

VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE
FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO “LAS BLANCAS” DE LA
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL MUNICIPIO DE ACACÍAS (ESPA)

VALENTINA PARRADO MCCLELLAND

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2021

VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE
FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO “LAS BLANCAS” DE LA
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL MUNICIPIO DE ACACÍAS (ESPA)

VALENTINA PARRADO MCCLELLAND

Trabajo de grado para optar título de Ingeniera Química

Director:

Viviana Sánchez Torres

PhD en Ingeniería Química

Codirector (externo):

Edison Osvaldo Cortés

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor y sacrificio; con su gran esfuerzo permitieron que yo llegara hasta acá derribando todo obstáculo que surgía en el camino. A mi abuela por haber sido mi apoyo moral y emocional, por estar conmigo en todo momento. A toda mi familia que depositaron su confianza en mí y me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a mi directora por compartirme su conocimiento y orientarme, a la Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas y permitirme realizar este proceso educativo.

Agradezco a Dios por ser mi guía y brindarme la sabiduría para continuar este proceso y obtener uno de mis mayores anhelos. A mis padres por ser mi pilar fundamental, mi motor y mi mayor inspiración, con su amor y respaldo me permitieron alcanzar mis objetivos.

Mi corazón está agradecido con cada una de las personas que de alguna manera me brindaron su apoyo y que han permitido que este trabajo se realice con éxito.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 PROCESO DE POTABILIZACIÓN	17
1.1.1 Captación	17
1.1.2 Desarenado.....	18
1.1.3 Coagulación	18
1.1.4 Floculación	19
1.1.5 Sedimentación	19
1.1.6 Filtración.....	19
1.1.7 Desinfección.....	20
1.2 LOS COLOIDES	20
1.3 TEORÍA DE LA COAGULACIÓN.....	21
1.4 TEORÍA DE LA FLOCULACIÓN.....	22
1.4.1 Factores que influyen en la floculación	23
1.4.2 Floculadores Tipo Alabama	25
2. OBJETIVOS.....	27
2.1 OBJETIVO GENERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	28
3.1 CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL FLOCULADOR ..	28
3.2 VERIFICACIÓN DE DATOS SEGÚN EL RAS	33
3.3 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE AGITACIÓN	34
3.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO Y SODA CÁUSTICA.....	35
4. RESULTADOS.....	39

4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL FLOCULADOR.....	39
4.2 VERIFICACIÓN DE DATOS SEGÚN EL RAS 2000	42
4.3 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE AGITACIÓN	43
4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO Y SODA CÁUSTICA.....	43
5. CONCLUSIONES	45
6. RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Coeficiente de arrastre.....	35
Tabla 2. Profundidad de las cámaras de floculación.....	39
Tabla 3. Sección libre de agua de cada cámara de floculación	39
Tabla 4. Profundidad real de operación	40
Tabla 5. Área húmeda y volumen de cada cámara.....	40
Tabla 6. Tiempo de retención en cada cámara.....	41
Tabla 7. Pérdida de carga total entre las cámaras.....	41
Tabla 8. Dosificación de las jarras	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de potabilización en la planta de tratamiento “Las Blancas”	18
Figura 2. Distribución de los tamaños de las partículas en el agua	21
Figura 3. Esquema del gradiente de velocidad G	24
Figura 4. Vista lateral del cámara	29
Figura 5. Vista superior de la cámara	29
Figura 6. Vista lateral de la sección de floculación	29
Figura 7. Sección libre de agua	30

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. pH y turbiedad final.....	56

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Cámaras de una sección del floculador	28
Fotografía 2. Canaleta Parshall	50
Fotografía 3. Floculador tipo Alabama	50
Fotografía 4. Sedimentador	51
Fotografía 5. Filtro.....	51
Fotografía 6. Inyección de cloro gaseoso	52
Fotografía 7. Regleta de medición de caudal	52
Fotografía 8. Equipo de ensayo de jarras	53
Fotografía 9. Jarra 1	57
Fotografía 10. Jarra 2	57
Fotografía 11. Jarra 3	58
Fotografía 12. Jarra 4	58

ANEXOS

	pág.
Anexo A. Registro fotográfico de la planta.....	50
Anexo B. Ensayo de Jarras	53
Anexo C. Registro fotográfico del ensayo de jarras	57

RESUMEN

TÍTULO: VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO “LAS BLANCAS” DE LA EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL MUNICIPIO DE ACACÍAS (ESPA)*

AUTOR: VALENTINA PARRADO MCCLELLAND**

PALABRAS CLAVE: FLOCULACIÓN, GRADIENTE DE VELOCIDAD, TEST DE JARRAS, TIEMPO DE RETENCIÓN, COAGULACIÓN.

