la balanza pueda moverse libremente, este tubo está conectado con otra manguera flexible de diámetro grande bajo el piso de la planta. Esta manguera se conecta a la tubería que lleva el químico al punto de inyección.

Mangueras de diámetro pequeño: elemento principal de pérdida de carga

En el recorrido del bote de carga constante a la balanza, el químico pasa por una serie de mangueras de diámetro pequeño en paralelo. Casi toda la pérdida de carga a lo largo del recorrido del químico ocurre aquí. De esta manera, con el diseño de las mangueras se puede controlar la relación entre el caudal del químico y el cambio de altura del recorrido.

El flujo por las mangueras rectas hace que la pérdida de carga mayor domine, y que se mantengan mínimas las pérdidas menores (de expansiones). Esto es importante porque el dosificador cuenta con una relación lineal entre la altura del extremo del recorrido del químico (conectada al nivel de agua en el tanque de entrada) y el caudal del químico. Los sistemas con pérdidas mayores con flujo laminar proveen esta relación lineal mientras las pérdidas menores tienen una relación no lineal con el caudal.

4.2 – Algoritmo de Diseño

Dosis de los químicos

El dosificador está diseñado para las dosis detalladas en las tablas de dimensionamiento abajo. Las concentraciones de las soluciones madres se seleccionan para que sean prácticas de mezclar, lo suficiente bajas para que el químico se disuelva fácilmente y lo suficiente altas para que duren por lo menos un día cuando las dosis están altas. El caudal máximo del químico no debe ocasionar pérdidas de carga significantes en la tubería que lo lleva a la balanza, ni causar una pérdida mayor de 30 cm en el orificio de la válvula flotadora del bote de carga constante. De igual manera, el volumen de los contenedores de almacenamiento se selecciona para que las mezclas de químicos duren un tiempo práctico dada la concentración madre. La losa donde están los barriles de almacenamiento de los químicos tiene una elevación de 31 cm medida de la parte superior de la pared del tanque de entrada para que la pérdida de

carga en la válvula flotadora no tenga ningún efecto en el flujo del químico. Las salidas de los contenedores están elevadas 10 cm arriba del piso para dejar espacio para el sedimento de se caen al fondo.

Mangueras de diámetro pequeño: elemento principal de pérdida de carga

Las mangueras de diámetro pequeño están diseñadas para proveer 20.0 cm de pérdida de carga con el caudal máximo del químico. Se diseñan de tal manera que las pérdidas mayores (debidas a la fricción con las paredes de la manguera) dominen, y las pérdidas menores (debidas a expansiones y cambios de dirección en el flujo) sean mínimas. Este criterio limita el caudal que puede pasar por una sola manguera, ya que las pérdidas menores crecen más rápido que las mayores con aumentos en caudal. Para caudales en este rango, se selecciona un diámetro interno de 1/8" por la facilidad de encontrar esas mangueras en mercados locales. Luego, el número de mangueras en paralelo (y así el caudal máximo en cada una) está basado en un porcentaje máximo de las pérdidas de carga total que se debe a pérdidas menores. Por fin, la longitud de las mangueras se define en base a la pérdida de carga máxima deseada de 30 cm, dado el caudal máximo en cada una.

Pérdidas de carga

Hay dos tipos de pérdida de carga que ocurren en el sistema dosificador. Las pérdidas *mayores* se deben a la fuerza de fricción que siente el fluido en las paredes del tubo. Las pérdidas *menores* se deben a las expansiones del fluido cuando hay un cambio de la geometría de su camino. El diseño busca a hacer que las pérdidas de carga menores sean insignificantes comparadas con las pérdidas mayores. Esto asegurará que haya una relación lineal entre la pérdida de carga y el caudal del fluido.

La pérdida de carga debida a expansiones está definida por

$$h_e = \frac{K_e V^2}{2g}$$

En donde

K_e = coeficiente de expansión, que depende del cambio de geometría

V = velocidad del fluido en la manguera

g = aceleración debido a la gravedad $\approx 9.81 \frac{m}{s^2}$

La pérdida de carga debida a expansiones aumenta con la cuadrada de la velocidad, y por lo tanto no provee una relación lineal entre el caudal y la pérdida de carga. Por otro lado, la pérdida de carga debida a tensiones con las paredes del tubo sí tiene una relación lineal:

$$h_L = \frac{32\mu LV}{\rho g D^2}$$

En donde

μ = viscosidad dinámica del fluido

L = longitud del tubo o manguera

ρ = densidad de agua $\approx 1000 \frac{kg}{m^3}$

D = diámetro interior del tubo o manguera

Diseño de las mangueras de diámetro pequeño

El caudal máximo del químico en una sola manguera para controlar el error causado por la no-linealidad de las pérdidas menores se encuentra con la siguiente ecuación:

$$Q_{MaxManguera} = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2h_L g \Pi_{Error}}{\sum K_e}}$$

En donde

h_L = pérdida de carga en el sistema dosificador

Π_{Error} = error debido a la falta de linealidad en el sistema $\approx 0.1 - 0.2$

D = diámetro interior de la manguera = 1/8"

El caudal máximo de químico que se podría utilizar se encuentra en base a la dosis máxima, el caudal máximo de la planta, y la concentración de la solución madre. Dividir ese caudal entre el caudal máximo en una manguera y redondear para arriba da el número de mangueras funcionando en paralelo:

$$N_{Manguera} = \frac{Q_{MaxTotal}}{Q_{MaxQuímico}}$$

Con el caudal máximo que se espera en cada manguera, la longitud de cada una se encuentra con:

$$L = \frac{\frac{h_L g \pi D^4}{Q} - \sum K_e \frac{8Q}{\pi}}{128v}$$

Válvula flotadora

El diámetro mínimo del orificio de la válvula flotadora necesario para mantener el caudal de coagulante diseñado es dado por:

$$D_{OrMin} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \Pi_{VC} \sqrt{2g\Delta h}}}$$

En donde:

Q = caudal del químico

Π_{VC} = coeficiente de vena contracta para el orificio ≈ 0.62

Δh = pérdida de carga máxima por la altura del barril

4.3 – Datos del Diseño

Tabla 6. Datos del dosificador de coagulante

| | |
|--|-------------------------------|
| Tipo de coagulante | Policloruro de aluminio (PAC) |
| Dosis máxima | 40.0 mg/L |
| Volumen de cada contenedor de almacenamiento | 2.50 kL |
| Concentración madre | 150 g/L |
| Número de sacos de coagulante de 25.0 kg (55.1 lb) para mezclar la solución madre | 15 |
| Diámetro interno de las mangueras de diámetro pequeño | 3.17 mm (0.125 pulgadas) |
| Número de mangueras activas en paralelo | 4 |
| Número total de mangueras en paralelo | 5 |
| Longitud de las mangueras | 1.07 m |
| Pérdida de carga máxima del dosificador | 20.0 cm |
| Caudal máximo del químico | 12.8 mL/s |
| Diámetro nominal de la columna de medición de caudal | 2.54 cm (1.00 pulgadas) |
| Diámetro interno de la columna de medición de caudal | 2.66 cm (1.05 pulgadas) |
| Altura de la escala de la columna de medición de caudal | 50.0 cm |
| Tiempo mínimo de una prueba de la columna de calibración | 22 s |
| Diámetro del orificio en la válvula flotadora | 4.75 mm (0.187 pulgadas) |
| Pérdida de carga en el orificio de la válvula flotadora con el caudal máximo de coagulante | 6.70 cm |

Tabla 7. Datos del dosificador de cloro

| | |
|---|--------------------------|
| Tipo de cloro | Hipoclorito de calcio |
| Dosis máxima | 2.00 mg/L |
| Volumen de cada contenedor de almacenamiento | 450 L |
| Concentración madre | 9.17 g/L |
| Masa de hipoclorito de calcio para mezclar la solución madre | 5.90 kg (13.0 lb) |
| Diámetro interno de las mangueras de diámetro pequeño | 3.17 mm (0.125 pulgadas) |
| Número de mangueras activas en paralelo | 3 |
| Número total de mangueras en paralelo | 4 |
| Longitud de las mangueras | 1.26 m |
| Pérdida de carga máxima del dosificador | 20.0 cm |
| Caudal máximo del químico | 10.5 mL/s |
| Diámetro nominal de la columna de medición de caudal | 1.90 cm (0.750 pulgadas) |
| Diámetro interno de la columna de medición de caudal | 2.09 cm (0.824 pulgadas) |
| Altura de la escala de la columna de medición de caudal | 50.0 cm |
| Tiempo mínimo de una prueba de la columna de calibración | 16 s |
| Diámetro del orificio en la válvula flotadora | 4.75 mm (0.187 pulgadas) |
| Pérdida de cargo en el orificio de la válvula flotadora con el caudal máximo de cloro | 4.48 cm |

5. Mezcla Rápida

5.1 – Propósito y Descripción

Después de recibir la dosis de coagulante, el agua pasa por la **mezcla rápida**. Este proceso sirve para distribuir el coagulante uniformemente en el agua cruda. En esta planta, la mezcla ocurre en la expansión turbulenta del flujo que sigue después de un orificio en el tubo que conduce el agua del tanque de entrada al floculador.

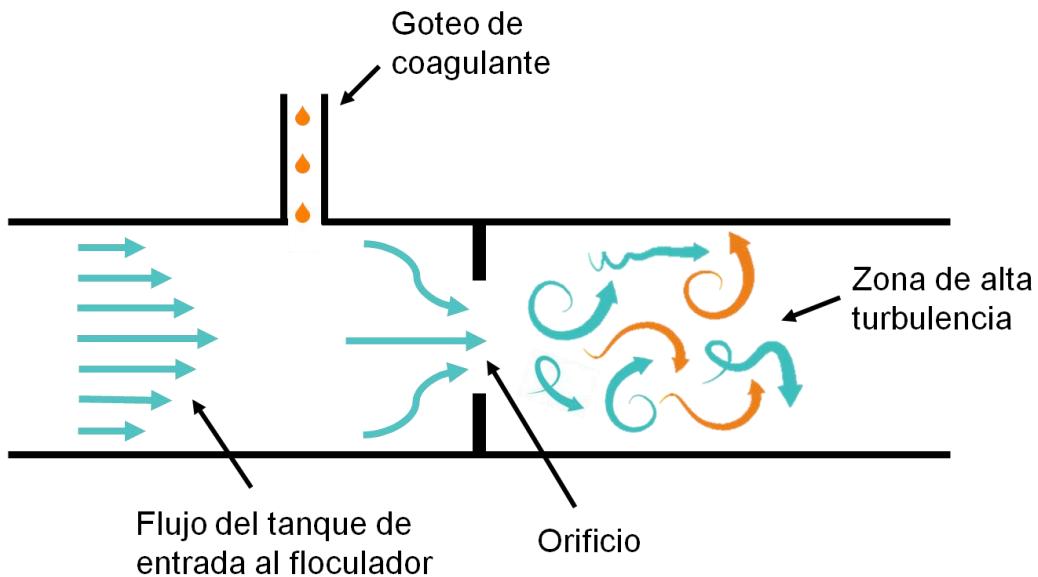


Ilustración 16. La mezcla del químico con el agua ocurre en la zona turbulenta que sigue después del orificio.

El coagulante se inyecta a través de la pared del tubo justo antes del orificio. Es probable que sea importante minimizar la separación entre el punto de inyección y la mezcla para maximizar la eficiencia del coagulante. Al contactar el agua cruda el pH de la solución sube y el coagulante empieza a reaccionar con los otros componentes del agua y formar aglomeraciones a una escala microscópica. La distribución del químico debe ocurrir antes de que se termine el proceso de coagulación a esa escala. De otra forma puede resultar una distribución desigual de coagulante en las partículas suspendidas porque los glóbulos de coagulante precipitado se agregan entre sí antes de que se acerquen a las partículas. En este caso una fracción mayor de las partículas se queda sin cobertura de coagulante y el rendimiento de la floculación puede sufrir.

Por lo tanto, se coloca el tubo de inyección de coagulante lo más pegado posible al orificio de mezcla rápida, y con la salida en el centro del flujo donde la velocidad mayor arrastra el químico a la mezcla lo más rápido posible (Ilustración 17).



Ilustración 17. La salida del tubo de mezcla rápida en la entrada del floculador. La placa transparente con el orificio se mantiene en posición con los cuatro niples de PVC de atraviesan la pared del tubo. El coagulante se inyecta en el centro del flujo justo antes del orificio.

El orificio está diseñado para producir un chorro con una tasa de la disipación de energía máxima de 3.0 W/kg con el caudal máximo de diseño. Con este tipo de mezcla rápida la tasa de la disipación de energía varía con el caudal. Así mismo varía la escala menor de la mezcla. La tasa de la disipación de energía de 3.0 W/kg es conservadora para que la mezcla también funcione con caudales menores.

El chorro de la mezcla rápida sale en el espacio en la primera parte del floculador que sirve como cámara de contacto para terminar el proceso de coagulación. Esta parte del canal se considera como espacio adicional porque no está incluido en el volumen que contribuye a la flokulación en el algoritmo de diseño de ese proceso (sección 6.4). Al proveer este espacio para el proceso de coagulación, no se desperdicia volumen del floculador donde la suspensión ya debe de estar inestable para que pueda funcionar la flokulación.

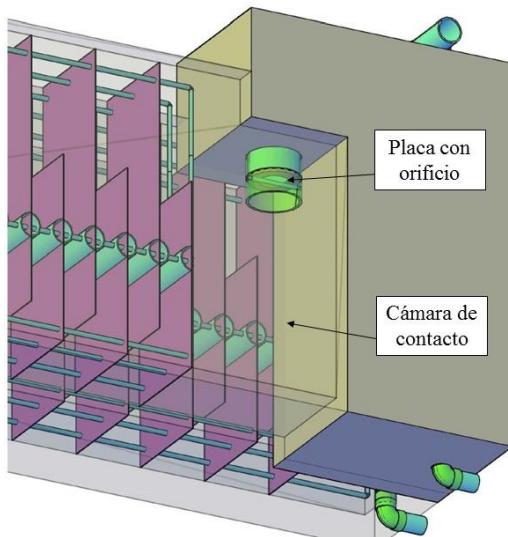


Ilustración 18. El orificio de mezcla rápida en el tubo de entrada del floculador. El punto de inyección del coagulante debe estar justo arriba de la placa en el tubo de mezcla rápida, aunque no aparece en este dibujo.

5.2 – Algoritmo de Diseño

Diseño del orificio

La tasa máxima de la disipación de energía en un chorro redondo que sigue después de un orificio se encuentra por:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\left(\Pi_{Jet} \frac{4Q}{\pi}\right)^3}{D^7 \sqrt{\Pi_{VC}^7}}$$

Donde:

Π_{Jet} = un parámetro relacionado a la geometría del flujo en un chorro redondo = 0.500

Q = el caudal de diseño = 48.0 L/s

D = el diámetro del orificio = 24.2 cm (9.51 pulgadas)

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para un orificio = 0.630

Organizando esta ecuación de otra forma, se encuentra el diámetro del orificio:

$$D = \left(\frac{4Q\Pi_{Jet}}{\varepsilon_{max}^{\frac{1}{3}}\pi} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{1}{\sqrt{\Pi_{VC}}}$$

La tasa de la disipación de energía necesaria

El objetivo de la mezcla rápida es distribuir el coagulante a través del proceso de transporte advectivo turbulento a una escala lo suficiente pequeña que el proceso lento de difusión molecular puede terminar de distribuir el coagulante entre las partículas de manera equitativa. La escala de Kolmogorov es una medida de la escala mínima de los remolinos en un flujo turbulento, y está relacionado directamente con la tasa de la disipación de energía. Para que los remolinos turbulentos puedan distribuir el coagulante equitativamente entre las partículas, la escala de Kolmogorov debe ser igual o menor que la separación media entre ellas.

$$\left[L_K = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \right] < \left[L_{Sep} = \left(\frac{\pi}{6\phi_{Col}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Donde:

L_K = la escala de Kolmogorov

ν = la viscosidad cinética del fluido

ε = la tasa de la disipación de energía

L_{Sep} = la separación media entre partículas

ϕ_{Col} = la fracción del volumen total ocupado por las partículas coloidales de la suspensión

La tasa de la disipación de energía de 3.0 W/kg está basada en una suspensión de 500 UTN. Es decir, la escala de Kolmogorov producida por ese chorro es parecida a la separación entre las partículas primeras de esa suspensión.

La pérdida de carga

La pérdida de carga en la mezcla rápida, una consecuencia de la expansión del chorro, depende de la ε_{max} :

$$h_e = \frac{\left(\frac{Q}{\pi V C_4^2 D^2} \right)^2}{2g}$$

Donde:

h_e = la pérdida de carga a través del orificio de mezcla rápida = 14.1 cm

g = la aceleración debida a la gravedad = 9.81 m/s²

5.3 – Datos del Diseño

Tabla 8. Datos de la mezcla rápida

| Orificio de mezcla rápida | |
|---|-------------------------|
| El diámetro del orificio | 24.2 cm (9.51 pulgadas) |
| La pérdida de carga del orificio | 14.1 cm |
| La tasa máxima de la disipación de energía | 3.0 W/kg |
| Cámara de contacto | |
| Altura de la cámara | 1.63 m |
| Longitud de la cámara | 55.3 cm |
| Tiempo de retención de la cámara (con el caudal máximo de diseño) | 10 s |

6. Floculación

6.1 – Propósito y Descripción

El floculador hace que las partículas suspendidas en el agua se choquen y se aglomeren para formar agregados de mayor tamaño que se llaman **flóculos**. Los flóculos tienen peso suficiente para poder sedimentarse fácilmente en el tanque de sedimentación. La mezcla suave del agua con coagulante en este proceso promueve las colisiones entre partículas.



Ilustración 19. El agua turbia en el frasco lleva partículas coloidales, las cuales no se sedimentan. El objetivo del floculador es aumentar el tamaño de las partículas para que se puedan quitar del agua por la fuerza de gravedad.

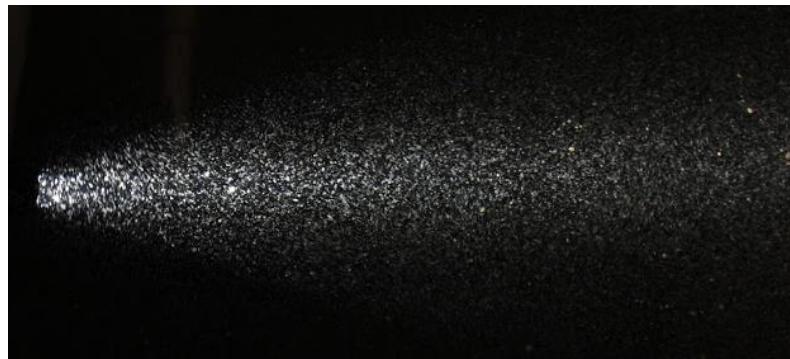


Ilustración 20. Los flóculos iluminados en la parte final de un floculador ya tienen tamaño visible.

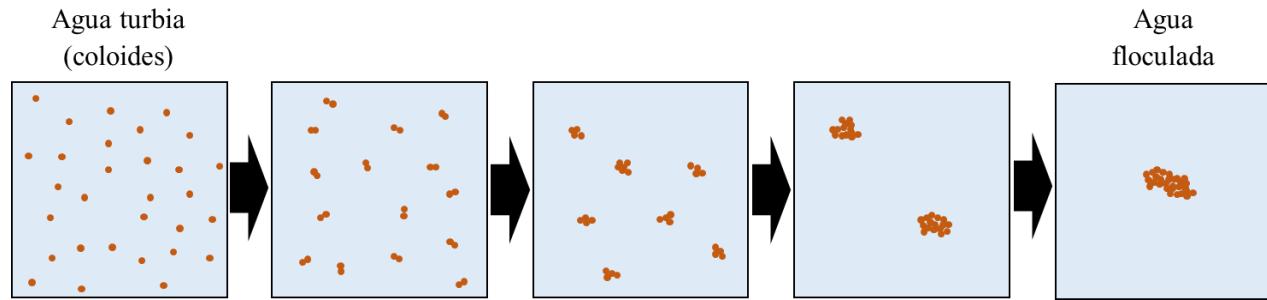


Ilustración 21. La formación de un flóculo a través de choques entre partículas en el agua. En realidad, un flóculo lleva miles de las partículas primarias.

En la planta AquaClara el floculador es una serie de canales con láminas y tubos que dirigen el flujo de agua. Al dar la vuelta alrededor de un “deflector” o pasar entre dos tubos, el chorro de agua se expande. Esta expansión turbulenta es donde se crean las condiciones que promueven choques entre las partículas causando velocidades relativas en el flujo.

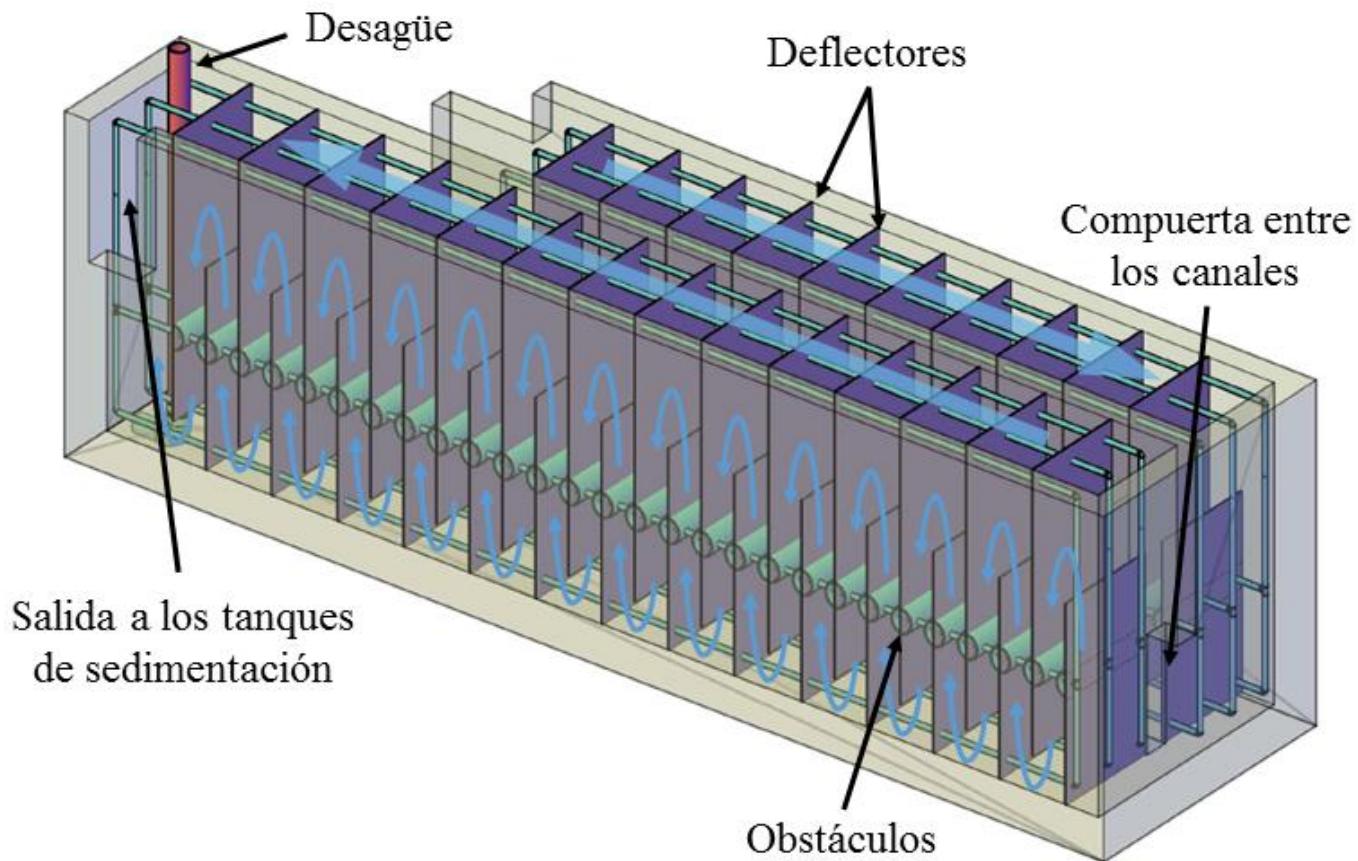


Ilustración 22. Vista isométrica de un floculador de AquaClara con paredes transparentes. Las flechas azules indican la dirección del flujo de agua.

Los deflectores se fabrican de láminas de policarbonato. Están conectados por una estructura de tubos de PVC de 1.27 cm (0.500 pulgadas), con separadores de 1.90 cm (0.750 pulgadas). Se usa el material flexible para que los deflectores quepan precisamente en los canales sin brechas entre las láminas y las paredes. Los módulos son fáciles de sacar para limpieza o mantenimiento del floculador (Ilustración 23).



Ilustración 23. Los módulos de deflectores del floculador.

Con la excepción del primero, cada canal del floculador cuenta con un desagüe de 7.62 cm (3.00 pulgadas) de diámetro en el extremo pegado al canal de limpieza de la planta. Los desagües se operan de manera sencilla quitando un niple largo de PVC que se extiende arriba del agua (Ilustración 24).



Ilustración 24. Imagen de un floculador con los módulos de deflectores elevados y apoyados por los tubos cruzados. Esto se hace para que los deflectores bajos no se dañen por la presión estática del agua cuando se están llenando los canales. Los niples de los desagües se ven en el primer plano.

6.2 – Datos del Diseño

Tabla 9. Datos del floculador

| Datos Constructivos | |
|---|--|
| Longitud de los canales | 6.99 m |
| Ancho de los canales | 53.0 cm |
| Profundidad de los canales | 2.05 m |
| Número de canales | 4 |
| Número de deflectores en cada canal | 11 en el primero, 16 en el último, 17 en los demás si hay más de 2 canales |
| Altura de los deflectores superiores | 1.66 m |
| Altura de los deflectores inferiores | 1.12 m |
| Separación entre los deflectores | 38.7 cm |
| Altura de la compuerta entre los canales | 55.9 cm |
| Ancho de la compuerta entre los canales | 36.7 cm |
| Número de obstáculos entre cada dos deflectores | 0 |
| Ancho del flujo de agua pasando por el obstáculo | 23.7 cm |
| Parámetros Hidráulicos | |
| Tasa máxima de la disipación de energía | 21 mW/kg |
| Tasa media de la disipación de energía | 11 mW/kg |
| Pérdida de carga total con el caudal máximo de diseño | 44.1 cm |
| Tiempo de retención mínimo | 8.2 min |
| Potencial de colisiones real | 79 m^(2/3) |
| Gradiente de velocidad medio (calculado retroactivamente) | 100 s^-1 |
| Datos de Tubería | |
| Los desagües | 7.62 cm (3.00 pulgadas), SDR 26 |
| Los obstáculos | 25.4 cm (10.0 pulgadas), SDR 41 |
| Los separadores de los deflectores | 1.90 cm (0.750 pulgadas), SDR 17 |
| Los conectores de los deflectores | 1.27 cm (0.500 pulgadas), SDR 13.5 |

6.3 – Conceptos de Diseño

El potencial de colisiones y el rendimiento del floculador

Las partículas suspendidas en el agua deben colisionar cierto número de veces con el fin de alcanzar el tamaño suficiente para sedimentarse en el tanque de sedimentación. Para lograr el número adecuado de colisiones se necesita tiempo y velocidades relativas que juntan los recorridos de las partículas. Los parámetros tradicionales en el diseño de los floculadores para tomar en cuenta estas dos necesidades son 1) el tiempo de retención θ y 2) el gradiente de velocidad G de Camp y Stein (1955). Los diseños convencionales normalmente caracterizan el potencial de colisiones como el producto de estos dos números $G\theta$.

Sin embargo, se ha demostrado que el gradiente de velocidad es un parámetro válido para describir la floculación únicamente cuando el flujo es laminar, o cuando la separación típica entre partículas es menor que la escala característica de la turbulencia L_K . Con flujo laminar la tasa de colisiones entre partículas es proporcional al gradiente medio de velocidad. Este caso casi nunca se da en las aplicaciones de ingeniería sanitaria de tratamiento de agua potable y aguas residuales, donde los floculadores son principalmente turbulentos. El gradiente de velocidad no describe la floculación en el rango inercial, donde el transporte de partículas por medio de los remolinos turbulentos es el fenómeno que domina el proceso (Cleasby 1984, Weber-Shirk 2010).

Para los floculadores turbulentos la tasa media de la disipación de energía elevada a un tercio ($\bar{\varepsilon}^{\frac{1}{3}}$) es mejor que el gradiente de velocidad para describir la floculación, ya que la separación entre partículas por lo general es mayor que la escala característica de la turbulencia L_K . La tasa de la disipación de energía está relacionada al gradiente de velocidad por la fórmula:

$$\bar{\varepsilon} = \nu G^2$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido.

El potencial de colisiones que se usa para el diseño de los floculadores turbulentos de AguaClara se define como:

$$\psi = \alpha_\psi \theta \bar{\varepsilon}^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

ψ = potencial de colisiones ($m^{2/3}$)

α_ψ = eficiencia del floculador

θ = tiempo de retención del floculador (s)

$\bar{\varepsilon}$ = tasa media de la disipación de energía (W/kg)

El problema principal con el gradiente medio de velocidad G es la dependencia de la viscosidad, la cual no tiene sentido ya que las fuerzas viscosas no importan en el rango inercial donde sucede la floculación ortocinética. En la práctica, la diferencia entre el gradiente G y la tasa de la disipación de energía ε como parámetros de diseño es la dependencia de G en la temperatura por el efecto de la viscosidad del fluido. Para

una temperatura constante, los parámetros prácticamente son intercambiables ya que los dos están directamente relacionados con la cantidad de energía gastada. La distinción más importante del potencial de colisiones usado aquí es la consideración de la uniformidad de la disipación de energía, tomada en cuenta con el factor de eficiencia α_ψ (véase la siguiente sección).

El potencial de colisiones es una propiedad del floculador en sí, independiente de las características del agua cruda, la dosis de coagulante, y el diseño del proceso de sedimentación. Además, para los floculadores hidráulicos de AguaClara resulta que es independiente también del caudal de agua. Aunque la tasa de la disipación de energía y el tiempo de retención dependen del caudal, el producto es una función únicamente del tamaño y la geometría del reactor. Se diseña el floculador de la planta AguaClara con un potencial de colisiones mínimo de $75 \text{ m}^{(2/3)}$, el cual ha sido exitoso en las plantas y los simuladores anteriores con turbiedad baja, y corresponde generalmente a los valores recomendados de $G\theta$ para los diseños convencionales de floculadores de esta escala.

La remoción de partículas en los procesos de floculación y sedimentación depende de muchos factores que no se toman en cuenta con el potencial de colisiones, como se ha mencionado. Swetland et al (2014) desarrolló un modelo predictivo amplio de estos procesos que incluye: las características del agua cruda tal como la carga de sedimento y el tamaño característico de las partículas; la cobertura fraccional del coagulante en los sólidos, relacionado con la dosis y la demanda; el tipo de coagulante; y el proceso de sedimentación. El modelo es escalable ya que está basado en la física fundamental del proceso y confirmado con datos de pruebas de diversas condiciones. Para la floculación turbulenta el modelo en su forma actual dice:

$$pC^* = \frac{9}{8} \log \left(\frac{8}{9} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{8}{9}} \pi k \Gamma \phi_0^{\frac{8}{9}} \frac{t \varepsilon^{\frac{1}{3}}}{d_{Coloide}^{\frac{2}{3}}} + 1 \right)$$

Donde:

$$pC^* = -\log \left(\frac{C_{sedimentada}}{C_{afluente}} \right) = \text{una medida de la remoción de sólidos suspendidos}$$

Γ = la cobertura fraccional de la superficie de los sólidos con coagulante, relacionada a la dosis, la mezcla rápida, y la demanda de coagulante del agua cruda

ϕ_0 = la fracción del volumen de la suspensión ocupada por los sólidos al inicio del proceso

t = el tiempo de floculación

ε = la tasa media de la disipación de energía

$d_{Coloide}$ = el tamaño característico de las partículas primarias

k = un constante de velocidad, efectivamente un factor de ajuste

Sin embargo, a diferencia de algunas metodologías convencionales, en el diseño del floculador de AguaClara no se considera ninguna característica del agua cruda aparte de la necesidad general de los procesos de floculación y sedimentación para la remoción de sólidos suspendidos. Es decir, el diseño es independiente de los resultados de pruebas de jarra u otros análisis preliminares. Los únicos factores del modelo predictivo que se toman en cuenta en el diseño son los relacionados al potencial de colisiones (la tasa de la disipación de energía; la uniformidad espacial de la turbulencia – véase la siguiente sección; y el

tiempo de retención). Y estos factores son independientes del agua cruda, ya que siempre se da $75 \text{ m}^{(2/3)}$ de potencial de colisiones como mínimo, lo cual ha sido suficiente aún para las suspensiones más difíciles con poca carga de sedimento. En lugar de conocer las características del agua cruda, el objetivo es diseñar un floculador que pueda flocular efectivamente cualquier suspensión con cobertura suficiente de coagulante. Por eso la herramienta de diseño no pide ninguna entrada del usuario relacionada a las pruebas de tratabilidad. El agua cruda sólo entra en el diseño de los dosificadores del coagulante y cloro donde la demanda de estos dos químicos en los momentos más críticos determina la dosis máxima.

Se ha formulado el diseño de AguaClara para que sea independiente del agua cruda por dos razones principales:

1. Los resultados de las pruebas de jarra pueden ser útiles para determinar la eficiencia de la coagulación variando la dosis de coagulante, pero normalmente no se aplican a la floculación de escala real por las diferencias fundamentales en los procesos, tal como la gran variedad de gradientes de velocidad locales en los reactores con agitadores.
2. Las características del agua cruda siempre varían con el tiempo, y en muchos casos es difícil obtener un juego representativo de datos dentro del tiempo y el presupuesto disponibles para el estudio y diseño de la planta. Una de las metas principales de AguaClara es brindar soluciones efectivas bajando costos y tiempos lo más posible para poder servir al máximo número de personas.

Como punto final relacionado al rendimiento del floculador, en el caso de AguaClara su diseño no toma en cuenta la floculación que sucede en el tanque de sedimentación. El manto de lodos es una suspensión de flóculos que se mantiene en la parte inferior del tanque de sedimentación y que provee la oportunidad para colisiones entre partículas causadas por la sedimentación diferencial y la mezcla provocada por los chorros de entrada. Por tanto, es probable que en realidad el floculador esté sobredimensionado y que el potencial de colisiones total no será el limitante en la remoción de partículas.

Eficiencia del floculador

En el cálculo del potencial de colisiones se aplica un factor de eficiencia α_ψ para tomar en cuenta la falta de uniformidad de la turbulencia en el flujo. La expansión del chorro provocada por la vuelta alrededor de un deflector ocupa solamente una parte del espacio entre las siguientes láminas (Ilustración 25). Esta expansión es donde se encuentra la turbulencia que causa las velocidades relativas que juntan las partículas suspendidas. Dentro del chorro hay regiones de alta disipación de energía, la cual indica turbulencia violenta y altas velocidades relativas, y hay también zonas de turbulencia más suave. De igual manera hay regiones del flujo que contribuyen muy poco a la floculación porque están fuera de la expansión del chorro. Si la tasa de la disipación de energía fuera uniforme el factor α_ψ sería igual a uno. Esto sería un floculador ideal, con turbulencia uniforme y todo el volumen contribuyendo igualmente a la unión de partículas.

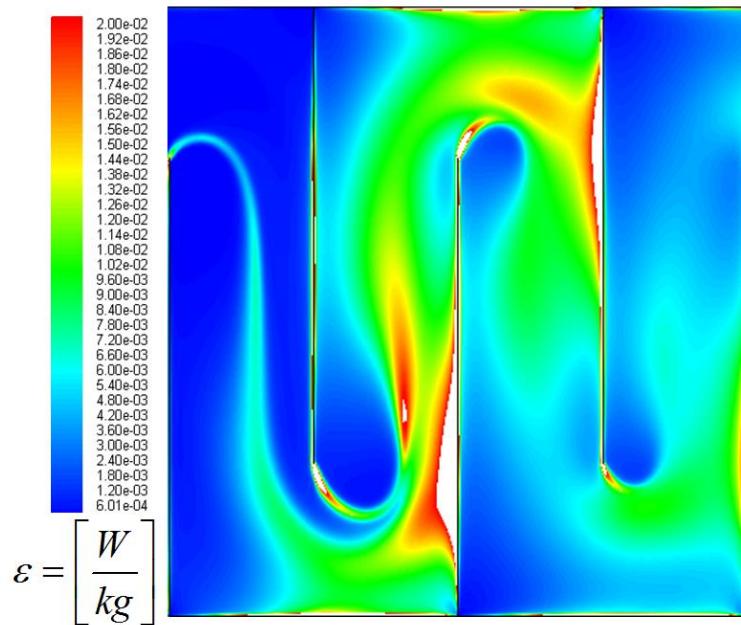


Ilustración 25. Distribución de la tasa de la disipación de energía en un floculador según análisis de CFD.

Una medida de la falta de uniformidad de la disipación de energía en el floculador es el radio α_ε , definido como:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\bar{\varepsilon}}$$

Donde:

ε_{max} = la tasa máxima de la disipación de energía (W/kg)

$\bar{\varepsilon}$ = la tasa media de la disipación de energía (W/kg)

La geometría de los deflectores determina la uniformidad de la disipación de energía. En particular, el radio de la longitud de la expansión del chorro a la separación entre los deflectores (H/S) está relacionado directamente a la uniformidad de la expansión. Es decir, este radio determina la eficiencia del floculador en cuanto al porcentaje del espacio que contribuye a la unión de partículas. Si el espacio para la expansión es muy largo comparado con la separación entre los deflectores, la expansión del chorro se termina en la primera parte del espacio disponible y se desperdicia una gran parte del volumen del floculador (Ilustración 26).

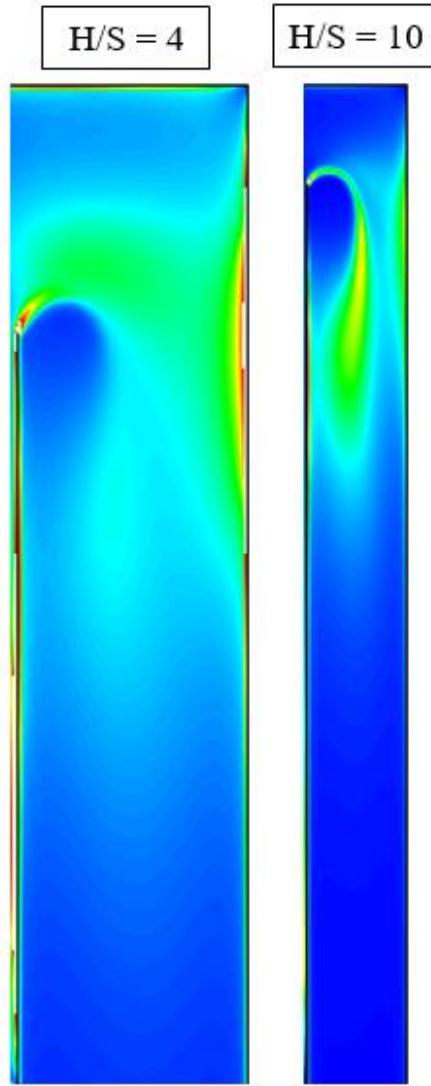


Ilustración 26. El radio de la longitud de la expansión a la separación entre deflectores (H/S) determina la uniformidad espacial de la disipación de energía.

Según una serie de análisis de CFD, el rango óptimo del radio H/S está entre 3.00 y 5.00. Aquí el radio α_ε es igual a 2. Arriba del rango óptimo la uniformidad de la turbulencia se deteriora y α_ε está relacionado con la geometría por la siguiente fórmula:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\Pi_{Jet}^3}{\Pi_{VC}^4} \frac{2}{K_B} \left(\frac{H}{S} \right)$$

Donde:

Π_{Jet} = un factor relacionado a la geometría del flujo al pasar alrededor de un deflector = 0.225

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para el deflector = 0.387

K_B = el coeficiente de pérdida de carga para la expansión del chorro = 2.50

$\frac{H}{S}$ = el radio de la longitud de la expansión a la separación entre los deflectores

En los diseños anteriores de AquaClara las restricciones constructivas impedían una geometría eficiente. La altura mínima de los canales se determinaba por la altura del tanque de sedimentación adyacente, y el ancho mínimo de los canales se determinaba por el espacio necesario durante la construcción. Por el ancho del canal la separación entre deflectores tenía que ser menor que la óptima para mantener una velocidad que levantara los flóculos sedimentados del piso. Por simplicidad de fabricación, sólo había una expansión entre cada dos láminas. Especialmente para caudales menores, el resultado de estas restricciones era un radio H/S muy arriba del rango óptimo. Había que compensar con un floculador más grande para cumplir el objetivo del potencial de colisiones.

Ahora se diseña el floculador con obstáculos adicionales entre las láminas que provocan expansiones. De esta manera se reduce la longitud del espacio después de cada expansión y se puede mantener el radio H/S dentro del rango óptimo. Los obstáculos son dos pedazos de tubo de PVC entre los cuales el agua tiene que fluir, causando una contracción seguida por la misma expansión que ocurre después de la vuelta alrededor de un deflector.