DESCRIPCIÓN: En el presente estudio se realizó un diagnóstico del diseño hidráulico del floculador tipo Alabama que opera en la planta de tratamiento de agua potable “Las Blancas”, con el fin de validar los parámetros de funcionamiento; considerando variables como el tiempo de retención, el gradiente de velocidad y las pérdidas de energía. Para ello, se hizo un dimensionamiento de las cámaras de floculación, se revisaron características del agua como turbiedad, pH y temperatura, y se realizaron ensayos de jarras. La verificación de estos parámetros se realizó con la ayuda del reglamento RAS 2000, el cual indica que el tiempo de detención para los tanques de floculación debe estar comprendido entre los 20 y 30 minutos, y el gradiente de velocidad entre 20 y 70 s^{-1} .

El análisis arrojó un periodo de retención de 20 minutos y un gradiente de velocidad de 34 s^{-1} en la unidad de floculación, valores que se encuentran dentro del rango establecido por el reglamento y que son un indicador de la rapidez con la que trabaja la planta.

Con los ensayos de jarras se demostró la eficiencia del tratamiento; se obtuvo una alta remoción de las unidades de turbiedad que fueron de 19 hasta 2. Se constató que el gradiente permite una velocidad ascensional constante, lo que indica que no hay zonas muertas en el floculador. Además, se estableció la dosificación de sulfato de aluminio y soda cáustica que permiten la formación de un floc de gran tamaño. En base a estos resultados se comprobó la efectividad de los parámetros de operación de la unidad de floculación y la importancia de los ensayos de laboratorio para garantizar el correcto tratamiento del agua.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Phd. Viviana Sánchez Torres. Codirector: Ingeniero Químico. Edison Osvaldo Olaya Cortés.

ABSTRACT

TITLE: VALIDATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF THE FLOCCULATION UNIT OF THE "LAS BLANCAS" TREATMENT PLANT OF THE PUBLIC UTILITIES COMPANY OF THE MUNICIPALITY OF ACACÍAS (ESPA)*

AUTHOR: VALENTINA PARRADO MCCLELLAND**

KEY WORDS: FLOCCULATION, VELOCITY GRADIENT, JAR TEST, RETENTION TIME, COAGULATION.

DESCRIPTION: In the present study, a diagnosis of the hydraulic design of the Alabama type flocculator operating at the "Las Blancas" drinking water treatment plant was carried out in order to validate the operating parameters, considering variables such as retention time, velocity gradient and energy losses. For this purpose, the flocculation chambers were sized, water characteristics such as turbidity, pH and temperature were checked, and jar tests were carried out. The verification of these parameters was carried out with the help of the RAS 2000 regulation, which indicates that the detention time for flocculation tanks should be between 20 and 30 minutes, and the velocity gradient between 20 y $70 s^{-1}$.

The analysis yielded a retention period of 20 minutes and a velocity gradient of $34 s^{-1}$ in the flocculation unit, values that are within the range established by the regulations and are an indicator of the speed with which the plant works.

With the jar tests, the efficiency of the treatment was demonstrated; a high removal of turbidity units was obtained, ranging from 19 to 2. In addition, the dosage of aluminum sulfate and caustic soda was established to allow the formation of a large floc. Based on these results, the effectiveness of the operating parameters of the flocculation unit and the importance of laboratory tests to ensure proper water treatment were verified

* Degree work

** School of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Phd. Viviana Sánchez Torres. Co-director: Chemical Engineer. Edison Osvaldo Olaya Cortés.

INTRODUCCIÓN

La remoción de contaminantes es el propósito principal del tratamiento de aguas naturales para consumo humano, teniendo en cuenta que la calidad de agua tratada debe cumplir todas las reglamentaciones actuales para agua potable¹. El proceso de potabilización está constituido por cinco etapas: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, y tiene como objetivo principal la eliminación de partículas coloidales, la supresión de la flora microbiana, además de la corrección de algunas características fisicoquímicas tales como: turbiedad, color y pH².