Por fin, la eficiencia del floculador α_ψ se encuentra por:

$$\alpha_\psi = \frac{1}{\alpha_\varepsilon^{\frac{1}{6}}}$$

La tasa máxima de la disipación de energía

El tamaño máximo de los flóculos depende no precisamente de la velocidad en el floculador, como se ha sugerido en algunas recomendaciones convencionales de diseño, sino de la tasa máxima de la disipación de energía en el flujo de agua. Los puntos de turbulencia más violenta rompen los flóculos con la fuerza cortante de los remolinos turbulentos adyacentes. En la expansión del chorro que sigue después de la vuelta alrededor de un deflector de un floculador hidráulico, la tasa máxima de la disipación de energía se encuentra por la fórmula:

$$\varepsilon_{max} = \frac{(\Pi_{Jet} V_{Jet})^3}{S \Pi_{VC}}$$

Donde:

V_{Jet} = la velocidad en el chorro generado por el deflector

S = la separación entre los deflectores

Con el objetivo de construir un floculador que permite la formación de flóculos del mayor tamaño posible, antes en el diseño de AquaClara se imponía una restricción conservadora en la tasa máxima de la disipación de energía. La restricción hacía posible los flóculos muy grandes, pero exigía un tiempo de retención mayor para lograr el potencial de colisiones predeterminado.

Más recientemente se ha investigado la idea de que no es el tamaño máximo de los flóculos que realmente determina la calidad de agua sedimentada, sino el número de partículas primarias que no han floculado al

alcanzar el fin del proceso. Por ejemplo, los flóculos más grandes, si se dividen en dos por la fuerza cortante del flujo, siempre se captarán en el tanque de sedimentación, ya que la velocidad de captura es mucho menos que la velocidad de sedimentación de estas partículas. Las partículas que constituyen la turbiedad del efluente son mucho más pequeñas, y es probable que su origen se deba a la falta de cobertura del coagulante, no a la alta disipación de energía.

En varias simulaciones de laboratorio en que se variaron el tiempo de retención y el gradiente de velocidad en un floculador de flujo laminar, los datos preliminares sugieren que se puede compensar una reducción en el tiempo de retención con un aumento en el gradiente de velocidad (así manteniendo constante el potencial de colisiones) para producir el mismo resultado con respecto a la calidad de agua sedimentada. Al aumentar el gradiente de velocidad se limita el tamaño máximo de los flóculos. Este resultado sugiere que el tamaño máximo de los flóculos no es crítico para el rendimiento del sistema de tratamiento.

Al final, los flóculos serán sometidos a una tasa de la disipación de energía de 130 mW/kg en la entrada al tanque de sedimentación para causar 6.29 mm de pérdida de carga y así mantener la distribución de caudal uniforme a lo largo del manifold. Los datos de la simulación de laboratorio que se hizo para probar este diseño sugieren que no se disminuye la calidad de agua sedimentada hasta que la tasa de la disipación de energía en la entrada al tanque supera 0.5 W/kg. Dado que el tamaño máximo de los flóculos será limitado por la entrada al tanque de sedimentación, no tiene sentido diseñar un floculador para producir flóculos grandes que después se van a romper, sacrificando economía de construcción.

Las dimensiones del floculador y la tasa de la disipación de energía

Aunque ya no se impone la restricción en la tasa máxima de la disipación de energía, sigue siendo un parámetro fundamental en el diseño. La siguiente derivación que relaciona la tasa de la disipación de energía con las dimensiones del tipo de floculador de flujo vertical que se usa en las plantas AguaClara será importante en el algoritmo de diseño.

La tasa media de la disipación de energía se puede escribir de la forma:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\text{Energía perdida}}{\text{Tiempo}} = \frac{K_B \frac{\bar{V}^2}{2}}{\theta_B} = \frac{K_B \bar{V}^3}{2H}$$

Donde:

K_B = coeficiente de la pérdida de carga para la vuelta alrededor de un deflector = 2.50

\bar{V} = velocidad media en el floculador

θ_B = tiempo de retención del espacio entre dos deflectores = $\frac{\bar{V}}{H}$

H = longitud de la expansión del chorro después de un deflector, antes de la siguiente contracción

El área perpendicular a la dirección del flujo en el espacio entre deflectores es el producto del ancho del canal y la separación entre deflectores. Por lo tanto, la velocidad media se puede escribir de la siguiente forma:

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{WS}$$

Donde:

W = el ancho del canal

S = la separación entre deflectores

Sustituyendo esta expresión para la velocidad media, la tasa media de la disipación de energía se escribe:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{K_B Q^3}{2HW^3S^3}$$

Esta fórmula se puede usar de varias maneras dependiendo de cómo está restringido el diseño. Tres casos importantes en el algoritmo de diseño son:

1. Para encontrar el ancho mínimo del canal W cuando el radio H/S está restringido al valor mínimo del rango eficiente (3.00):

$$W = \left(\frac{H}{S}\right)_{Min} \left(\frac{K_B}{2H\bar{\varepsilon}}\right)^{1/3} \frac{Q}{H}$$

2. Para calcular la separación máxima entre expansiones que mantiene el radio H/S dentro del rango eficiente:

$$H_{Max} = \left(\frac{K_B}{2\bar{\varepsilon}}\right)^{1/4} \left(\frac{\left(\frac{H}{S}\right)_{Max} Q}{W}\right)^{3/4}$$

3. Para encontrar la separación entre deflectores cuando ya se saben las otras dimensiones:

$$S = \left(\frac{K_B}{2H\bar{\varepsilon}}\right)^{1/3} \frac{Q}{W}$$

Bibliografía

Cleasby, J., 1984. Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter? *J. Environ. Eng.* 110 (5), 875e897.

Swetland, K., Weber-Shirk, M., and Lion, L. (2014). "Flocculation-Sedimentation Performance Model for Laminar-Flow Hydraulic Flocculation with Polyaluminum Chloride and Aluminum Sulfate Coagulants." *J. Environ. Eng.*, 140(3), 04014002.

Weber-Shirk, M. L., Lion, L. W., 2010. Flocculation model and collision potential for reactors with flows characterized by high peclet numbers. *Water Res.* 44 (18), 5180-5187.

6.4 – Algoritmo de Diseño

1. Entradas al algoritmo y asunciones

Tabla 10. Entradas al algoritmo del floculador

| Parámetro | Valor | Notas |
|--|-------------|---|
| Potencial de colisiones mínimo | 75 m^(2/3) | |
| Pérdida de carga máxima | 0.400 m | Entrada opcional del usuario. La pérdida de carga real podría salir menor si no se necesita. |
| Longitud de los canales | 6.99 m | Basada en la longitud del tanque de sedimentación para que comparten una pared. |
| Profundidad de agua al final | 1.50 m | Basada en la profundidad del tanque de sedimentación para que los dos tanques compartan una sola cimentación. |
| Ancho mínimo de los canales | 53.0 cm | Basado en 1) el espacio que necesita un obrero para terminar de construir el canal cuando está dentro y 2) el ancho de la mitad de las láminas de policarbonato que se usan para los deflectores, para conservar el material. |
| Ancho máximo de los canales | 1.06 m | Basado en el ancho total de las láminas de policarbonato que se usan para los deflectores. |
| Radio de la longitud de cada expansión a la separación entre deflectores (H/S) | 3.00 - 6.00 | El radio H/S debe estar en el rango eficiente. |
| Radio de la tasa máxima a la tasa media de la disipación de energía (α_ε) | 2.00 | La medida de la falta de uniformidad de la tasa de la disipación de energía, que corresponde a la geometría descrita por el radio H/S. |
| Eficiencia del floculador (α_ψ) | 0.891 | Eficiencia del floculador que corresponde al radio α_ε . |
| Valor mínimo de la tasa media de la disipación de energía | 5.0 mW/kg | Se impone esta restricción para evitar la sedimentación de los flóculos en el floculador. |

2. Volumen máximo dedicado al tanque de entrada

El tanque de entrada ocupa la primera parte del primer canal en el floculador (Ilustración 27). Habrá que restar este volumen, inútil para la floculación, cuando se calcule el número y el ancho de los canales para lograr el potencial de colisiones mínimo. Como primer paso del algoritmo se calcula la longitud del tanque de entrada asumiendo el ancho mínimo de los canales, lo cual corresponde a la longitud máxima del tanque para mantener la velocidad de captura deseada (véase sección anterior). Esto da una estimación conservadora. Las dimensiones reales del tanque de entrada se calcularán más adelante cuando se sepa el ancho de los canales.

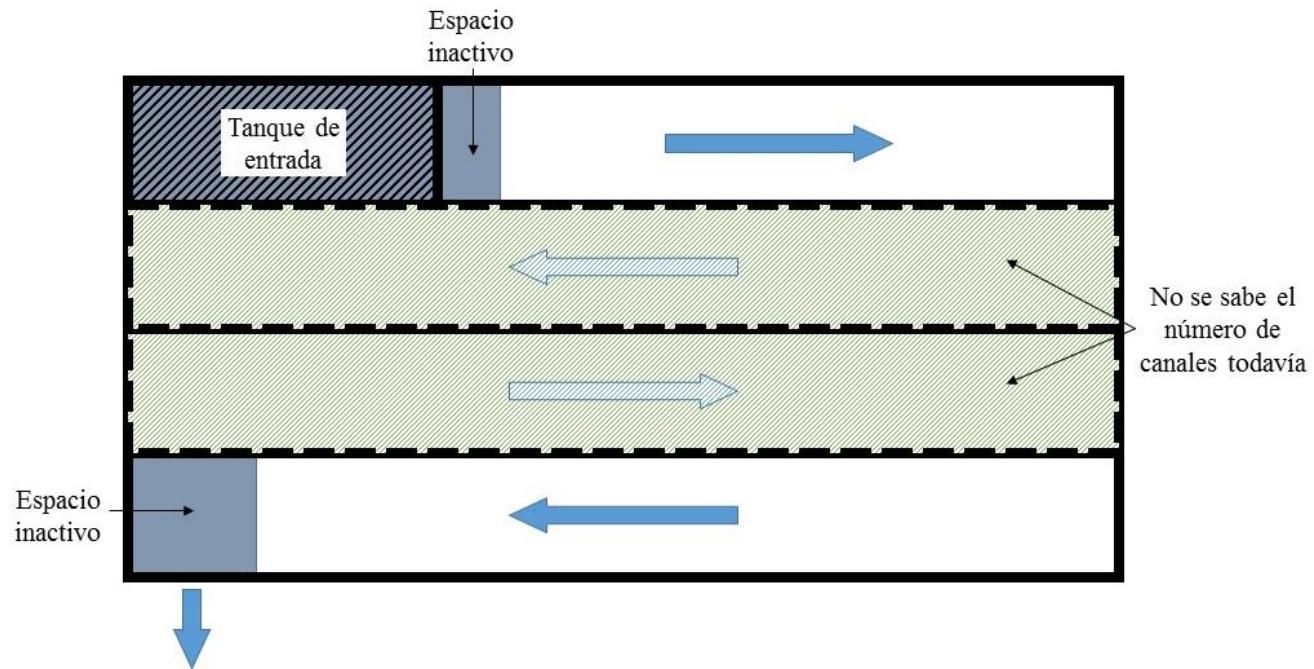


Ilustración 27. El tanque de entrada y el inicio y final del recorrido de agua por el floculador ocupan espacio que hay que restar del volumen dedicado a la floculación.

3. Volumen del floculador

Hay dos restricciones para el volumen mínimo dedicado a la floculación:

1. **Constructiva:** Tiene que haber por lo menos dos canales para mantener la configuración de la planta, para que tanto el tanque de entrada como los canales de entrada y salida de los tanques de sedimentación estén pegados al canal de limpieza. Ya se sabe la longitud y la profundidad de los canales del floculador en base a las dimensiones de los tanques de sedimentación. También hay una restricción para el ancho mínimo de cada canal. Multiplicando estas dimensiones mínimas y restando el volumen inactivo (Ilustración 27) se encuentra el volumen mínimo dedicado a la floculación 6.43 kL.
2. **Hidráulica:** Asumiendo una geometría eficiente (sección 6.3), del potencial de colisiones y la pérdida de carga máxima se calcula la tasa media de la disipación de energía directamente:

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{h_{eMax} g}{\psi \alpha_e^{1/6}} \right)^{3/2}$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}$ = la tasa media de la disipación de energía máxima para este diseño = 10 mW/kg

h_{eMax} = la pérdida de carga máxima en el floculador = 0.400 m

g = la aceleración debida a la fuerza de gravedad $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$

ψ = el potencial de colisiones deseado = 75 m^(2/3)

α_ε = medida de la uniformidad de la disipación de energía = 2.00

Con esto se calcula el tiempo de retención necesario para lograr el potencial de colisiones, igual a 6.5 min:

$$\theta = \frac{\psi}{(\bar{\varepsilon})^{1/3} \alpha_\psi}$$

Por fin se calcula el volumen necesario, igual a 18.7 kL:

$$Vol = Q\theta$$

Donde Q = el caudal de diseño de la planta = 48.0 L/s.

El mayor de los volúmenes dados por estas dos restricciones será el volumen activo del floculador, igual a 18.7 kL.

4. Tasa de la disipación de energía

Como se mencionó en la sección anterior, en los diseños de AquaClara ya no se impone ninguna restricción directa para la tasa máxima de la disipación de energía relacionada al tamaño máximo de los flóculos. En lugar de ella se asume un valor razonable para la pérdida de carga máxima, una entrada opcional del usuario, que mantiene la tasa de la disipación de energía correspondiente dentro de un rango aceptable que asegura la floculación efectiva.

La *mínima* tasa de la disipación de energía sí tiene dos restricciones:

1. **Hidráulica:** Con el volumen del floculador calculado en el paso anterior, y el tiempo de retención correspondiente, la tasa media de la disipación de energía necesaria para lograr el potencial de colisiones deseado se calcula directamente. Es igual a 10 mW/kg.

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{\psi}{\theta \alpha_\psi} \right)^3$$

2. **Práctica:** Es importante que el piso del floculador se mantenga libre de sedimento para no crear trabajo de mantenimiento innecesario y desperdicio de agua para la limpieza. A este fin se impone una restricción mínima para la tasa media de la disipación de energía, igual a 5.0 mW/kg.

El mayor de los dos valores será la tasa media de la disipación de energía de diseño, igual a 10 mW/kg. Este valor se corregirá más adelante por el hecho de que tiene que haber un número entero de deflectores distribuidos en un canal de longitud predeterminada, y por tanto la separación entre ellos no puede corresponder exactamente a esta tasa de la disipación de energía.

5. Ancho de los canales y el número de canales

Hay dos restricciones para el ancho mínimo de los canales:

1. **Constructiva:** Ya que están construidos generalmente de ladrillos con repollo y dado fino, es importante que los canales del floculador de una planta AguaClara sean lo suficiente anchos que una persona se pueda meter adentro durante la construcción y trabajar libremente. Convenientemente, este ancho mínimo para la facilidad de construcción corresponde aproximadamente al ancho de la mitad de las láminas de policarbonato que se usan para los deflectores (53.0 cm). Si el algoritmo opta por este ancho mínimo, las láminas de policarbonato se usan eficientemente con el mínimo número de cortes, así bajando los costos de fabricación.
2. **Hidráulica:** Se ha asumido que la geometría del floculador sería eficiente. Es decir, el radio de la longitud de las expansiones a la separación entre deflectores (H/S) está dentro del rango 3.00 a 5.00. Ya se sabe también la profundidad al final del floculador (1.50 m) que corresponde a la profundidad del tanque de sedimentación. Con esta profundidad y la separación entre deflectores que mantiene el radio H/S dentro del rango eficiente, hay un ancho mínimo que da la tasa media de la disipación de energía que se calculó anteriormente.

$$W_{Min} = \left(\frac{H}{S}\right)_{Min} \left(\frac{K_B}{2H\bar{\epsilon}}\right)^{1/3} \frac{Q}{H}$$

Donde en este caso H = la profundidad al final del floculador = 1.50 m.

Es igual a 41.7 cm. El ancho de los canales puede ser mayor, y se compensaría reduciendo la separación entre deflectores. Esta restricción para el ancho mínimo domina solamente para caudales grandes donde la separación entre deflectores quiere ser grande comparada con la profundidad de los canales.

El mayor de estos dos valores será el ancho *mínimo* de los canales, igual a 53.0 cm.

También hay una restricción **constructiva** para el ancho *máximo* de los canales, que corresponde al ancho total de las láminas de policarbonato que se usan para los deflectores, igual a 1.06 m.

Para encontrar el número necesario de canales se asume que el ancho de cada canal será el mayor posible. Si esto significa que la separación entre deflectores se disminuye hasta que el radio H/S esté arriba del rango eficiente, se agregarán obstáculos en los espacios entre deflectores para reducir la longitud de las expansiones. Usar el ancho máximo en el cálculo del número de canales produce el número mínimo de canales, así reduciendo los costos de construcción.

Si todos los canales del floculador contribuyeran igualmente a la floculación, el número de canales se encontraría por la siguiente ecuación, redondeando para arriba.

$$N = \frac{Vol}{W_{Max}HL}$$

Donde:

L = la longitud de los canales que corresponde a la longitud de los tanques de sedimentación = 6.99 m

Sin embargo, del volumen total hay que restar el volumen que ocupa el tanque de entrada y el espacio inactivo al final del floculador donde el agua entra en el canal de entrada de los tanques de sedimentación. Además, tiene que haber un número par de canales. El verdadero número de canales, igual a 4, se encuentra por:

$$N_{Canal} = \text{Ceil}\left(\frac{\frac{Vol}{W_{Max}H} + L_{Et} + T + 2W_{SedCanal}}{L}, 2\right)$$

Donde:

La función $\text{Ceil}(x, 2)$ redondea el valor x para arriba al número par más cercano

L_{Et} = longitud máxima del tanque de entrada en el primer canal = 2.02 m

T = grosor de la pared del tanque de entrada = 0.150 m

$W_{SedCanal}$ = el ancho del canal de entrada de los tanques de sedimentación = 39.7 cm

Ya con el número de canales se puede calcular el ancho mínimo de cada canal para alcanzar el volumen total calculado anteriormente, igual a 49.7 cm:

$$W_{Min} = \frac{Vol}{H(N_{Canal}L - L_{Et} - T - 2W_{SedCanal})}$$

Por último, se toma el máximo del ancho calculado para alcanzar el volumen y el ancho mínimo que salió de las dos restricciones anteriores y se redondea para arriba al centímetro más cercano por facilidad de construcción. El ancho de los canales será 53.0 cm.

6. Separación entre expansiones

Existe la opción de colocar obstáculos entre los deflectores que provocan la misma expansión que sucede después de la vuelta alrededor de un deflector, para reducir la separación entre expansiones y mantener el radio H/S dentro del rango eficiente. Dado el ancho de los canales, la tasa de la disipación de energía nos da la separación máxima entre obstáculos que mantiene la geometría eficiente (véase sección 6.3):

$$H_{MaxExp} = \left(\frac{K_B}{2\bar{\epsilon}}\right)^{1/4} \left(\frac{\left(\frac{H}{S}\right)_{Max} Q}{W}\right)^{3/4}$$

Donde:

H_{MaxExp} = la separación entre expansiones, que podrían ser provocadas por obstáculos o deflectores

El número de expansiones entre cada dos deflectores se encuentra por la profundidad del tanque entre la separación máxima, igual a 1:

$$N_{Exp} = \text{ceil} \left(\frac{H_{Floculador}}{H_{MaxExp}} \right)$$

Por fin, la separación real entre expansiones, igual a 1.50 m, es:

$$H_{Exp} = \frac{H_{Floculador}}{N_{Exp}}$$

7. Separación entre deflectores

Ya con las otras dimensiones determinadas, la separación entre deflectores, igual a 39.4 cm, que corresponde a la tasa de la disipación de energía calculada anteriormente se encuentra por:

$$S_{Min} = \left(\frac{K_B}{2H\bar{\epsilon}} \right)^{1/3} \frac{Q}{W}$$

Sin embargo, tiene que haber un número entero de deflectores en el canal de longitud predeterminada. El número de espacios entre deflectores que mantiene la separación mínima se encuentra por:

$$N_{Esp} = \text{Ceil} \left(\frac{L + T}{S_{Min} + T}, 2 \right)$$

Donde:

N_{Esp} = el número de *espacios* entre deflectores en cada canal = 18

La función $\text{Ceil}(x, 2)$ redondea el valor x para arriba al número par más cercano

L = la longitud del canal = 6.99 m

T = el grosor de la lámina de policarbonato que se usa para los deflectores = 2.00 mm

Este número de espacios corresponde a 17 deflectores en cada canal.

Por fin se calcula la separación precisa entre los deflectores, igual a 38.7 cm:

$$S = \frac{L - N_{Def}T}{N_{Esp}}$$

Donde:

S = la separación entre los deflectores = 38.7 cm

N_{Def} = el número de deflectores en cada canal = 17

Este paso que corrige la separación por la necesidad de tener un número entero de deflectores en cada canal es la causa de la diferencia entre los valores de diseño y los valores finales de la pérdida de carga (44.1 cm

en vez de 40.0 cm), la tasa media de la disipación de energía (11 mW/kg en vez de 10 mW/kg), y el potencial de colisiones ($79 \text{ m}^{(2/3)}$ en vez de $75 \text{ m}^{(2/3)}$). Ya que la corrección siempre reduce la separación, lo cual aumenta la tasa de la disipación de energía, todos estos parámetros terminan siendo mayor que los valores originales de diseño.