En la floculación, con la agitación lenta se busca aumentar la posibilidad de contacto entre partículas después de la adición del coagulante. Un mayor contacto entre partículas favorece la formación de flóculos; sin embargo, si la agitación fuese demasiado fuerte, los esfuerzos cortantes que se producen romperán el flóculo en las partículas más pequeñas. La agitación debe controlarse con mucho cuidado de modo que los flóculos sean del tamaño adecuado y se depositen rápidamente³.

La potabilización del agua en el municipio de Acacías-Meta es realizada por la Empresa de Servicios Públicos (ESPA) en tres plantas de tratamiento: “Acaciitas”, “El Playón” y “Las Blancas”. Estas suplen las necesidades básicas de la población

¹BETANCOUR C, Bibiana. y JIMÉNEZ G, David. Potencial zeta como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *DYNA*. 2012, vol. 79, nro. 175, pp.166-172. ISSN 0012-7353.

² BASANTES BARAHONA, Cristina, Alternativas de coagulantes para el tratamiento de agua en la Planta de tratamiento “El Placer” perteneciente a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Trabajo de investigación de Químico. Quito. : Universidad Central Del Ecuador, 2016. 122 p

³ CARREÑO, Erika; CASTIBLANDO, Cristopher, Optimización del floculador tipo Alabama en la Planta de Tratamiento de Acuanamay con la incorporación de mallas en cada una de sus cámaras. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. 2016. 63p

con una calidad de agua aceptable, permitiendo así su consumo de una manera segura; sin embargo, no se tiene el control adecuado de la dosificación del coagulante (sulfato de aluminio granulado tipo B), del agente alcalinizante (soda cáustica), ni de los parámetros de funcionamiento. “Las Blancas” es la planta principal del municipio, suministra cerca del 70% del agua que se consume y cuenta actualmente con una capacidad de tratamiento de 200 l/s.

El diseño de la planta cuenta con un floculador tipo Alabama que está constituido por compartimentos ligados entre sí. Estas unidades son muy vulnerables a las variaciones de caudal debido a que el flujo del agua es ascendente y descendente en el interior. Cuentan con unas que boquillas permiten ajustar la velocidad a las condiciones de cálculo o de operación⁴.

La validación de los parámetros de operación mediante ensayos de laboratorio es necesaria para mejorar los sistemas existentes en la planta. Lo anterior servirá para determinar si las unidades de floculación están trabajando acorde a las condiciones con las que el agua cruda ingresa. Se ha demostrado que para cada tipo de agua existen parámetros que permiten la máxima eficiencia en la remoción, además de una dosis óptima que varía en función del pH y de la concentración de los coloides presentes en el agua cruda⁵, es decir, una dosis que no permita el deterioro de la calidad del efluente.

El presente trabajo, mediante ensayos de jarras valida las condiciones de pH, turbiedad, gradiente de velocidad, tiempo de retención y dosificación de coagulante, bajo las que opera actualmente el floculador tipo Alabama de la planta “Las Blancas”.

⁴ Tesis de la Uson. [En línea] Bogotá [Citado: 27, enero, 2021] Disponible en internet: URL <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/913/Capitulo3.pdf>

⁵ RODRIGUEZ SALCEDO, Francisco, Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable. Trabajo De Grado Modalidad Monografía Ingeniero Civil. Sucre. : Universidad De Sucre. 2008. 97p.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La Empresa de Servicios Públicos de Acacías E.S.P es una Empresa Industrial y Comercial del Estado, del orden municipal, dedicada a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.

La ESPA E.S.P. fue creada mediante el Decreto No. 004 de enero de 1998, con el fin de mejorar la calidad de vida de la población para garantizar la prestación adecuada de los servicios públicos domiciliarios a un total de 42.000 habitantes.

Para el año 2008, la empresa se asigna un nuevo nombre (Empresa de Servicios Públicos de Acacías ESPA E.S) y actualmente tiene un equipo de trabajo de 90 funcionarios en el área operativa y 32 en el área administrativa. Cuenta con cuatro Plantas de Tratamiento de Agua Potable: Planta Las Blancas, Planta Acaciitas, Planta el Playón y Planta Dinamarca, que garantizan un agua apta para consumo humano almacenándola y distribuyéndola a los usuarios acompañada de la vigilancia y control de la Secretaría de Salud Departamental.