8. Cálculo de los parámetros finales

1. El potencial de colisiones provocado por una sola expansión:

$$\psi_{Exp} = \left(\frac{K_B^2 H_{Exp}^4}{4\alpha_\varepsilon} \right)^{1/6}$$

Donde:

ψ_{Exp} = el potencial de colisiones para una expansión = $1.3 \text{ m}^{(2/3)}$

H_{Exp} = la separación entre expansiones = 1.50 m

El potencial de colisiones total del floculador:

$$\psi_{Floc} = N_{Exp} \psi_{Exp}$$

Donde:

ψ_{Floc} = el potencial de colisiones total del floculador = $79 \text{ m}^{(2/3)}$

N_{Exp} = el número de expansiones en el floculador = 63

2. La velocidad media del fluido:

$$V = \frac{Q}{SW}$$

Donde:

V = la velocidad media del fluido = 234 mm/s

S = la separación entre deflectores = 38.7 cm

W = el ancho de los canales = 53.0 cm

3. La pérdida de carga:

$$h_e = K_B \frac{V^2}{2g} N_{Exp}$$

Donde:

h_e = la pérdida de carga total del floculador = 44.1 cm

V = la velocidad media del fluido = 234 mm/s

g = la aceleración debida a la gravedad = 9.81 m/s^2

4. La tasa real de la disipación de energía después de la corrección de la separación entre deflectores, igual a 11 mW/kg:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{K_B}{2H_{Exp}} \left(\frac{Q}{WS} \right)^3$$

Y la tasa máxima de la disipación de energía que corresponde, igual a 21 mW/kg:

$$\varepsilon_{Max} = \alpha_{\varepsilon} \bar{\varepsilon}$$

5. El gradiente medio de velocidad, igual a 100 s^-1:

$$G = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon}}{\nu}}$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del agua, igual a 1.00E-6 m^2/s.

6. El tiempo de retención total, incluyendo el espacio inactivo al final del último canal y contribuido por la pérdida de carga, igual a 8.2 min:

$$Vol_{Total} = WLH = W(N_{Canal}L_{Canal} - L_{Et} - T) \left(H + \frac{h_e}{2} \right)$$

$$\theta = \frac{Vol_{Total}}{Q}$$

El tiempo de retención activo se calcula restando el volumen inactivo, y es igual a 6.9 min.

9. Diseño de los obstáculos

Cada obstáculo es dos pedazos de tubo de PVC entre los cuales el agua tiene que fluir (Ilustración 28). Las expansiones provocadas por los obstáculos deben ser iguales a las que provocan los deflectores. Se asume que, por la forma redonda de los tubos y la curva gradual de las líneas de corriente, no hay vena contracta que sigue el obstáculo en el flujo, sino una expansión inmediata. Por tanto, el ancho del espacio entre los tubos debe ser igual al ancho de la parte más estrecha de la vena contracta que sigue después de la vuelta alrededor de un deflector:

$$W = S_{Def}(1 - \Pi_{VC})$$

Donde:

W = el ancho del espacio entre los tubos = 23.7 cm

S_{Def} = la separación entre deflectores = 38.7 cm

Π_{VC} = coeficiente de vena contracta para la vuelta alrededor de un deflector = 0.387

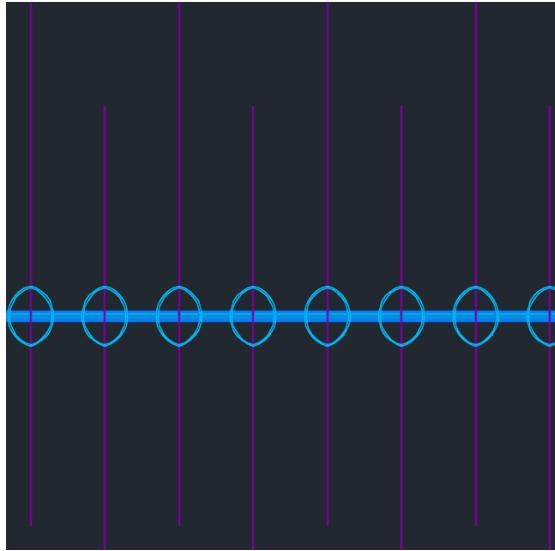


Ilustración 28. Vista lateral de los obstáculos entre los deflectores.

Por fin, el algoritmo busca el tamaño mínimo del tubo que ocupe el espacio necesario, igual a 25.4 cm (10.0 pulgadas).

10. Alturas

La altura del floculador se calcula sumando desde el nivel de agua en el canal de entrada al tanque de sedimentación:

$$H_{Floc} = HW_{Final} + h_e + H_{Borde}$$

Donde:

H_{Floc} = la altura total del tanque = 2.05 m

HW_{Final} = la profundidad de agua al final del floculador, determinada por el canal de entrada al tanque de sedimentación = 1.50 m

h_e = la pérdida de carga total del floculador = 44.1 cm

H_{Borde} = el espacio libre en la parte arriba del tanque = 10.0 cm

La altura de la losa del floculador es relativa a la solera inferior que amarra los tanques de sedimentación y el floculador. La parte abajo de esta solera es el nivel cero en el dibujo de AutoCAD. La parte abajo de la losa del floculador está al mismo nivel que la parte inferior de la solera, así que el nivel del fondo del tanque sólo depende del grosor de la losa 0.150 m.

11. Las compuertas entre los canales

En el diseño de las compuertas el área perpendicular al flujo de agua se conserva de tal forma que no hay regiones con tasas de la disipación de energía muy arriba del límite del diseño. Es decir, el área de la

compuerta es igual al área del espacio entre los deflectores. La compuerta debe caber en el espacio antes del primer deflector en el canal. Por tanto, el ancho se calcula en base a la separación entre deflectores:

$$W = S - d$$

Donde:

W = el ancho de la compuerta = 36.7 cm

S = la separación entre deflectores = 38.7 cm

d = la brecha entre el borde de la compuerta y el primer deflector = 2.00 cm

Con el fin de conservar el área perpendicular al flujo en todo el recorrido de agua a lo largo del floculador, la altura de la compuerta se calcula como:

$$H = \frac{SW_{Canal}}{W_{Compuerta}}$$

Donde H = la altura de la compuerta = 55.9 cm.

12. Desagües de los canales

Con la excepción del primero, todos los canales del floculador cuentan con un desagüe pegado al canal de limpieza de la planta. Se diseñan para que toda el agua se vaya del floculador dentro de 15 min, lo cual da el siguiente caudal de diseño:

$$Q_{Des} = \frac{Vol_{Floc}}{(N_{Canales} - 1)Ti}$$

Donde:

Q_{Des} = el caudal de diseño de cada desagüe = 8.74 L/s

Vol_{Floc} = el volumen total de agua en el floculador cuando está lleno = 23.6 kL

$N_{Canales}$ = el número de canales en el floculador = 4

Ti = el tiempo máximo que lleva el proceso de vaciar el floculador = 15 min

7. Sedimentación

7.1 – Propósito y Descripción

El objetivo principal de los tanques de sedimentación es quitar el sedimento del agua por la fuerza de gravedad. En este proceso el agua sube lentamente mientras las partículas suspendidas se caen y permanecen en la parte inferior del tanque. El operador purga los lodos acumulados a través de una válvula en el canal de limpieza de la planta.

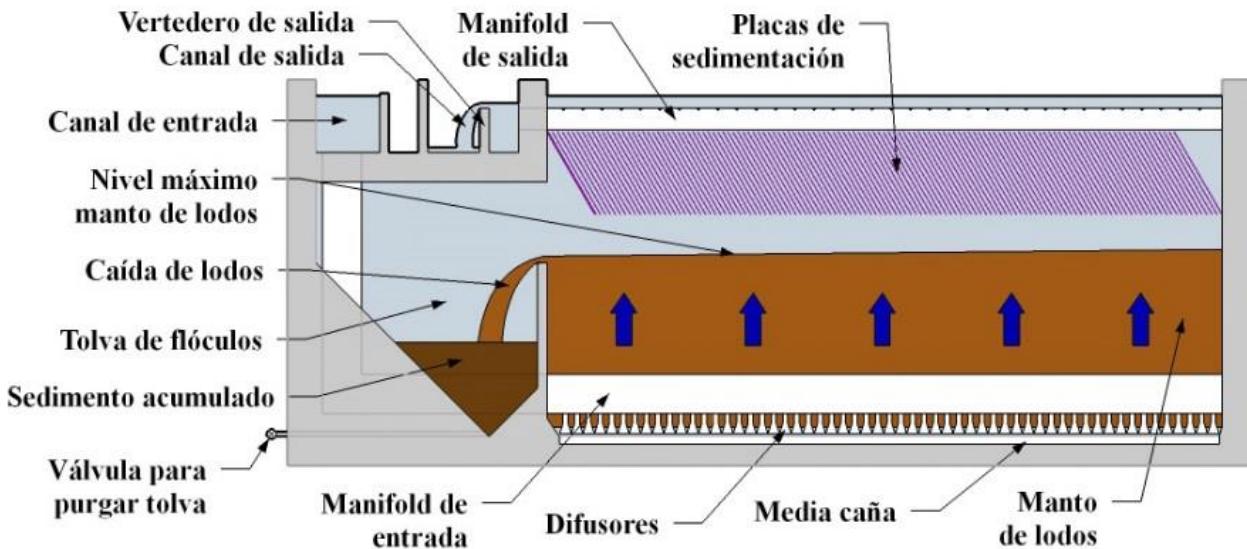


Ilustración 29. Vista lateral de un tanque de sedimentación.

Los tanques cuentan con placas inclinadas que permiten la captura de partículas más finas. Además, los tanques están diseñados de tal manera que los lodos sedimentados no pueden permanecer en el fondo, sino que se re-suspenden para mantener un **manto de lodos** en la parte inferior. El manto de lodos es una suspensión concentrada de sedimento que mejora el rendimiento del tanque y concentra el lodo excedente.

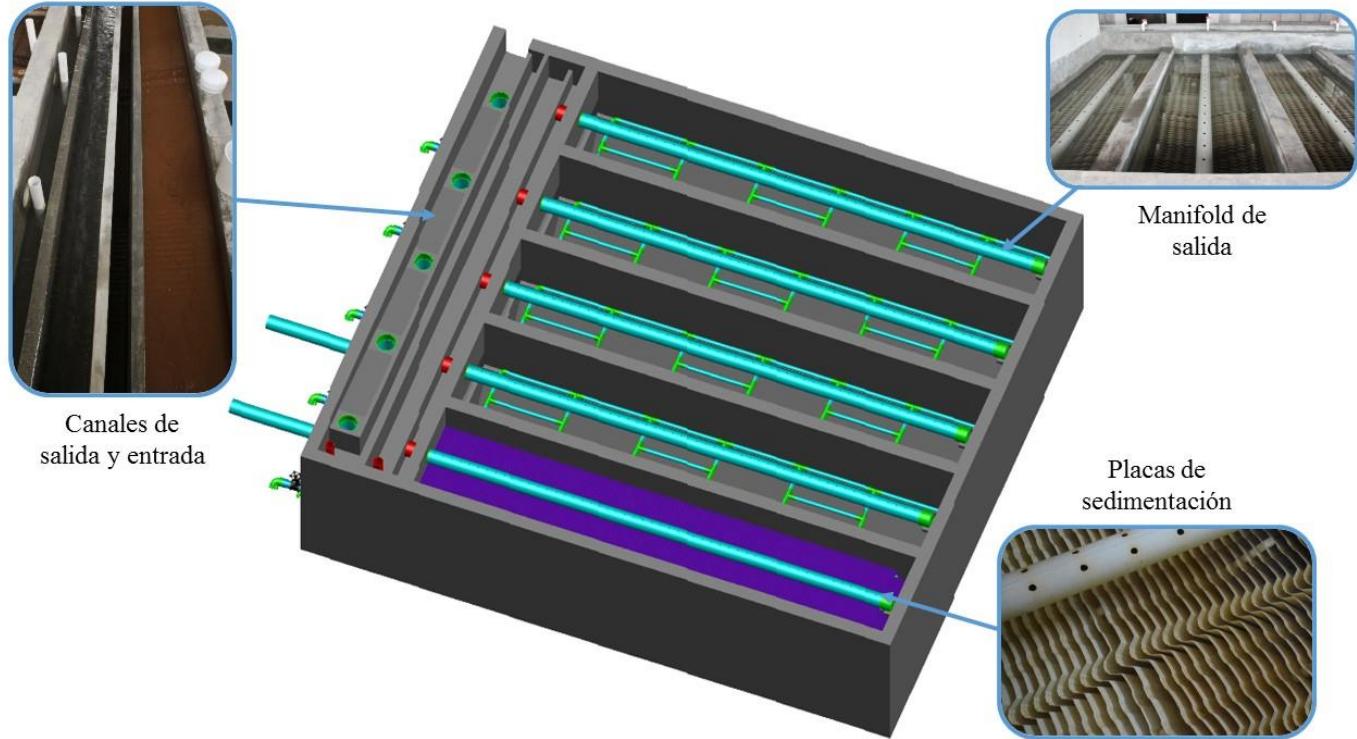


Ilustración 30. Los componentes exteriores de un tanque de sedimentación

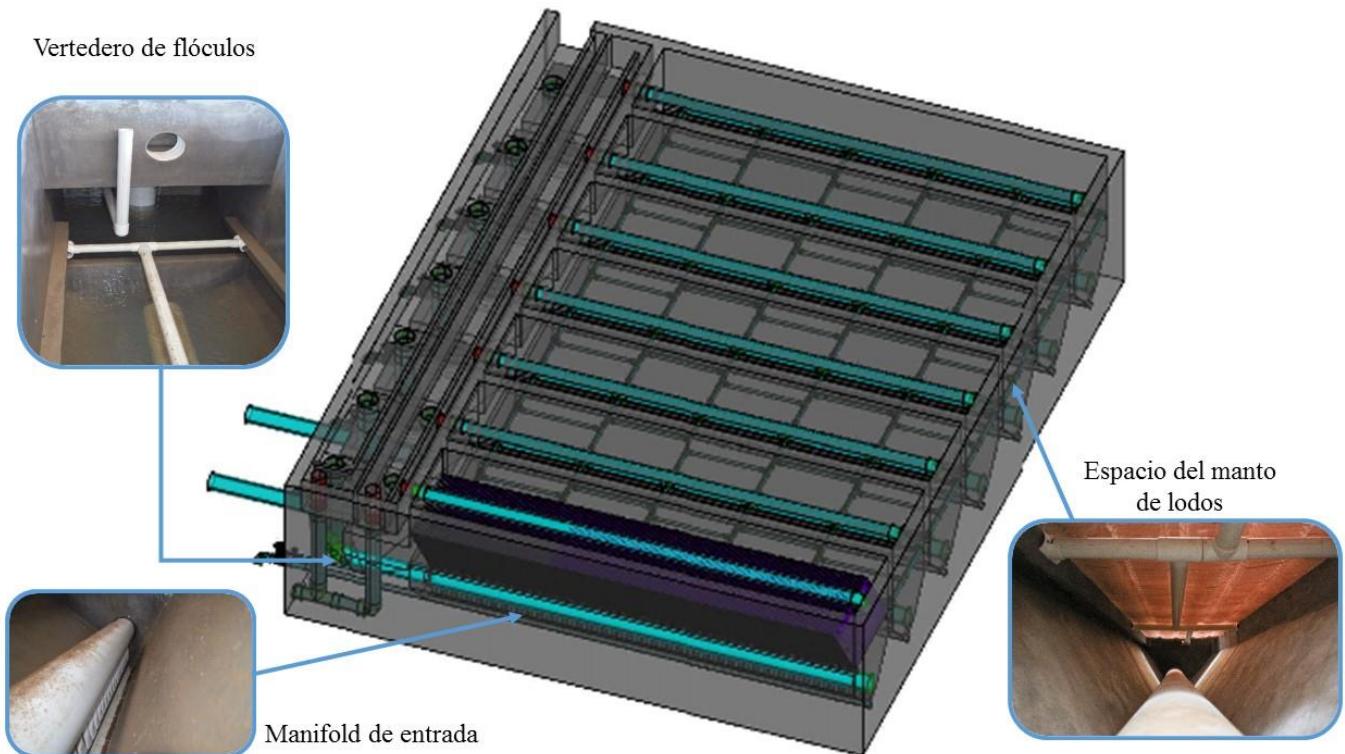


Ilustración 31. Los componentes interiores de un tanque de sedimentación

7.2 – El Manto de Lodos

Los tanques de sedimentación de AquaClara se diseñan con la meta de lograr otro fenómeno físico en la parte inferior del tanque que se llama el manto de lodos. Esta característica del tanque puede mejorar la calidad de agua que produce. El manto de lodos es un lecho denso de flóculos suspendidos en el agua, producto de la acumulación de sólidos captados durante tiempo. El lecho de sedimento funciona como un filtro. Las partículas que entran y pasan por el manto de lodos chocan con las partículas ya suspendidas, y de esta forma las partículas más pequeñas, que quizás no se capten sin la presencia del manto de lodos, permanecen en la parte inferior del tanque. Las placas inclinadas impiden que los sólidos más grandes salgan por arriba.

Las investigaciones del laboratorio han demostrado que se establece una superficie bien definida entre el manto de lodos y el agua más clara que sale por arriba. La suspensión de flóculos y el agua por encima se comportan como dos fluidos distintos. Se mantiene el nivel de la superficie entre el manto de lodos y el agua limpia con el **vertedero de flóculos**, una pared sobre la que los flóculos caen en una tolva cuando alcanzan cierta altura. Los flóculos en el lecho se mantienen suspendidos por los chorros de entrada en el fondo del tanque.

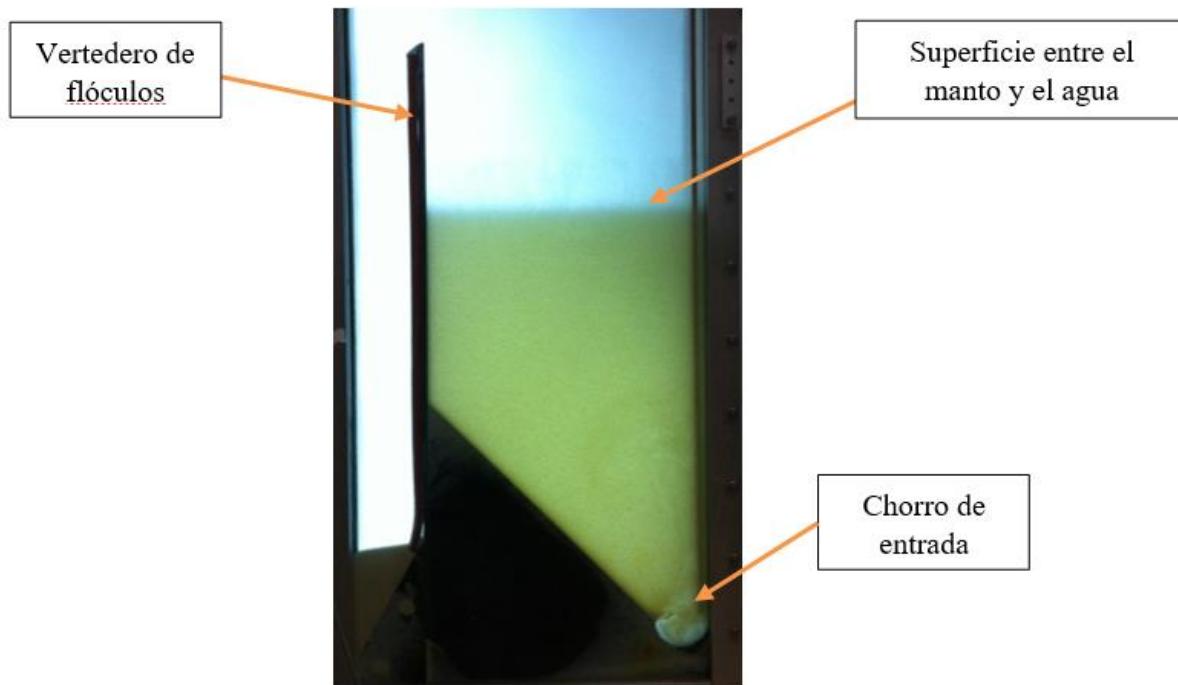


Ilustración 32. Vista frontal del tanque de sedimentación experimental en el laboratorio de AquaClara de la Universidad de Cornell.

7.3 – Recorrido del Agua

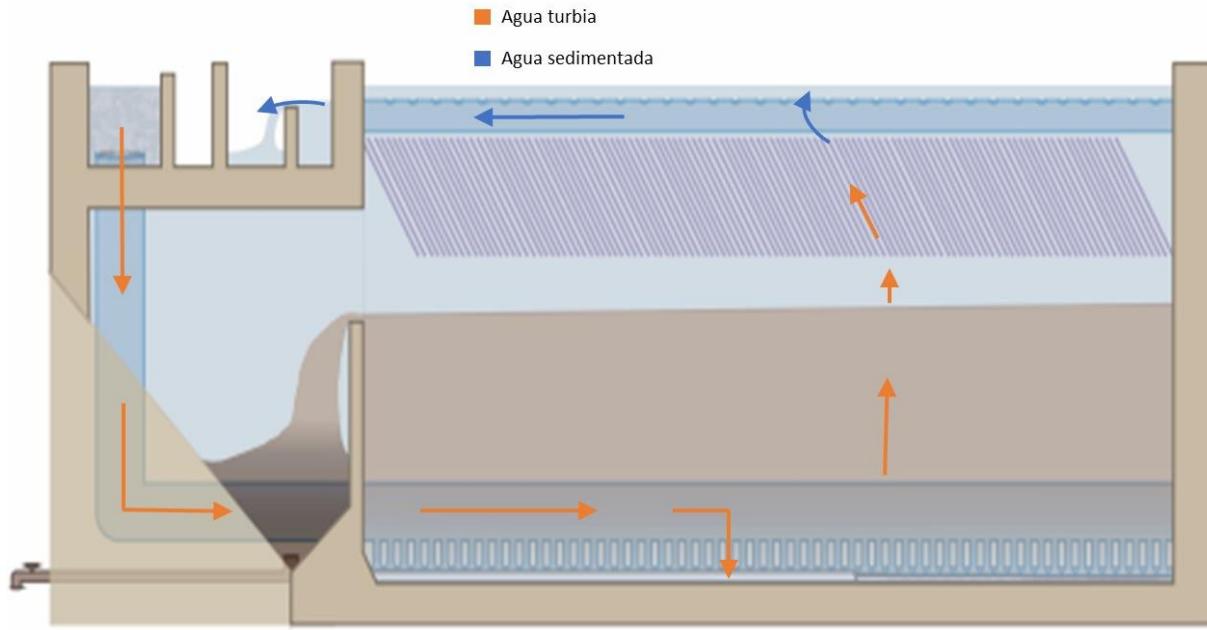


Ilustración 33. El recorrido de agua en el tanque de sedimentación – vista lateral.

Canal distribuidor



Al terminar su recorrido en el floculador, el agua floculada entra en el canal distribuidor de los tanques de sedimentación. De este canal el agua se divide entre los 8 tanques de sedimentación. Hay un vertedero que corre a lo largo del canal que sirve para mantener el nivel de agua en el floculador cuando las entradas a los tanques de sedimentación están cerradas y se está botando agua floculada. El operador haría esto en caso de una falla de dosificación de coagulante hasta que se recupere la buena floculación, por ejemplo.

Manifold distribuidor y los difusores



Un tubo de diámetro 20.3 cm (8.00 pulgadas), que se llama el manifold de entrada, lleva el agua del canal distribuidor a la parte inferior de cada tanque. El agua sale del manifold por debajo a través de una serie de tubos verticales de diámetro 2.54 cm (1.00 pulgadas) que corre a lo largo del tanque. Los extremos inferiores de estos tubos están formados de tal manera que los chorros se unen y resulta un solo chorro de forma lineal. Este sirve para mantener el manto de lodos, re-suspendiendo todas las partículas que se sedimentan y se deslizan por las pendientes del tanque hasta la curva en el fondo.

Este sirve para mantener el manto de lodos, re-suspendiendo todas las partículas que se sedimentan y se deslizan por las pendientes del tanque hasta la curva en el fondo.

Manto de lodos, placas y el tubo recolector



Después de salir del tubo distribuidor, el agua sube lentamente por el manto de lodos y las placas hasta la parte superior del tanque. Sale del tanque, ya limpia, por los orificios del tubo recolector. El tubo recolector lleva el agua al canal de salida, que tiene otro vertedero para mantener el nivel de agua en los tanques. Después de caer por el vertedero de salida, el agua sale por los tubos que la llevan a los filtros de arena.

7.4 – Canales del Tanque de Sedimentación

A un extremo de los tanques de sedimentación hay un sistema de canales de entrada y salida (Ilustración 34). Una pared que corre a lo largo de los canales los divide en dos secciones: el **canal distribuidor** (de entrada) y el **canal recolector** (de salida).

El efluente del floculador se distribuye entre los tanques de sedimentación a través del canal de entrada. Este está dividido en dos secciones por un vertedero: la primera donde están ubicadas las entradas a los tanques de sedimentación, y la segunda que sólo sirve para botar agua en el caso de una falla de tratamiento.

Primera sección canal de entrada



La primera sección del canal se diseña para tener una velocidad máxima lo suficiente baja para mantener una distribución uniforme de flujo a los varios tanques de sedimentación. Nuevas pruebas en los laboratorios de Cornell demuestran que la rotura de los flóculos en el canal no tiene un efecto significante en el rendimiento del tanque de sedimentación. Los flóculos, aunque sean muy pequeños, con una velocidad mayor que la velocidad de captura serán capturados por las placas de sedimentación. También se diseña con una velocidad lo suficiente alta que los flóculos no se sedimentan en el canal. Otras restricciones en el dimensionamiento del canal son:

- Tiene que ser lo suficiente ancho para los tubos que lo conectan a los tanques de sedimentación
- Tiene que tener profundidad suficiente para apoyar los tubos recolectores de salida de los tanques de sedimentación (hay una sola losa para todos los canales)
- No puede ser tan profundo que la construcción y el acceso se ponen difíciles

La consideración de la uniformidad de la distribución del flujo entre los tanques de sedimentación se toma en cuenta fijando la pérdida de carga máxima, ΔH , en este canal a no más que diez por ciento de la pérdida de carga total a través de un tanque. Con esta pérdida de carga, el ancho se calcula por:

$$W = \frac{Q}{H - \Delta H} \sqrt{\frac{1 + f \frac{L}{4R_k}}{2g\Delta H}}$$

Donde:

Q = el caudal de la planta = 48.0 L/s

H = el nivel máximo de agua en el canal de entrada = HW.SedInletChannelMax

ΔH = la pérdida de carga máxima en el canal de entrada = 4.51 mm

L = el largo del canal de entrada = 9.68 m

f = el coeficiente de fricción para un canal rectangular*

R_k = el número de Reynolds para un canal rectangular*

*Los valores de los coeficientes fluidos varían con las dimensiones del canal, entonces hay que calcular este ancho iterativamente actualizando los coeficientes hasta llegar a un valor constante de este ancho.

Segunda sección canal de entrada

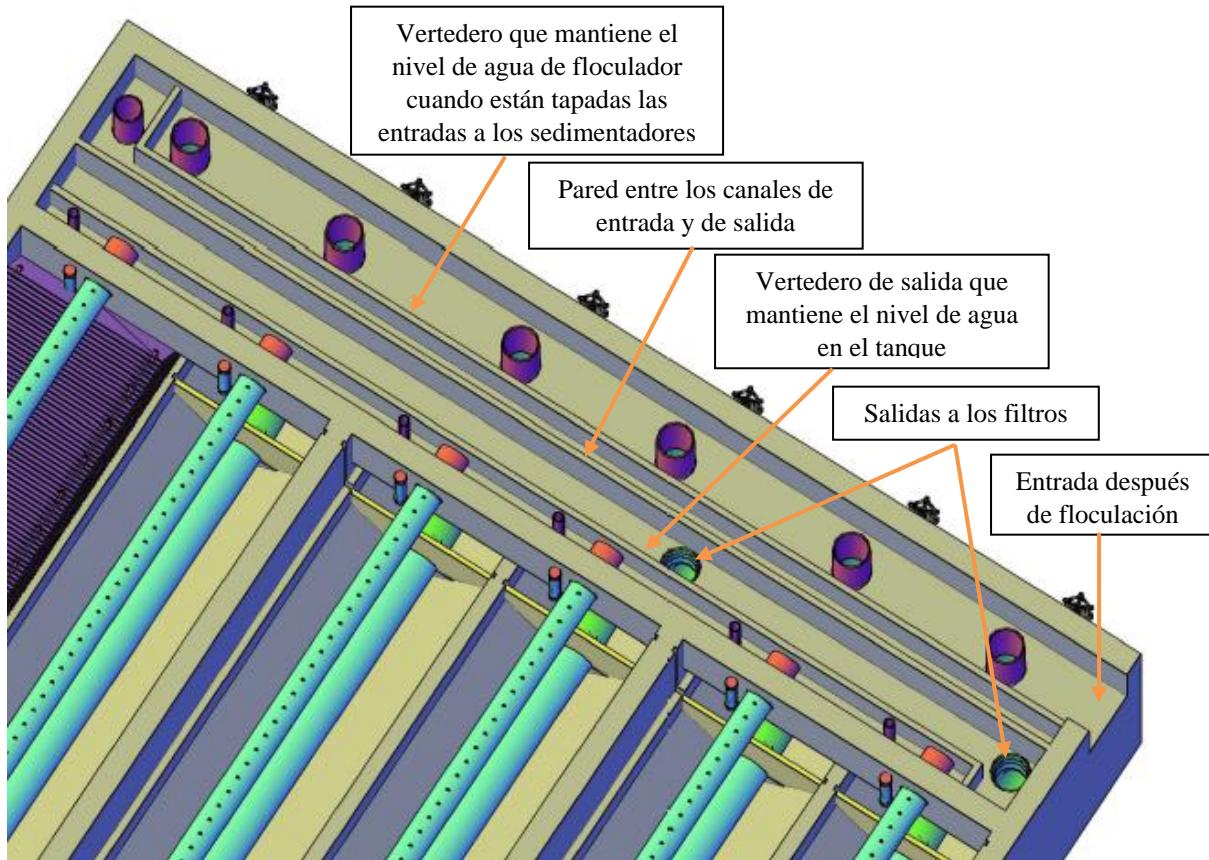
El propósito de esta segunda sección es botar agua en el caso de una falla de tratamiento, y mantener el nivel de agua en el floculador para que se pueda recuperar la floculación sin que agua sucia salga de los tanques de sedimentación. La altura del vertedero que separa las dos secciones está justa arriba del nivel máximo de agua en la primera sección según el caudal de diseño, para que no se llene con agua sucia durante la operación normal.

Canal de salida



Los tubos recolectores entregan el agua limpia a la primera sección del canal de salida. Este canal tiene otro vertedero que mantiene el nivel de agua en los tanques. Ya que el agua no está fluyendo a lo largo de la primera parte del canal, así que no hay pérdida de carga, la única restricción con respecto al ancho es que se necesita poder colocar y quitar los tapones de los tubos recolectores. En el otro lado del vertedero, el ancho se basa en:

- una pérdida de carga máxima
- un ancho mínimo para la facilidad de construcción
- el diámetro de la tubería que sale hacia los filtros



Todos los accesorios de PVC en rojo son desmontables, incluso los niples que tapan las entradas de las cámaras, los tapones en las salidas de los tubos recolectores, el niple que tapa el desagüe del canal de entrada, y los tapones de los tubos de limpieza de la superficie de los tanques.

Ilustración 34. Canales de los tanques de sedimentación.

Tabla 11. Datos de los canales de los tanques de sedimentación

| | |
|--|---------|
| Longitud | 9.68 m |
| Ancho – Entrada, primera sección (la más pegada al pasillo) | 39.7 cm |
| Ancho – Entrada, segunda sección | 15.0 cm |
| Ancho – Entrada con las dos secciones y el vertedero | 59.7 cm |
| Ancho – Salida, primera sección (la más pegada al tanque) | 15.0 cm |
| Ancho – Salida, segunda sección | 28.7 cm |
| Ancho – Salida con las dos secciones | 48.7 cm |
| Altura total, medida de la losa a las paredes exteriores | 60.0 cm |
| Altura del vertedero – canal de entrada | 52.0 cm |
| Altura del vertedero – canal de salida | 43.5 cm |
| Profundidad máxima del agua durante la operación normal – canal de entrada | 50.0 cm |
| Profundidad máxima del agua – canal de salida | 45.4 cm |
| Incremento de la pendiente entre cada dos entradas – canal de entrada | 5.92 cm |
| Altura total de la pendiente, medida de la losa a la parte superior | 41.5 cm |

7.5 – *Manifold Distribuidor*

El agua entra en cada tanque de sedimentación a través de un manifold distribuidor de 20.3 cm (8.00 pulgadas). Los objetivos en el diseño de este tubo son:

- 1) Que el agua se distribuya de manera uniforme a lo largo del tanque.
- 2) Que los lodos no se sedimenten dentro del tubo.
- 3) Que se cree un chorro lineal que corre a lo largo del tanque para resuspender los lodos sedimentados, así manteniendo en suspensión el manto de lodos.
- 4) Que se eliminen las corrientes horizontales en el tanque, las cuales provocan una circulación que lleva el sedimento a la superficie en un extremo.
- 5) Que no se quiebren los flóculos con zonas de muy alta disipación de energía en las salidas.



El agua entra en el tubo distribuidor desde el canal de entrada a través de una camisa fundida en la losa del canal. De allí baja hacia el fondo del tanque por un tubo vertical dentro de la tolva de flóculos que se conecta al tubo distribuidor horizontal por un codo de 90 grados fundido en la pendiente de la tolva.

Difusores



Cada agujero de salida en la parte inferior del manifold de entrada cuenta con un tubo de 2.54 cm (1.00 pulgadas) que dirige el chorro de agua para abajo. El extremo inferior de los tubos está estirado de tal manera que la pared del tubo pega en los dos tubos adyacentes. El resultado es un chorro lineal que corre a lo largo del tanque para re-suspender los flóculos que se sedimentan en cualquier sección transversal. Estos tubos “difusores” también tienen otro propósito - el de eliminar la velocidad horizontal del agua que sale del tubo distribuidor, así cumpliendo el quinto objetivo del diseño del tubo distribuidor listado anteriormente.

La parte horizontal del tubo distribuidor está apoyado en cada extremo de tal manera que los extremos de difusores alcanzan la altura del borde de la curva, pero que no se pegan al fondo.

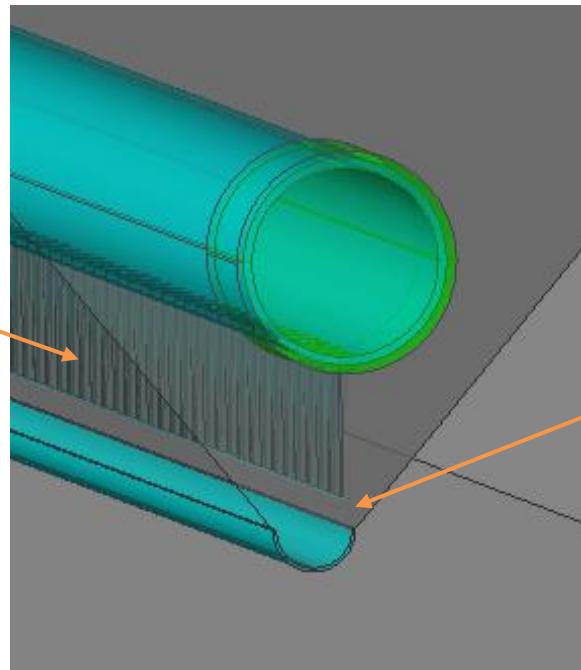


Ilustración 35. Corte transversal de la parte inferior del tanque de sedimentación.

Tabla 12. Datos del manifold distribuidor del tanque de sedimentación

| | |
|---|---------------------------------|
| Diámetro nominal del manifold | 20.3 cm (8.00 pulgadas), SDR 41 |
| Diámetro de los agujeros | 3.17 cm (1.25 pulgadas) |
| Número de agujeros y difusores | 93 |
| Distancia entre agujeros (centro a centro) | 6.00 cm |
| Longitud de la parte desmontable del manifold distribuidor | 5.64 m |
| Diámetro nominal de los difusores | 2.54 cm (1.00 pulgadas), SDR 26 |
| Longitud de los difusores | 15.0 cm |
| Ancho interno de la salida formada de los difusores | 3.17 mm |
| Tasa máxima de disipación de energía en la salida de los difusores | 130 mW/kg |
| Brecha vertical entre la orilla de la media caña y la salida de los difusores | 3.00 cm |

7.6 – Válvulas de Drenaje

La cámara de sedimentación lleva dos válvulas para purgar los lodos y vaciar los tanques para limpieza y mantenimiento. La que se utiliza más durante la operación normal es la válvula de diámetro 2.54 cm (1.00 pulgadas) que sale de la tolva de flóculos. Esta válvula se usa solamente para sacar el lodo acumulado de la tolva. Para vaciar el tanque completamente para limpieza y mantenimiento, se usa la válvula inferior de diámetro 7.62 cm (3.00 pulgadas).

7.7 – Placas de Sedimentación



Los módulos de placas se montan en la parte superior de los tanques de sedimentación para reducir el tamaño de las partículas más pequeñas que se pueden capturar. Aumentan el área de la superficie en la que las partículas pueden pegar y ser captadas. Es decir, las placas reducen la distancia que una partícula suspendida entre ellas tiene que caerse antes de pegar en una superficie sólida (Ilustración 36).

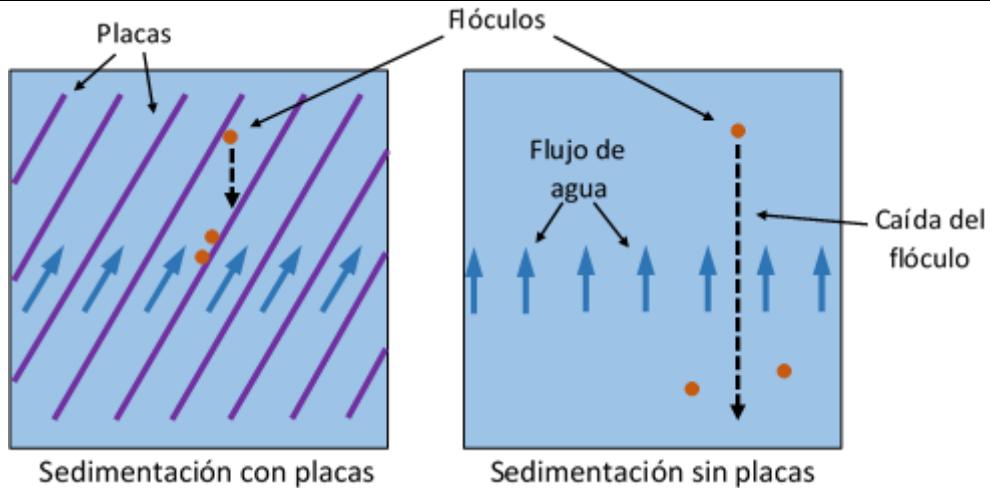


Ilustración 36. Las placas de sedimentación reducen la caída del flóculo a una superficie sólida. En los esquemas se ve la diferencia entre la distancia que una partícula tiene que caer en el mismo lapso de tiempo con placas y sin placas.

El ancho de las placas se define según las especificaciones del proveedor en que se fabrican. El largo de las placas, redondeado al próximo incremento de 10 cm para la facilidad de fabricación, se calcula por:

$$L_{Placa} = \frac{S_{Placa} \left(\frac{V_{Sed}}{V_{Captura}} - 1 \right) + T_{Placa} \frac{V_{Sed}}{V_{Captura}}}{\sin \alpha_{Placa} \cos \alpha_{Placa}}$$

Donde:

S_{Placa} = la separación entre las placas = 2.50 cm

V_{Sed} = la velocidad ascendente en el sedimentador = 1.00 mm/s

$V_{Captura}$ = la velocidad de captura = 120 microm/s

T_{Placa} = el espesor de las placas = 2.00 mm

α_{Placa} = el ángulo de inclinación de las placas = 60 degrees

El número de placas por tanque se calcula según el largo activo del tanque:

$$N_{Placas} = \frac{L_{SedActivo} \sin \alpha_{Placa} - T_{Placa}}{S_{Placa} + T_{Placa}}$$

Donde:

$L_{SedActivo}$ = el largo activo del sedimentador = 5.36 m

El número de placas por módulo se define según el número total de placas por tanque para que haya un número entero de módulos por tanque, con un número mínimo de 8 placas por módulo.

Tabla 13. Datos de las placas de sedimentación

| | |
|---|------------------------------------|
| Ancho de las placas | 1.06 m |
| Longitud de las placas | 50.0 cm |
| Separación perpendicular entre las placas | 2.50 cm |
| Ángulo de inclinación de las placas | 60 degrees |
| Número de placas en cada módulo | 8 |
| Número de módulos en cada tanque | 22 |
| Número de placas en cada tanque | 176 |
| Número de placas total en la planta | 1408 |
| Conectores de los módulos | 1.27 cm (0.500 pulgadas), SDR 13.5 |
| Separadores de los módulos | 1.90 cm (0.750 pulgadas), SDR 17 |

7.8 – Tubos Recolectores



Arriba de las placas el agua sale por los agujeros de un tubo perforado que corre a lo largo del tanque, con la fila de orificios en la parte superior. Los orificios provocan una pérdida de carga suficiente para lograr una distribución de caudal uniforme, tanto a lo largo de cada tanque como entre los 8 tanques. La meta es que cada recorrido del agua, entre la entrada en el canal distribuidor hasta el canal de salida, tiene una pérdida de carga parecida a los demás. Esto garantiza que los caudales en cada recorrido se

parezcan también. Los 4.05 cm de pérdida de carga que provocan los orificios del tubo recolector dominan la pérdida total, y así controlan la distribución de caudal. La pérdida de carga en los orificios tiene la ventaja adicional de crear un sobrenadante sobre el tubo recolector que impide que material flotante en la superficie salga del tanque por el tubo.