Misión

Somos una Empresa prestadora de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo con estándares de calidad y enfoque de la responsabilidad social que brinda calidad de vida y genera bienestar a la comunidad Acacireña.

Visión

En 2028, ESPA será reconocida a nivel municipal y regional como una empresa con altos estándares de la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Los sistemas que se emplean para la purificación del agua van dependiendo de las necesidades del lugar donde se requiere dicha labor, por lo que se encuentran varios procesos fundamentales para conseguir que el agua tenga las propiedades físicas y químicas adecuadas que no lleguen afectar la salud de los consumidores.

En la planta “Las Blancas”, el agua resultante del tratamiento debe cumplir con la resolución 2115 de 2007⁶, que señala características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano. La quebrada “Las Blancas” es la fuente de agua superficial que abastece la planta actualmente, su tratamiento consiste en un proceso de separación de ciertos componentes del agua natural, seguido de la precipitación de impurezas, filtración y desinfección con cloro (Figura 1), manteniendo un modelo hidráulico automático que maneja un caudal máximo de 204 l/s.

1.1.1 Captación

Es el proceso mediante el cual se toma el agua cruda de la quebrada “Las Blancas” y se transporta hasta la planta de tratamiento⁷.

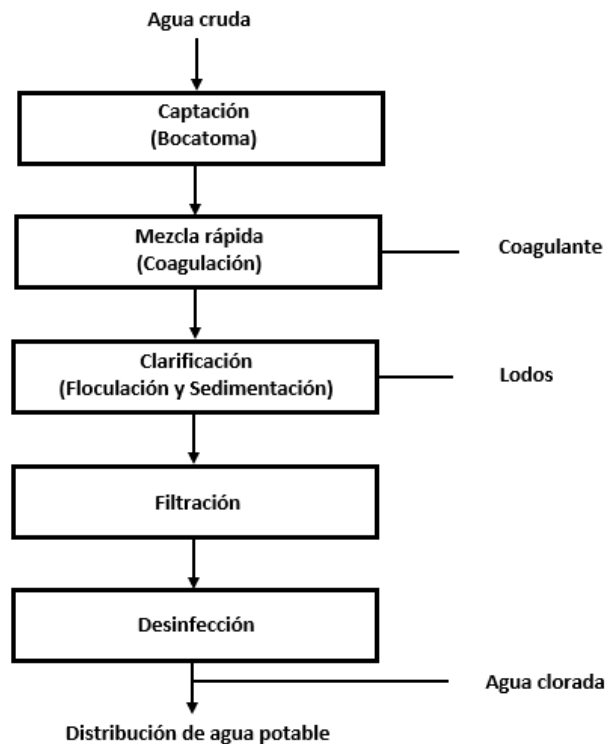
⁶ MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Continuación de la resolución “por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.”. RESOLUCION NÚMERO 2115. 2007. 23 p.

⁷ BAQUE MACÍAS, Alberto. Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Tesis de Grado de Ingeniero Mecánico. Guayaquil.: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Mecánica Y Ciencias de la Producción. 2001. 170p.

1.1.2 Desarenado

El agua captada pasa bajo el río por un sifón invertido, siendo conducido a los desarenadores. Es entonces que inicia la operación de sedimentar las partículas de mayor masa; en este caso serían las arenas.

Figura 1. Proceso de potabilización en la planta de tratamiento “Las Blancas”



1.1.3 Coagulación

Es el proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de coagulantes químicos y la aplicación de energía de mezclado que puede ser hidráulica o mecánica⁸. Debido a las características del agua cruda de la fuente,

⁸ MUÑOZ PULIDO, Sebastián y BERNAL CARRILLO, Fernando, Diseño hidráulico de una planta de potabilización de agua en la vereda de San Antonio de Anapoima. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. 2016. 135p.

en la planta se utiliza sulfato de aluminio granulado tipo B como coagulante y soda cáustica como alcalinizante para la corrección del pH. Este proceso de mezcla rápida se lleva a cabo en un canal denominado canaleta Pashall (Anexo A) que garantiza un resalto hidráulico para la homogenización.