El diámetro del tubo recolector se diseña como manifold para que el flujo sea constante a lo largo del tubo, que el radio del flujo mínimo al flujo máximo a través de los orificios no baje menos de 0.800:

$$\frac{Q_{Mín}}{Q_{Máx}} > \Pi_Q$$

Donde:

$Q_{Mín}$ = el caudal mínimo que pase por un orificio del tubo recolector

$Q_{Máx}$ = el caudal máximo que pase por un orificio del tubo recolector

Π_Q = el radio mínimo de caudal a través de los orificios del tubo recolector = 0.800

Los orificios en el tubo recolector se diseñan para provocar aproximadamente 4.00 cm de pérdida de carga, tomando en cuenta el largo del tubo, una separación entre los orificios de aproximadamente 10.0 cm y los diámetros de las brocas comúnmente disponibles. Los pasos del diseño son:

1. Calcular el largo útil del tubo, tomando en cuenta su entrada al tanque
2. Estimar el número de orificios con una separación estimada de 10.0 cm
3. Estimar el caudal por orificio dado el número de orificios estimado
4. Calcular el diámetro querido de los orificios dado el caudal estimado por:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{Q_{Orificio}}{\Pi_{VC} \sqrt{2g} H_{Orificio}}}$$

Donde:

$Q_{Orificio}$ = el caudal estimado por orificio

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para el orificio = 0.630

$H_{Orificio}$ = la pérdida de carga asignada por los orificios = 4.00 cm

5. Definir el diámetro final de los orificios según las brocas comúnmente disponibles
6. Calcular el caudal real por orificio según el diámetro final
7. Calcular la separación y el número final de los orificios según el caudal real por orificio

Tabla 14. Datos de los tubos recolectores de los tanques de sedimentación

| | |
|--|---------------------------------|
| Diámetro nominal del tubo | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 41 |
| Longitud de cada tubo recolector | 5.69 m |
| Número de agujeros en cada tubo recolector | 54 |
| Separación entre agujeros | 10.5 cm |
| Diámetro de los agujeros | 1.59 cm (0.625 pulgadas) |
| Pérdida de carga por los agujeros | 4.05 cm |

7.9 – Datos Generales

Tabla 15. Parámetros hidráulicos de los tanques de sedimentación

| | |
|--|--------------|
| Caudal de diseño de cada tanque de sedimentación | 6.00 L/s |
| Velocidad de captura de diseño | 120 microm/s |
| Velocidad de captura real | 107 microm/s |
| Velocidad ascendente de diseño | 1.00 mm/s |
| Velocidad ascendente real | 992 microm/s |
| Tiempo de retención estimado, con el caudal máximo de diseño | 24 min |

Tabla 16. Datos constructivos generales de los tanques de sedimentación

| | |
|---|------------|
| Número de tanques de sedimentación | 8 |
| Ancho de cada tanque | 1.06 m |
| Longitud de la parte activa de cada tanque (sin incluir el espacio debajo de los canales) | 5.71 m |
| Longitud total de cada tanque, interior (sin incluir el grosor de las paredes) | 6.99 m |
| Altura total del tanque, medida de la orilla de la media caña | 1.80 m |
| Altura de las pendientes laterales, medida de la orilla de la media caña | 58.3 cm |
| Altura del vertedero de flóculos, medida de la orilla de la media caña | 83.3 cm |
| Altura de la parte inferior de las placas, de la orilla de la media caña | 98.1 cm |
| Profundidad del agua, medida de la orilla de la media caña | 1.69 m |
| Ángulo de inclinación de las pendientes laterales | 50 degrees |
| Ángulo mínimo de inclinación de las pendientes de la tolva de flóculos (la pendiente menos inclinada de las cuatro) | 38 degrees |

8. Filtración Rápida con Arena

8.1 – Propósito y Descripción

Como proceso final en la remoción de sólidos, este diseño utiliza filtración rápida con arena en la forma del FRAMCA (Filtro Rápido de Arena en Múltiples Capas) de AguaClara. La filtración rápida baja aún más la turbiedad del agua después de sedimentación, y elimina los microorganismos nocivos que son resistentes al cloro. El proceso consiste en pasar el agua sedimentada por un lecho de arena, con velocidad suficiente que las partículas puedan entrar en la arena y no colarse en la superficie.

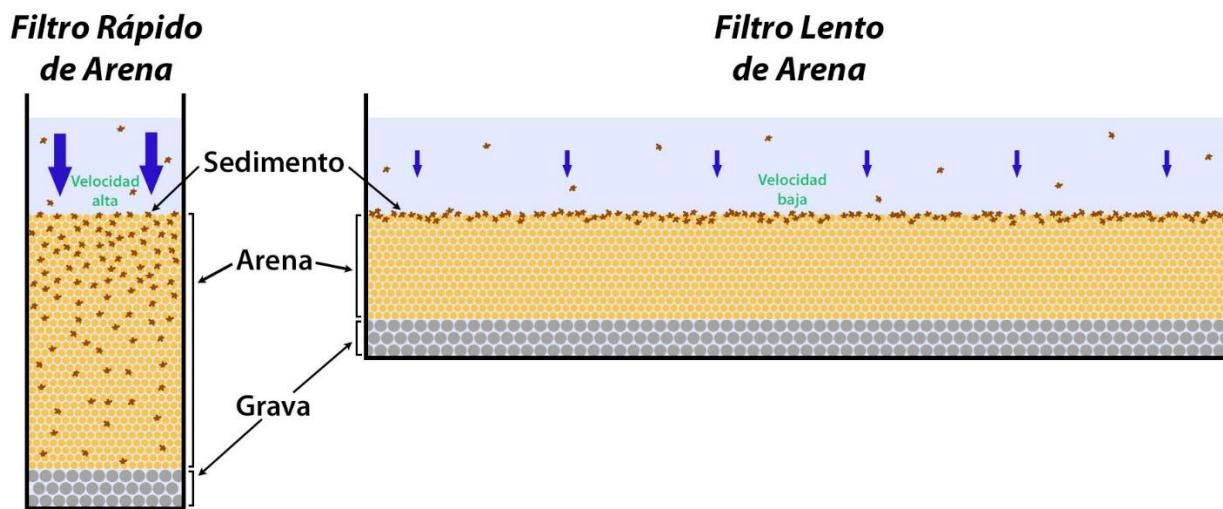


Ilustración 37. El agua pasa con mayor velocidad por un filtro rápido de arena que un filtro lento. Por lo tanto el sedimento se profundiza en todo el lecho de arena en vez de colarse en la superficie.

En vez de pasar agua en una sola dirección, el FRAMCA inyecta el agua a cuatro niveles distintos y la recolecta de tres puntos entre ellos, de tal manera que se divide el flujo entre seis capas de arena (Ilustración 38). Esta configuración permite el retrolavado sin bombas. El ciclo de retrolavado necesita una velocidad de agua aproximadamente seis veces más alta que el ciclo de filtración para fluidificar la arena y purgar el sedimento acumulado. En muchos sistemas convencionales de filtros de arena hidráulicos (que funcionan sólo con la fuerza de gravedad, sin energía eléctrica) se usa una batería de filtros paralelos para que los caudales de seis filtros activos en el ciclo de filtración se puedan combinar para retrolavar uno a la vez.

El FRAMCA de AguaClara, por otro lado, efectivamente pone los filtros de esta batería uno encima de otro, en seis capas horizontales, así conservando el área plana. De esta manera, todo el caudal que normalmente se divide entre las entradas de las seis capas en el ciclo de filtración, se concentra en una sola entrada inferior en el ciclo de retrolavado (Ilustración 38).

Ciclo de Filtración Ciclo de Retrolavado

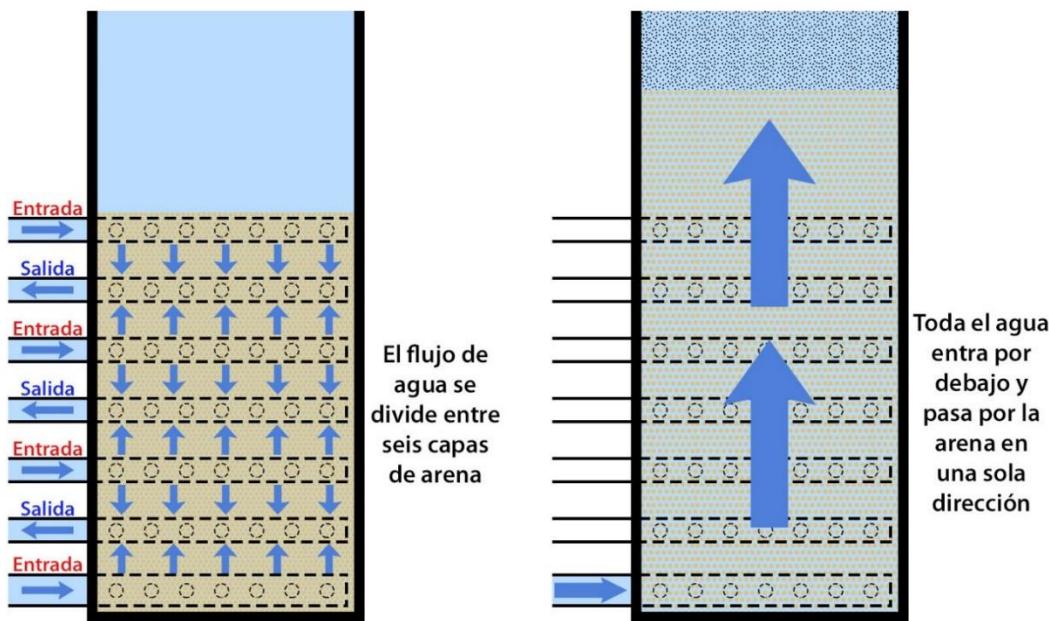


Ilustración 38. Concepto de los recorridos de agua en la arena del FRAMCA durante el ciclo de filtración y el ciclo de retrolavado.

Comparado con un filtro rápido convencional, el FRAMCA:

- No requiere de bombas para el retrolavado.
- Ocupa seis veces menos área para tratar el mismo caudal.
- Gasta menos agua para el retrolavado.
- Se retrolava con agua sedimentada, no con agua filtrada. De esta manera se puede usar la misma agua que está entrando al filtro para retrolavarlo. No hay necesidad de tanques adicionales para almacenar agua filtrada.
- Ingresa y egresa el agua a través de manifolds dentro del lecho de arena.
- Filtra el agua por una capa de arena más delgada.

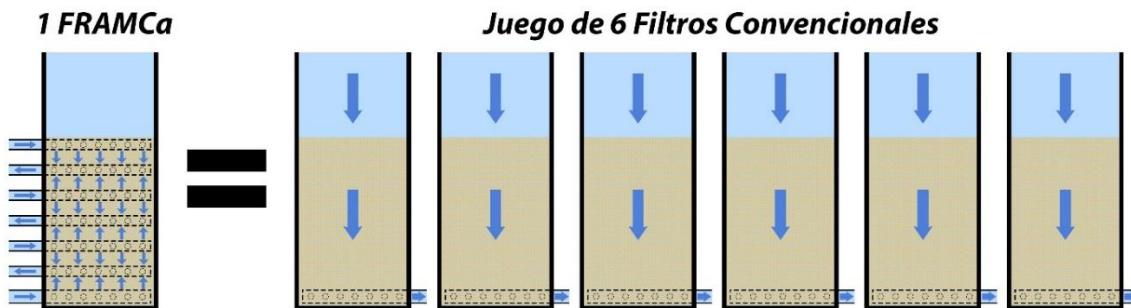
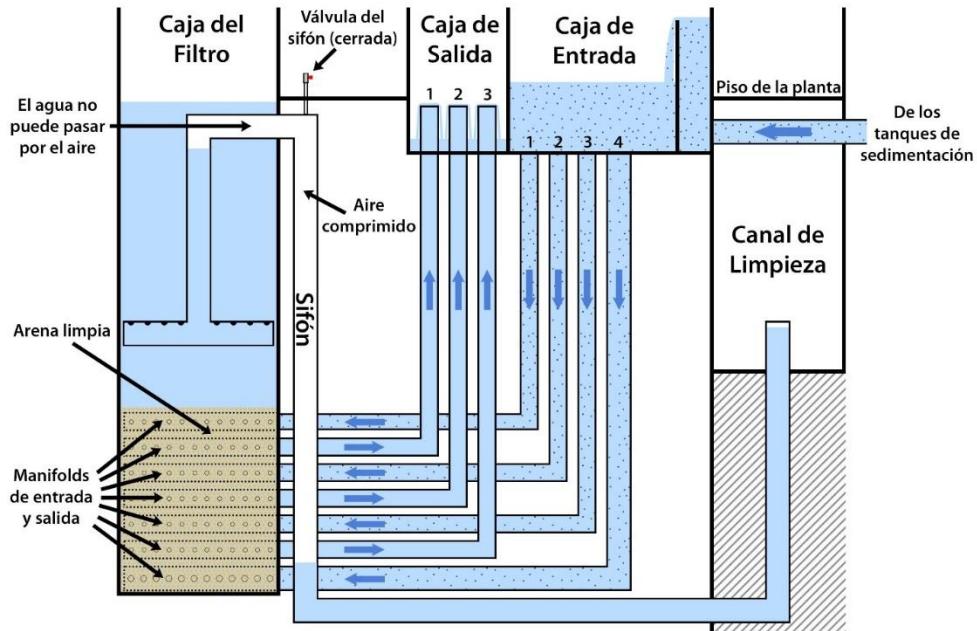


Ilustración 39. El FRAMCA, por su configuración en seis capas, ocupa la misma área que seis filtros convencionales.

Ciclo de Filtración - Inicio



Ciclo de Retrolavado

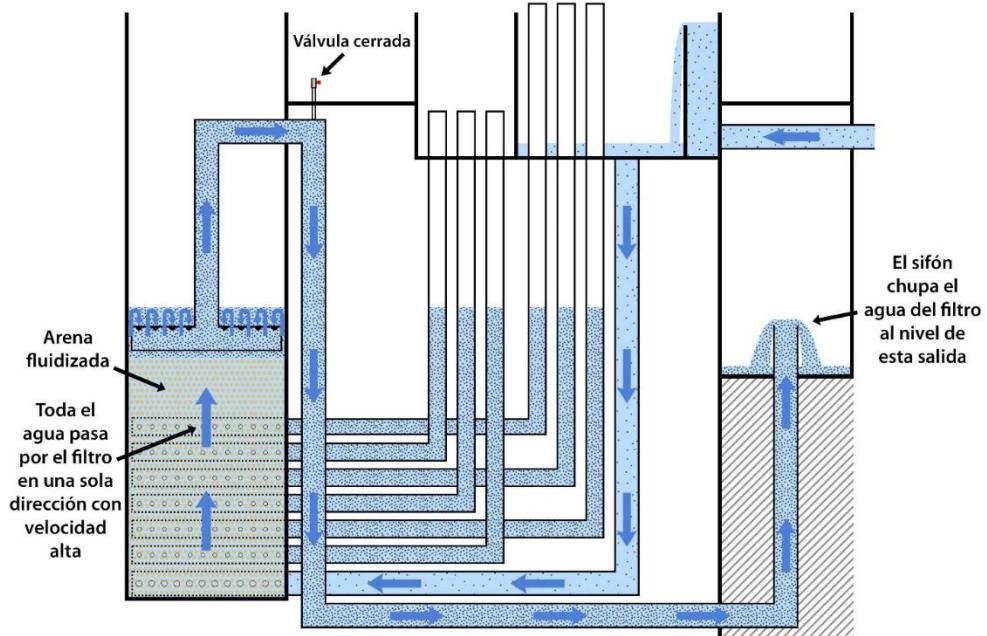


Ilustración 40. El FRAMCA de AguaClara en los dos modos principales de operación: el ciclo de filtración y el ciclo de retrolavado.

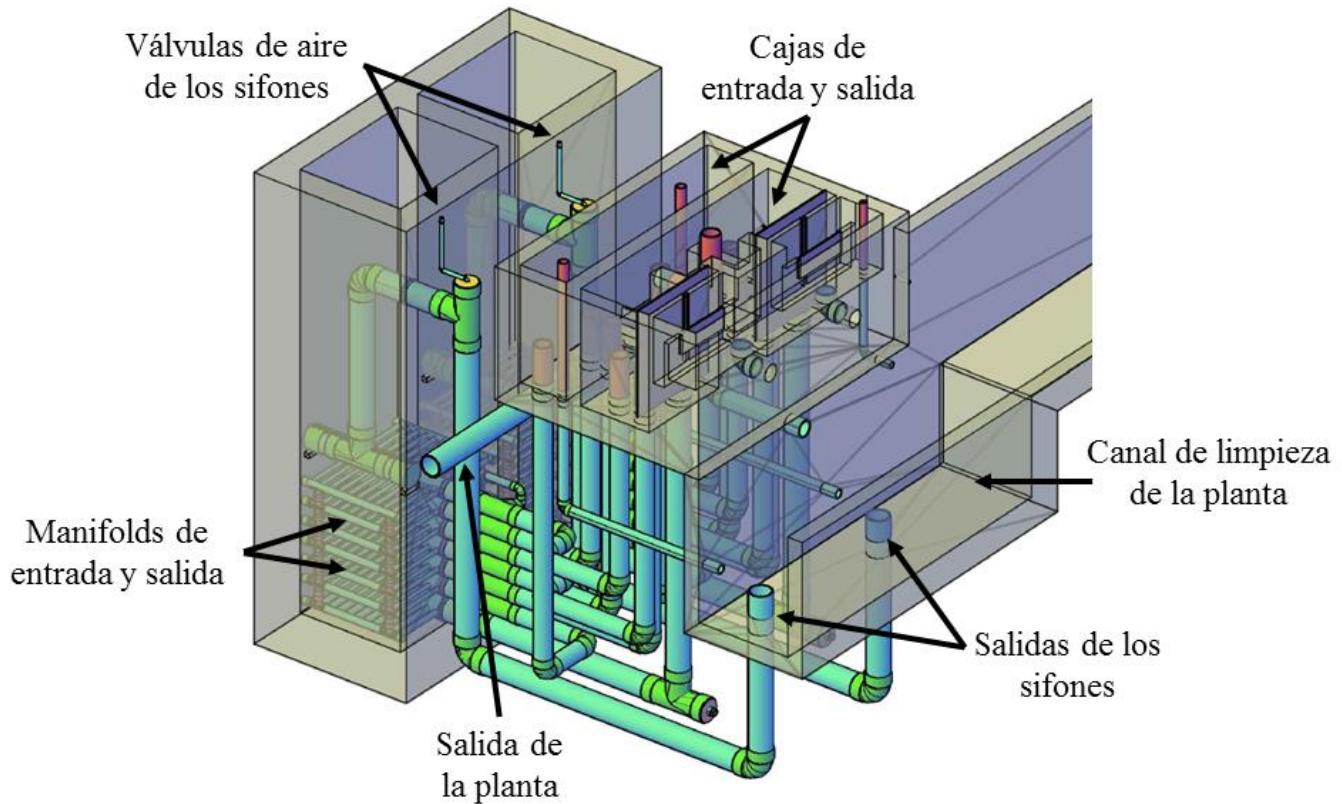


Ilustración 41. Vista isométrica del FRAMCA y el canal de limpieza con paredes transparentes.

8.2 – Distribución del Flujo

El buen funcionamiento del filtro depende de una buena distribución del agua por todas partes del lecho de arena, tanto durante la filtración normal como en el retrolavado. Las restricciones de diseño durante estos dos regímenes son:

Filtración Normal

- La pérdida de carga por una capa de arena es significativamente mayor que la pérdida por la recuperación de la presión en la tubería, que el radio del flujo por el camino largo sobre el flujo por el camino corto no sea menor que 0.850
- La pérdida de carga por las ranuras toma en cuenta la obstrucción de las ranuras por la arena

Retrolavado

- Los orificios y las ranuras, en vez de la arena, proveen la pérdida uniformisante durante el retrolavado
- La pérdida de carga por los orificios o las ranuras es significativamente mayor que las pérdidas por la recuperación de presión en los manifolds – los manifolds necesitan mayor área un sus troncos que el área colectivo de sus puertos

Estas restricciones, conjuntamente con las restricciones constructivas de no usar tubería mayor que 20.3 cm (8.00 pulgadas) de diámetro en la línea de retrolavado y que 15.2 cm (6.00 pulgadas) de diámetro en la demás tubería, definen el caudal máximo de un filtro. Las velocidades máximas y los caudales máximos que puede haber en los troncos durante la filtración y el retrolavado son:

Filtración Normal

$$V_{MáxFi} = \sqrt{2g(HL_{Capa}(1 - \Pi_Q^2) - PR_{Est})}$$

$$Q_{MáxFi} = \frac{\pi D_{MáxFi}^2}{4} V_{MáxFi} \frac{N_{Capa}}{2}$$

Donde:

HL_{Capa} = la pérdida de carga mínima por una capa de arena limpia (véase Sección 8.4)

Π_Q = el radio mínimo del flujo por el camino largo sobre el flujo por el camino corto = 0.850

PR_{Est} = la recuperación de presión estimada en un ramal = 0.00800

$D_{MáxFi}$ = el diámetro máximo nominal del tronco superior = 15.2 cm (6.00 pulgadas)

N_{Capa} = el número de capas de arena = 6

Retrolavado

$$V_{MáxRe} = \sqrt{2g(HL_{Re}(1 - \Pi_Q^2) - PR_{Est})}$$

$$Q_{MáxRe} = \frac{\pi D_{MáxRe}^2}{4} V_{MáxRe}$$

Donde:

HL_{Re} = la pérdida de carga estimada por los orificios de entrada durante el retrolavado = 10.0 cm

Π_Q = el radio mínimo del flujo por el camino largo sobre el flujo por el camino corto = 0.850

PR_{Est} = la recuperación de presión estimada en un ramal = 0.00800

$D_{MáxRe}$ = el diámetro máximo nominal del tronco inferior = 20.3 cm (8.00 pulgadas)

El caudal máximo por filtro se define como el menor de los dos caudales máximos bajo las restricciones de la distribución del flujo. El número total de los filtros se define en consecuencia para no sobrepasar de este límite:

$$N_{Fi} = ceil\left(\frac{Q_{Planta}}{\min(Q_{MáxFi}, Q_{MáxRe})}\right)$$

8.3 – Dimensionamiento del Filtro

Una vez definido el número de filtros, se calcula el caudal verdadero por filtro y se puede calcular el área superficial activa por filtro:

$$A_{FiActivo} = \frac{Q_{Fi}/N_{Capa}}{V_{Fi}}$$

Donde:

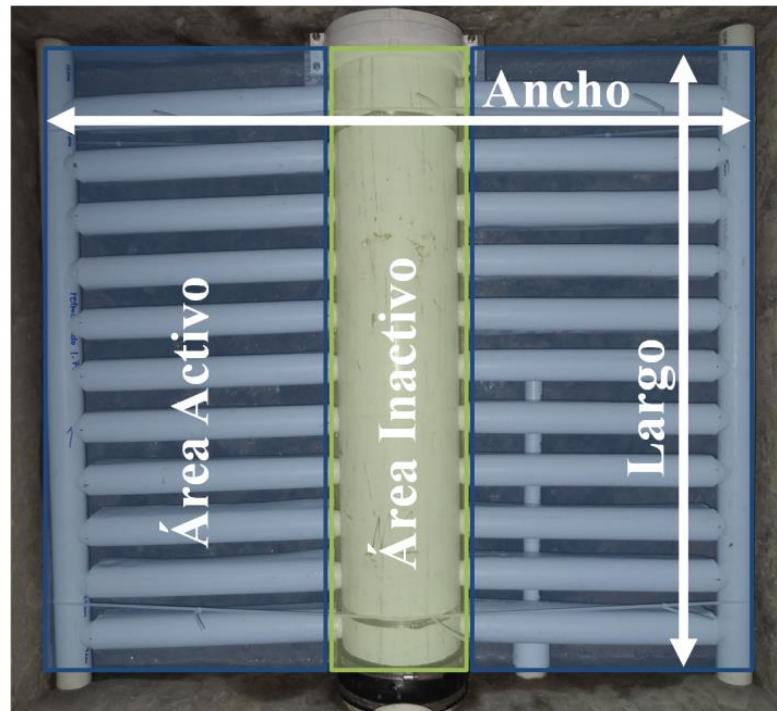
Q_{Fi} = el caudal por filtro = 16.0 L/s

N_{Capa} = el número de capas por filtro = 6

V_{Fi} = la velocidad de aproximación de filtración por capa = 1.83 mm/s

La definición del largo y del ancho del filtro es flexible hasta un cierto punto, siempre tomando en cuenta varias consideraciones constructivas y geometrías. En la herramienta de diseño se definen por las restricciones geométricas de la tubería de entrada y salida que lleva y trae el agua de la caja de entrada a la caja del filtro y de vuelta a la caja de salida. Las dimensiones de los accesorios de PVC para esta tubería que se funden en estas cajas y las tolerancias dejadas alrededor de ellos establecen un ancho mínimo para la caja del filtro, en este caso un ancho mínimo de 1.26 m.

Con este ancho mínimo, se estima el largo de la caja del filtro para poder definir el número de ramales por cada módulo de entrada y salida con una separación entre ramales de 10.0 cm. Una vez definido el número de ramales, se definen el largo verdadero y luego el ancho verdadero del filtro. Siempre se toma en cuenta consideraciones geométricas para la fabricación de los módulos y su montaje en la caja del filtro. Además, el ancho del tronco de retrolavado no contribuirá al área activo:



$$\text{Área}_{Activo} = \text{Largo}_{Activo} \times \text{Ancho}_{Activo}$$

$$\text{Ancho}_{verdadero} = \text{Ancho}_{Activo} + D_{Tronco}$$

8.4 – Arena

Los filtros rápidos de arena utilizan un tipo específico de arena, y aún más el FRAMCA. A través de la vida del filtro, la arena tiene la tendencia de estratificarse, con los granos mayores cayendo por el fondo del filtro y los granos mayores subiendo por la parte superior. En el FRAMCA, ya que es un filtro en múltiples capas o un filtro apilado, es crítico que la arena en cada capa sea igual – que no haya estratificación de ella y por consiguiente que la arena en todo el filtro sea bien uniforme. El diámetro de la arena se caracteriza por el **diámetro efectivo** y la uniformidad por el **coeficiente de uniformidad**, los dos definidos abajo.

Tabla 17. Datos de la arena del FRAMCA

| Parámetro | Valor | Descripción |
|--|---------------------------------|--|
| Diámetro efectivo (D_{10}) | 500 microm (0.0197 pulgadas) | El tamaño de la malla que sólo 10% de la masa de una muestra pasa cuando se tamiza. Mayor diámetro haría más difícil la fluidización de la arena (necesitaría más velocidad). Menor diámetro significa más pérdida de carga y posibles fugas de arena. |
| Coeficiente de uniformidad (D_{60}/D_{10}) | < 1.65 | La medida de la uniformidad en el tamaño de los granos de la arena. Más alto significa que los granos de arena son menos uniformes (más variación). |
| Porosidad | $\varepsilon_{\text{FiSand}}$ | El volumen de espacio vacío que queda entre los granos de arena sobre el volumen total. |
| Peso específico | > 2.5 | La densidad de la arena entre la densidad de agua (la arena debe pesar por lo menos 2.5 veces lo que pesa el mismo volumen de agua). |
| Dureza | 6-8 | La resistencia de la arena al abuso físico. La arena debe tener cierta dureza para que no se degrade después de muchos ciclos de retrolavado. |
| Solubilidad en ácido | < 5% | No debe tener mucho material soluble que se va a disolver en el agua durante tiempo. |

Las propiedades de la arena afectan el comportamiento del filtro, tanto durante la filtración normal como en el retrolavado. En la filtración normal, la pérdida de carga a través de una capa *limpia* de arena es dada por:

$$HL_{\text{Filtración}} = \frac{36k\nu V_{Fi}}{g D_{60}^2} \frac{(1 - \varepsilon_{\text{Arena}})^2}{\varepsilon_{\text{Arena}}^3} H_{\text{Capa}}$$

Donde:

k = el constante de Carman-Kozeny = 5.00

$\varepsilon_{\text{Arena}}$ = la porosidad del lecho de arena = $\varepsilon_{\text{FiSand}}$

ν = la viscosidad cinemática del agua = 1.00E-6 m^2/s

V_{Fi} = la velocidad de aproximación en filtración = 1.83 mm/s

D_{60} = el tamaño de tamiz por cual pasa 60% de la arena = 825 microm (0.0325 pulgadas)

H_{Capa} = la altura de la capa de arena

El inicio del retrolavado necesita una cierta velocidad mínima de aproximación para fluidizar la arena:

$$V_{Mín} = \frac{g D_{60}^2}{36k\nu} \frac{\varepsilon_{Arena}^3}{(1 - \varepsilon_{Arena})} \left(\frac{\rho_{Arena}}{\rho_{H_2O}} - 1 \right)$$

Donde:

ρ_{Arena} = la densidad de la arena = 2.65 kg/L

ρ_{H_2O} = la densidad del agua = Rho.H2O

Una vez iniciado el retrolavado, la pérdida de carga a través de todo el lecho de arena fluidizado es:

$$HL_{Retrolavado} = (1 - \varepsilon_{Arena}) \left(\frac{\rho_{Arena}}{\rho_{H_2O}} - 1 \right) H_{Arena}$$

Donde:

H_{Arena} = la altura total del lecho de arena (*no expandido*)

8.5 – Manifolds de Entrada

El agua sedimentada entra en el lecho de arena a cuatro niveles. Cada entrada cuenta con un manifold que distribuye el agua en esa capa. La asamblea consiste en un tronco que se instala en el centro del filtro con dos “alas” de tubos perforados de menor diámetro (Ilustración 42).



Ilustración 42. El manifold consiste en un tronco con dos “alas” de tubos perforados. Hay tubos de 5.08 cm (2.00 pulgadas) que reciben los tubos perforados en los lados de la caja.

Los objetivos en el diseño de los manifolds de entrada son:

1. Lograr una distribución uniforme de agua en la capa de arena.
2. Evitar que la arena entre en los tubos.
3. Facilitar su fabricación e instalación.

Una restricción sobre la distribución del flujo por todas partes del lecho de arena gobierna la estimación del área colectiva de los orificios en los manifolds de entrada (véase Sección 8.2):

$$A_{Est} = \frac{Q_{Fi}}{\Pi_{VC} \sqrt{2g \frac{PR_{Re}}{(1-\Pi_Q^2)}}}$$

Donde:

A_{Est} = el área colectiva estimada de los orificios en el manifold de retrolavado = 0.0187 m²

Q_{Fi} = el caudal por filtro = 16.0 L/s

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para un orificio = 0.630

PR_{Re} = la recuperación de presión total en el manifold de retrolavado = 0.0260

Π_Q = el radio mínimo del flujo por el camino largo sobre el flujo por el camino corto = 0.850

Con esta estimación del área colectiva, se puede definir el diámetro de los orificios tomando en cuenta los tamaños de las brocas comúnmente disponibles:

$$D_{Orificio} = CeilNearest \left(\sqrt{\frac{4 A_{Est}}{\pi L_{Ramal} / S_{Orificio}}}, D_{Broca} \right)$$

Donde:

$CeilNearest(x, M)$ = una función para el valor en la matriz M más cercana y mayor que el objetivo x

L_{Ramal} = el largo útil del ramal (depende del diámetro del tronco del manifold)

$S_{Orificio}$ = la separación estimada entre los orificios = 5.00 cm

D_{Broca} = la matriz de los diámetros de las brocas comúnmente disponibles

Los manifolds de entrada en medio del filtro traen dos veces más agua que el inferior porque entregan agua a dos capas del filtro, entonces este cálculo se repite independientemente para los orificios de estos manifolds con el doble de esta área. El manifold de la entrada superior tiene la misma área colectiva que el manifold inferior, porque solo entrega agua a la capa superior de arena. Una vez definidos el diámetro y el número de orificios por ramal y por manifold, se puede volver a calcular el área colectiva verdadera de los orificios y la pérdida de carga verdadera a través de ellos durante la filtración normal:

$$HL_{Orificio} = \frac{\left(\frac{Q_{Capa}}{A_{Capa} \Pi_{VC} \varepsilon_{Arena}} \right)^2}{2g}$$

Tabla 18. Datos del manifold de entrada inferior (número 4)

| | |
|---|---------------------------------|
| Línea troncal del manifold inferior | 20.3 cm (8.00 pulgadas), SDR 26 |
| Ramales de entrada inferiores | 3.81 cm (1.50 pulgadas), Sch 40 |
| Tubos que reciben los ramales en cada extremo | 5.08 cm (2.00 pulgadas), Sch 40 |
| Número de ramales en el manifold | 24 |
| Longitud de los ramales | 55.3 cm |
| Longitud de la parte del ramal que entra en los orificios del tronco y el tubo que recibe el ramal en el otro extremo | 2.00 cm |
| Número de agujeros en cada ramal | 6 |
| Separación entre agujeros de los ramales (centro a centro) | 9.26 cm |
| Diámetro de los agujeros de los ramales | 1.27 cm (0.500 pulgadas) |
| Pérdida de carga estimada a través de los orificios durante el retrolavado | 9.88 cm |
| Pérdida de carga estimada a través de los orificios durante la filtración | 1.72 cm |

Tabla 19. Datos de los manifolds de entrada en el centro (números 2 y 3)

| | |
|---|---------------------------------|
| Líneas troncales de los manifolds | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 26 |
| Ramales de entrada superiores | 2.54 cm (1.00 pulgadas), Sch 40 |
| Tubos que reciben los ramales en cada extremo | 5.08 cm (2.00 pulgadas), Sch 40 |
| Número de ramales en cada manifold de entrada | 24 |
| Longitud de los ramales | 57.8 cm |
| Longitud de la parte del ramal que entra en los orificios del tronco y el tubo que recibe el ramal en el otro extremo | 2.00 cm |
| Número de agujeros en cada ramal | 7 |
| Separación entre agujeros de los ramales (centro a centro) | 8.14 cm |
| Diámetro de los agujeros de los ramales | 1.59 cm (0.625 pulgadas) |
| Pérdida de carga estimada a través de los orificios durante la filtración | 2.07 cm |

Tabla 20. Datos del manifold de entrada superior (número 1)

| | |
|---|---------------------------------|
| Línea troncal del manifold | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 26 |
| Ramales de entrada superiores | 2.54 cm (1.00 pulgadas), Sch 40 |
| Tubos que reciben los ramales en cada extremo | 5.08 cm (2.00 pulgadas), Sch 40 |
| Número de ramales en cada manifold de entrada | 24 |
| Longitud de los ramales | 57.8 cm |
| Longitud de la parte del ramal que entra en los orificios del tronco y el tubo que recibe el ramal en el otro extremo | 2.00 cm |
| Número de agujeros en cada ramal | 6 |
| Separación entre agujeros de los ramales (centro a centro) | 9.77 cm |
| Diámetro de los agujeros de los ramales | 1.27 cm (0.500 pulgadas) |
| Pérdida de carga estimada a través de los orificios durante la filtración | 1.72 cm |

8.6 – Manifolds de Salida

A diferencia de los manifolds de entrada, los manifolds de salida cuentan con tubos ranurados en vez de tubos perforados para los ramales. Las ranuras tienen 203 microm de ancho, de tal manera que el agua puede entrar en el tubo pero la arena no.



Ilustración 43. Las ranuras de un ramal del manifold de salida.



Ilustración 44. El manifold de salida con los tubos ranurados.

El área colectiva de las ranuras por manifold es el doble del área colectiva de los orificios en el manifold de retrolavado, porque estos manifolds de salida extraen el agua de dos capas de arena cada uno. El largo de las ranuras se define para lograr el área colectiva querida:

$$L_{Ranura} = \frac{A_{Capa} \cdot S_{Ranura}}{W_{Ranura} \cdot N_{Ramal} \cdot L_{Ramal} \cdot N_{Filas}}$$

Donde:

A_{Capa} = el área colectiva querida = 0.0374 m²

S_{Ranura} = la separación de las ranuras = 3.17 mm

W_{Ranura} = el ancho de las ranuras = 203 microm

N_{Ramal} = el número de ramales por manifold = 24

L_{Ramal} = el largo ranurado del ramal = 53.5 cm

N_{Filas} = el número de filas de ranuras por ramal = 2 (significa que ambos lados tienen ranuras)

La pérdida de carga a través de las ranuras durante la filtración normal es dada por:

$$HL_{Orificio} = \frac{\left(\frac{Q_{Capa}}{A_{Capa} \Pi_{VC} \varepsilon_{Arena}} \right)^2}{2g}$$

Donde:

Q_{Capa} = el caudal de agua que sale por el manifold

A_{Capa} = el área colectiva de las ranuras en el manifold

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para un orificio = 0.630

ε_{Arena} = la porosidad del lecho de arena = ε_{FiSand}

Tabla 21. Datos de los manifolds de salida

| | |
|---|---------------------------------|
| Líneas troncales de los manifolds | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 26 |
| Ramales de salida superiores | 2.54 cm (1.00 pulgadas), Sch 40 |
| Número de ramales en cada manifold de salida | 24 |
| Longitud de los ramales | 57.8 cm |
| Longitud de la parte del ramal que entra en los orificios del tronco y el tubo que recibe el ramal en el otro extremo | 2.00 cm |
| Longitud de la parte ranurada de cada ramal | 53.5 cm |
| Número de filas de ranuras en cada ramal | 2 |
| Separación entre ranuras | 3.17 mm |
| Número de ranuras en cada fila | 168 |
| Número de ranuras en cada ramal | 336 |
| Ancho de las ranuras | 203 microm |
| Longitud interior de las ranuras, medida en la curva del tubo | 2.28 cm |

8.7 – Sifón del Retrolavado

Se controla el ciclo de retrolavado del FRAMCA utilizando un sifón que cambia el nivel de la salida del filtro, según el dibujo abajo. Cuando el sifón está activo, el agua pasa por él al desagüe en el canal de limpieza de la planta, a una altura mucho más baja que las cajas de entrada y salida. Este cambio de nivel es necesario con la gran pérdida de carga durante el ciclo de retrolavado. Por otro lado, cuando el sifón está roto el aire impide el flujo de agua, y por fuerza el agua tiene que salir en la caja de salida a una altura mucho más alta que corresponde a la pérdida de carga menor durante el ciclo de filtración. La ventaja del sifón es que se evita el uso de una válvula grande que se necesitaría para cambiar entre las dos salidas de otra forma.

Ciclo de Retrolavado

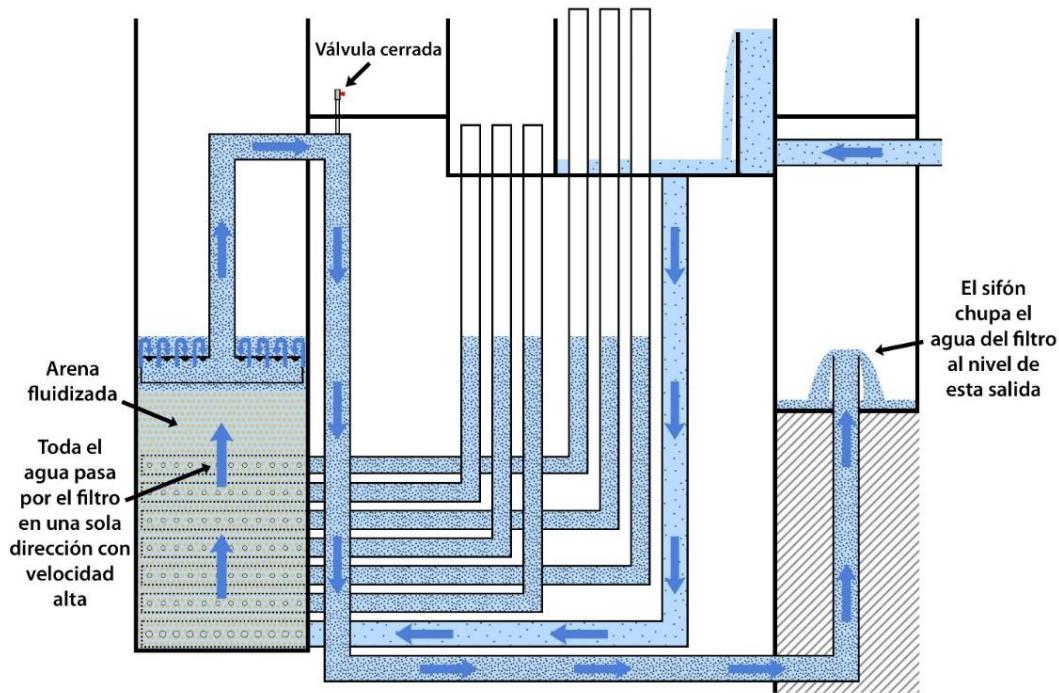


Ilustración 45. El FRAMCA de AquaClara en el ciclo de retrolavado.