1.1.4 Floculación

El objetivo principal de este proceso es reunir las partículas desestabilizadas luego de la coagulación para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia⁹. La planta cuenta con un floculador de potencia hidráulica tipo Alabama (Anexo A) que utiliza la energía hidráulica disponible a través de una pérdida de carga general. Consta de cuatro unidades cada una con nueve cámaras que permiten la formación de floc gracias al flujo lento del agua.

1.1.5 Sedimentación

Se entiende por sedimentación a la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión que tengan peso específico mayor que la del fluido. Cuando esta se produce, el resultado final será un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. La planta tiene cuatro sedimentadores rectangulares con escurrimiento vertical que permiten la separación de lodos formados por el floculador, los cuales cuentan con módulos de sedimentación acelerada tipo colmena (Anexo A) que permiten aumentar la eficiencia de la remoción de sólidos, garantizando una mejora significativa en la calidad del efluente.

1.1.6 Filtración

Es la separación de partículas coloidales y microorganismos indeseados que no han quedado retenidos en los procesos anteriores (coagulación y sedimentación) a través de un medio poroso llamado lecho filtrante. Una buena filtración reducirá

⁹ VILLANUEVA CASTILLO, Wilmer, Alternativas de deshidratación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis de Ingeniero Sanitario. Lima.: Universidad Nacional De Ingeniería. 2017. 127p.

considerablemente la demanda de desinfectante (cloro) en la etapa posterior¹⁰. Cuentan con cuatro filtros (Anexo A) conformados por una sección de piedras, arena y carbón activado (antracita). Realizan una limpieza de flujo ascendente denominada retrolavado donde el agua se introduce de abajo hacia arriba haciendo que la arena del lecho se expanda.

1.1.7 Desinfección

El proceso de desinfección consiste en la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. En este proceso se utiliza cloro gaseoso el cual es eficaz por tratarse de un oxidante capaz de reaccionar con sustancias orgánicas e inorgánicas, este es almacenado en cilindros e inyectado directamente al agua (Anexo A).

1.2 LOS COLOIDES

Son en general, sólidos finamente divididos que no se sedimentan por la simple acción de la gravedad. Normalmente estas partículas en el agua presentan un diámetro entre 10^{-6} y 10^{-3} milímetros (Figura 2) y son las principales responsables de la turbiedad¹¹.

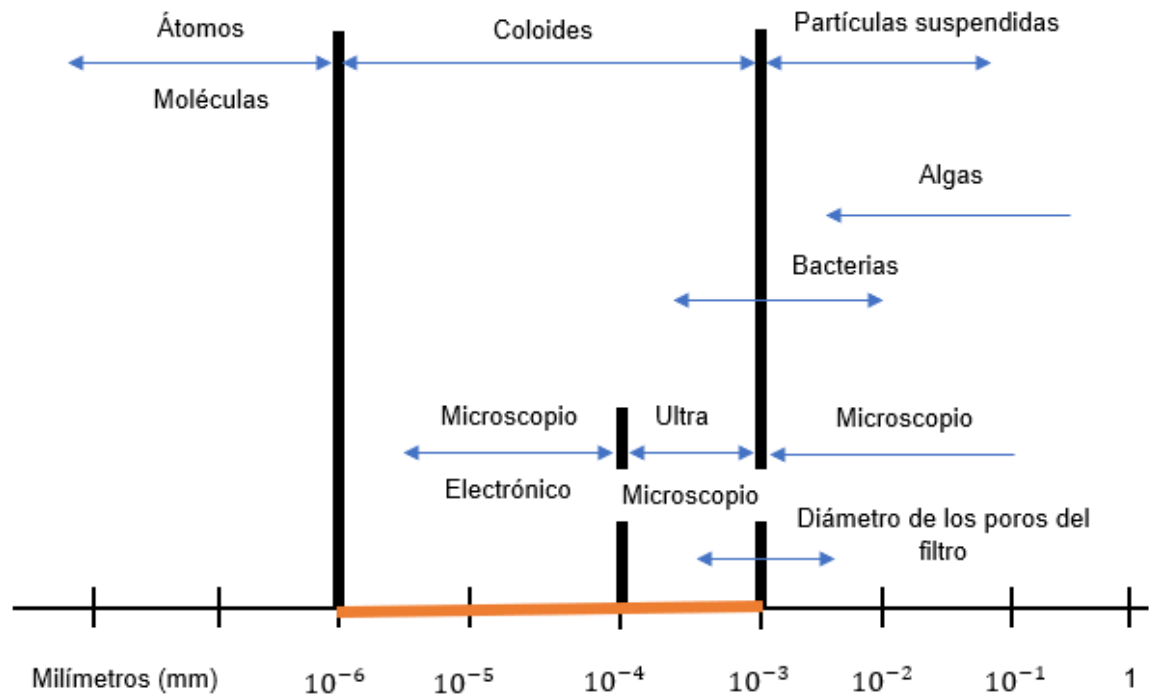
En ambientes acuosos, estas partículas reaccionan con especies metálicas y compuestos orgánicos. Debido a su pequeño tamaño, las fuerzas de Van der Waals entre las partículas son considerablemente menores que las fuerzas de repulsión de las cargas eléctricas. Por consiguiente, la suspensión coloidal se considera