El diámetro de la tubería del sifón se define para que las pérdidas de carga a través de ella no superen de $HL_{Máx} = 35.0$ cm. Estas pérdidas de carga incluyen:

$$HL_{Sifón} = HL_{Entrada} + HL_{Tubería} + HL_{Salida} \leq HL_{Máx}$$

Donde:

$HL_{Entrada}$ = la pérdida de carga por la entrada del flujo en los orificios del sifón

$HL_{Tubería}$ = la pérdida de carga por la tubería y los accesorios en el corredor del sifón

HL_{Salida} = la pérdida de carga por la salida del sifón en el canal de limpieza

$HL_{Máx}$ = la pérdida de carga máxima permisible por todo el sifón = 35.0 cm

Durante el retrolavado, el flujo entra en el sifón por unos orificios cuya área colectiva es aproximadamente igual al área transversal de la tubería.

$$D_{Orificio} = \text{CeilNearest}\left(\frac{ID_{Sifón}}{\sqrt{N_{Orificios}}}, D_{Broca}\right)$$

Donde:

$\text{CeilNearest}(x, M)$ = una función para el valor en la matriz M más cercana y mayor que el objetivo x

$ID_{Sifón}$ = el diámetro interior de la tubería del sifón

$N_{Orificios}$ = el número de orificios de salida, definido según el espacio disponible = 16

D_{Broca} = la matriz de los diámetros de las brocas comúnmente disponibles

La salida del sifón en el canal de limpieza es la boca del tubo, la cual se aproxima como vertedero. La pérdida de carga por la salida entonces es:

$$HL_{Salida} = \left(\frac{3}{2} \frac{Q}{\Pi_{VC} \sqrt{2g} (\pi ID_{Sifón})} \right)^{2/3}$$

Donde:

Q = el caudal del retrolavado, igual al caudal por filtro = 16.0 L/s

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para un orificio = 0.630

$ID_{Sifón}$ = el diámetro interior de la tubería del sifón

Tabla 22. Datos del sifón

| | |
|--|---------------------------------|
| Tubo principal | 20.3 cm (8.00 pulgadas), SDR 41 |
| Diámetro de la válvula de aire | 1.90 cm (0.750 pulgadas) |
| Número de agujeros en el manifold de salida | 16 |
| Separación entre agujeros del manifold (centro a centro) | 6.26 cm |
| Diámetro de los agujeros del manifold | 5.08 cm (2.00 pulgadas) |

8.8 – Vertederos de Control de Caudal

Durante el retrolavado del filtro, para fluidizar el lecho de arena entero y purgar el sedimento acumulado completamente, se necesita un caudal cerca del caudal de diseño. Un problema ocurre cuando se está operando la planta con un caudal menor, y por lo tanto cada filtro recibe solo una parte del caudal de diseño de 16.0 L/s cuando el agua se distribuye equitativamente. En las plantas que tienen más de un filtro, entre el canal de entrada y las cajas de entrada se puede instalar un sistema de vertederos que sirve para dirigir el caudal necesario al filtro que se está retrolavando (Ilustración 46).

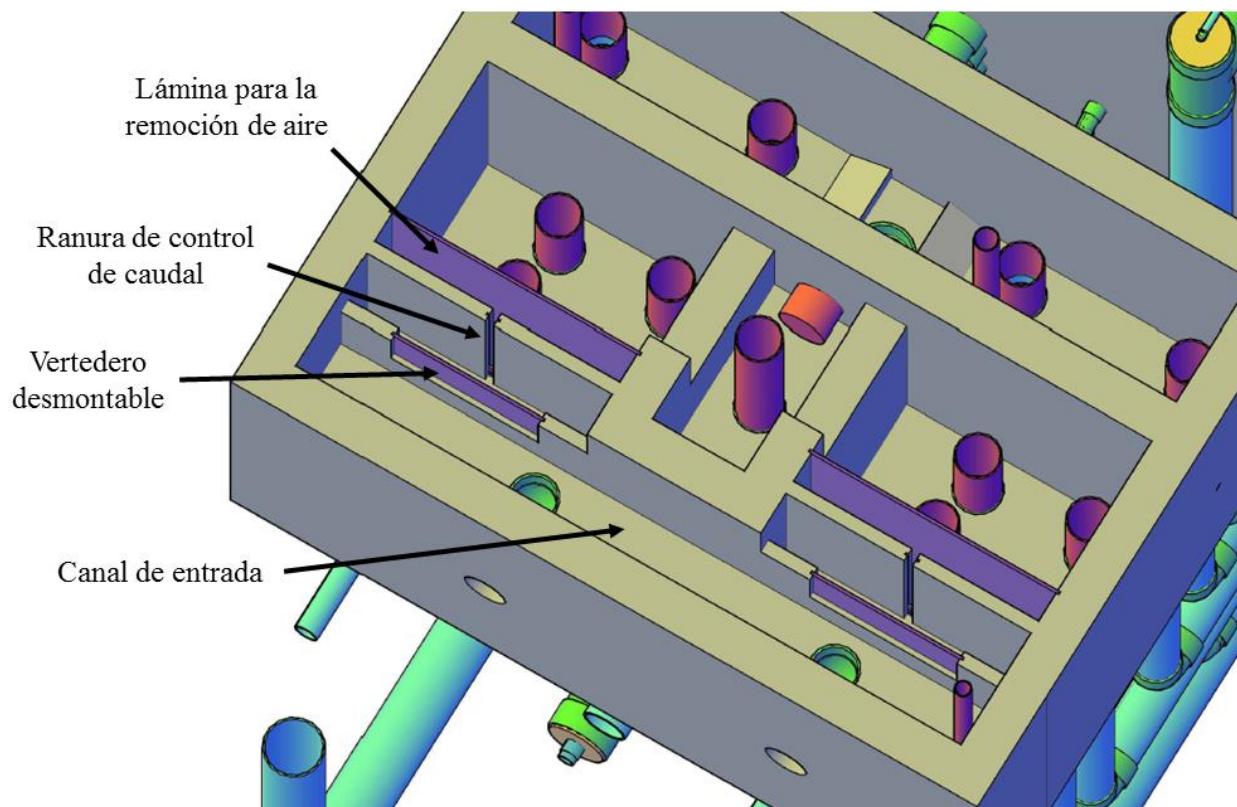


Ilustración 46. Vista isométrica de los vertederos de entrada al filtro.

Para iniciar el proceso de retrolavado se quita el vertedero desmontable sobre el cual se cae el agua del canal de entrada a la caja de entrada. La ranura detrás del vertedero hace que el nivel de agua en el canal de entrada suba al nivel de los vertederos de entrada de los otros filtros cuando está pasando el caudal deseado de 16.0 L/s. Si el caudal en la planta es mayor que 16.0 L/s, el nivel en el canal de entrada sube aún más y los otros filtros reciben la mayoría del caudal adicional. De esta manera el filtro que se está retrolavando recibe un caudal muy cerca del caudal de diseño independiente del caudal en la planta.

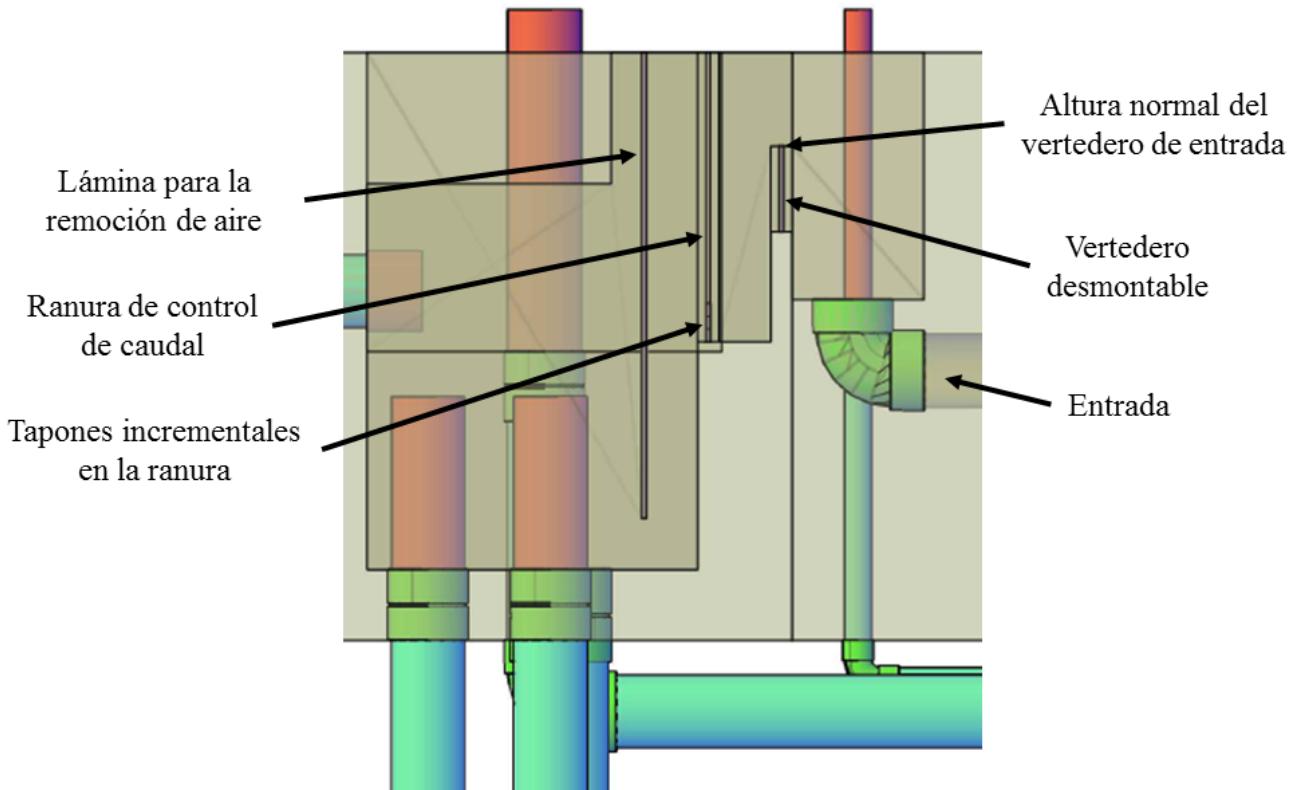


Ilustración 47. Vista lateral de los vertederos de entrada al filtro.

Las dimensiones de la ranura de control de caudal se calculan para que, cuando se saca la compuerta desmontable para retrolavar ese filtro, el caudal entrando no sobrepase de 1.15 veces más que el caudal de diseño del filtro de 16.0 L/s. La altura es dado por:

$$H_{Ranura} = \frac{\left(\frac{3}{2} \frac{Q_{Planta} - \Pi_Q Q_{Fi}}{\Pi_{VC} \sqrt{2g} \cdot W_{Demás}} \right)^{2/3}}{\Pi_Q^{2/3} - 1}$$

Donde:

Q_{Planta} = el caudal de la planta = 48.0 L/s

Π_Q = el radio del caudal máximo admisible de retrolavado sobre el caudal del filtro = 1.15

Q_{Fi} = el caudal del filtro = 16.0 L/s

Π_{VC} = el coeficiente de vena contracta para un orificio = 0.630

$W_{Demás}$ = el ancho colectivo de los demás vertederos de entrada de los demás filtros

Con la altura, se puede calcular el ancho:

$$W_{Ranura} = \frac{3}{2} \frac{Q_{Fi}}{\Pi_{VC} \sqrt{2g} \cdot H_{Ranura}^{3/2}}$$

Donde:

H_{Ranura} = la altura de la ranura = 41.8 cm

Al fondo de la ranura se colocan algunos tapones incrementales para calibrar y controlar finamente el caudal que entrará al filtro durante el retrolavado. La altura de estos tapones se define para poder ajustar el caudal de entrada en incrementos de aproximadamente 10% (redondeada al centímetro):

$$H_{Tapón} = \left(\frac{3}{2} \frac{1.1 \cdot Q_{Fi}}{\Pi_{VC} \sqrt{2g} \cdot W_{Ranura}} \right)^{2/3} - H_{Ranura}$$

Donde:

W_{Ranura} = el ancho de la ranura de control = 3.18 cm

H_{Ranura} = la altura normal de la ranura de control = 41.8 cm

Las dimensiones de la compuerta desmontable tienen que ser suficientemente grandes para que pueda pasar el caudal del filtro con una pérdida de carga pequeña estimada de 2.00 mm. Con una altura fija de 20.0 cm, el ancho de la compuerta es:

$$W_C = \frac{Q_{Fi}}{\Pi_{VC} H_C \sqrt{2g H L_C}}$$

Donde:

H_C = la altura de la compuerta = 20.0 cm

HL_C = la pérdida de carga permitida por la compuerta (modelada como orificio) = 2.00 mm

Tabla 23. Datos del sistema de vertederos de entrada del FRAMCA

| | |
|--|----------|
| Altura de la compuerta en el primer vertedero | 20.0 cm |
| Ancho de la compuerta en el primer vertedero | 64.1 cm |
| Radio del caudal máximo (que entra cuando la planta está tratando el caudal máximo de diseño) al caudal deseado de retrolavado de 16.0 L/s | 1.15 |
| Ancho de la ranura en el segundo vertedero | 3.18 cm |
| Altura total de la ranura en el segundo vertedero | 71.9 cm |
| Altura de cada tapón incremental de la ranura | 3.00 cm |
| Número de tapones incrementales de la ranura | 3 |
| Caudal adicional estimado que corresponde a cada tapón incremental | 1.75 L/s |

8.9 – Datos Generales

Tabla 24. Datos del FRAMCA

| Datos Constructivos | |
|---|--|
| Numero de filtros en paralelo | 3 |
| Caudal máximo de cada filtro | 16.0 L/s |
| Profundidad total de la caja del filtro | 4.52 m |
| Numero de capas de arena en cada filtro | 6 |
| Grosor de cada capa de arena | 20.0 cm (las cinco capas superiores) 23.0 cm (la capa inferior) |
| Separación entre los ramales de los manifolds | 10.0 cm |
| Número de ramales en cada manifold de entrada y salida | 24 |
| Volumen aproximado de arena | 5.55 kL |
| Datos de Tubería | |
| Tubo para vaciar el filtro de arena | 5.08 cm (2.00 pulgadas), SDR 26 |
| Drenaje de la caja de salida | 7.62 cm (3.00 pulgadas), SDR 26 |
| Drenaje de la caja de rebose | 15.2 cm (6.00 pulgadas), SDR 41 |
| Válvula de purga de la entrada inferior | 5.08 cm (2.00 pulgadas) |
| Válvula de purga de las entradas y salidas superiores | 3.81 cm (1.50 pulgadas) |
| Parámetros Hidráulicos | |
| Tasa de filtración | 1.83 mm/s |
| Tasa de retrolavado | 11.0 mm/s |
| Pérdida de carga total de filtración con la arena limpia | 13.2 cm |
| Pérdida de carga total de filtración al final del ciclo de filtración con sedimento acumulado | 45.6 cm |
| Pérdida de carga total de retrolavado | 1.56 m |

9. Apéndice: Datos Generales del Diseño

Tabla 25. Datos generales del diseño

| | |
|--|---|
| Caudal máximo de diseño | 48.0 L/s |
| Procesos de tratamiento | Coagulación con policloruro de aluminio, mezcla rápida, floculación hidráulica vertical, sedimentación ascendente con placas y manto de lodos, filtración rápida de arena, desinfección con hipoclorito de calcio |
| Pérdida de carga hidráulica aproximada total | 2.50 m |
| Diseño del dosificador de coagulante | Dosis máxima: 40.0 mg/L Pérdida de carga hidráulica: 20.0 cm Número de mangueras de diámetro pequeño: 5 (se usan 4 a la vez) Diámetro interno de las mangueras: 3.17 mm (0.125 pulgadas) Longitud de las mangueras: 1.07 m Concentración madre: 150 g/L |
| Dimensionamiento del dosificador de cloro | Dosis máxima: 2.00 mg/L Pérdida de carga hidráulica: 20.0 cm Número de mangueras de diámetro pequeño: 4 (se usan 3 a la vez) Diámetro interno de las mangueras: 3.17 mm (0.125 pulgadas) Longitud de las mangueras: 1.26 m Concentración madre: 9.17 g/L |
| Tipo de mezcla rápida | Orificio de 24.2 cm (9.51 pulgadas) en la entrada al floculador |
| Número de canales en el tanque de floculación | 4 |
| Dimensiones de cada canal de floculación | 53.0 cm de ancho 6.99 m de largo 2.05 m de profundidad |
| Tiempo de retención del tanque de floculación al caudal máximo de diseño | 8.2 min |
| Tasa máxima de disipación de energía | 21 mW/kg |
| Potencial de colisiones en el floculador | 79 m^(2/3) |
| Pérdida de carga total el floculador | 44.1 cm |
| Número total de deflectores en el floculador | 61 |
| Material de los deflectores de floculación | Láminas de policarbonato |
| Dimensiones del canal distribuidor de los tanques de sedimentación | 9.68 m de largo 59.7 cm de ancho 60.0 cm de profundidad |
| Dimensiones del canal de salida de los tanques de | 9.68 m de largo |

| | |
|--|--|
| sedimentación | 48.7 cm de ancho 60.0 cm de profundidad |
| Número de tanques de sedimentación | 8 |
| Dimensiones de cada tanque de sedimentación | 1.06 m de ancho 6.99 m de largo 1.80 m de profundidad |
| Tiempo de detención hidráulico aproximado de los tanques de sedimentación al caudal máximo de diseño | 24 min |
| Número total de placas de sedimentación | 1408 |
| Angulo de láminas de sedimentación con respecto al horizontal | 60 degrees |
| Longitud de láminas de sedimentación | 50.0 cm |
| Separación perpendicular entre placas de sedimentación | 2.50 cm |
| Velocidad ascendente en los tanques de sedimentación al caudal máximo de diseño | 992 microm/s |
| Velocidad de captura de las placas en los tanques de sedimentación | 120 microm/s |
| Numero de filtros rápidos de arena en múltiples capas | 3 |
| Numero de capas de arena en cada filtro | 6 |
| Profundidad de cada capa del lecho filtrante | 20.0 cm (las cinco capas superiores) 23.0 cm (la capa inferior) |
| Profundidad total del lecho filtrante | 1.28 m |
| Material filtrante | Arena de sílice |
| Tasa de filtración con el caudal máximo de diseño | 1.83 mm/s |
| Tasa de retrolavado con el caudal máximo de diseño | 11.0 mm/s |
| Profundidad de la caja de filtración | 4.52 m |
| Largo de una caja de filtración | 1.24 m |
| Ancho de una caja de filtración | 1.39 m |

10. Apéndice: Permisos e Información de la Licencia de la Universidad de Cornell

Derechos de Autor © 2018 Cornell University

Autores: El equipo de AguaClara de la Universidad de Cornell bajo la supervisión del Doctor Monroe Weber-Shirk.

Este diseño fue creado usando recursos de acceso libre del programa AguaClara de la Universidad de Cornell, con licencia [Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0](#) de los Estados Unidos de América. Si el usuario altera, transforma o construye sobre este trabajo, debe distribuir el resultado final únicamente bajo la misma licencia, u otra compatible.

Se autoriza el uso de la herramienta de diseño de AguaClara, al igual que las ilustraciones de AutoCAD resultantes y los archivos de soporte con especificaciones de diseño suministradas por la Universidad de Cornell con base en los parámetros entregados por el usuario (“trabajo colectivo”), garantizando los derechos de autor asociados sin previo acuerdo escrito. Cualquier planta de tratamiento de agua construida empleando este trabajo, debe ser diseñada y supervisada por un ingeniero civil licenciado.

En ningún caso, CCTEC, la Universidad de Cornell, o sus empleados serán responsables de daños parciales o totales, directos, indirectos, especiales, incidentales o consecuentes; incluyendo pérdida de bienes o ganancias, generados por el uso de este trabajo y sus derechos de autor asociados, incluso en caso en el que CCTEC o la universidad de Cornell hayan advertido sobre la posibilidad de dicho daño.

El presente trabajo se suministra “en el estado actual”, y CCTEC, la Universidad de Cornell y sus empleados, no tienen obligación alguna de brindar soporte, mantenimiento, actualizaciones, mejoras, o modificaciones. CCTEC, la universidad de Cornell y sus empleados, no constituyen representación alguna y no extienden garantías de ningún tipo, implícitas o expresas, incluyendo pero sin limitarse a garantías implícitas de ideoneidad o mercadeo con propósitos particulares, o cuando el uso del presente trabajo y sus derechos de autor asociados violen alguna patente, marca registrada u otros derechos.

Los usuarios de este TRABAJO deberán proteger, mantener indemne y defender a la Universidad de Cornell, sus funcionarios, empleados, agentes, y a los patrocinadores de la investigación que vinculen al TRABAJO con cualquier reclamo, demanda, pérdida, daño, costos, honorarios y gastos provenientes o derivados del uso del TRABAJO. En la indemnización se incluye, sin limitarse a, cualquier responsabilidad por fallas en los productos. Los usuarios del TRABAJO, a su propio costo, deberán asegurar las actividades relacionadas con el TRABAJO, obtener y mantener vigente su seguro o contar con un programa de aseguramiento personal equivalente. Cornell notificará por escrito a los usuarios del TRABAJO de cualquier reclamación o demanda en su contra, que Cornell invocará las disposiciones de este párrafo. Los usuarios del TRABAJO deberán mantener informada a la Universidad de Cornell, de manera regular, acerca de su defensa frente a cualquier reclamación en virtud del presente apartado.