¹⁰ MUÑOZ PULIDO. Op Cit, 135p.

¹¹ BARRENECHEA MARTEL, Ada, Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual 1: Teoría Tomo 1, Capítulo 4. Lima. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), 2004. 73 p.

estable. En los tratamientos de agua se debe minimizar estas fuerzas de repulsión para que se formen grandes aglomerados¹².

Figura 2. Distribución de los tamaños de las partículas en el agua



Fuente. BARRENECHEA MARTEL, Ada, Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual 1: Teoría Tomo 1, Capítulo 4. Lima. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), 2004. 73 p.

1.3 TEORÍA DE LA COAGULACIÓN

La coagulación es considerada el proceso más importante dentro de la potabilización del agua, debido a que remueve entre el 80 y 90% de las partículas coloidales suspendidas¹³. En el agua cruda se lleva a cabo con la adición de sales de aluminio y hierro principalmente, y consta de dos fenómenos uno químico y otro físico. Durante el fenómeno químico las sales coagulantes reaccionan con el agua

¹² YOVAL SANDOVAL, Luciano, *et al.* Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. México.: Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua, [c.a.]. 15 p.

¹³ BARRENECHEA MARTEL. Op Cit. 73p.

formando especies hidrolizadas de cargas positivas, esta fase depende de la concentración del coagulante y del pH final de la mezcla.

El fenómeno físico consiste en el transporte de las sustancias hidrolizadas para que entren en contacto con las impurezas del agua, este proceso toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos. La adición de iones coagulantes de carga opuesta a la del coloide reduce el potencial de carga de la doble capa eléctrica; altera la fuerza resultante entre las fuerzas de atracción de Van der Waals y las de repulsión electrostática que impiden la unión de las partículas. Al aumentar los iones de carga opuesta en la solución, estas fuerzas disminuyen; provocando que la distancia entre las partículas también disminuya hasta que puedan juntarse.

Esta operación se efectúa en unidades en las cuales el agua se somete a una agitación intensa para formar una solución homogénea de los compuestos químicos adicionados con el agua, procurando que ocurra en el menor tiempo posible¹⁴.

1.4 TEORÍA DE LA FLOCULACIÓN

Es la segunda fase de formación de partículas sedimentables. Cuando se habla del término floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas, que forman una partícula de mayor tamaño llamada floc¹⁵. En esta fase las partículas tienen un tamaño suficiente para sedimentar rápidamente por efecto de la gravedad.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos de modo que se forme una malla de coágulos que sería porosa. Este proceso se

¹⁴ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos, Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 1995. p 115.

¹⁵ CÁRDENAS GUZMÁN, Andrés y MEDINA RINCÓN, Julián, Diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua potable a escala para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás. Trabajo de Grado de Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Santo Tomás. 2017. 80p.

origina como consecuencia del transporte de partículas desestabilizadas dentro del agua.

Los contactos pueden realizarse de dos modos:

- Contactos por bombardeo de partículas producido por el movimiento de estas en el líquido (movimiento Browniano), que solo influye en partículas de tamaños muy pequeños. Conocida como floculación pericinética. Se considera demasiado lenta y por tanto no tiene interés práctico en el tratamiento de aguas.
- Contactos por turbulencias del líquido efectivo solo en partículas de mayor tamaño. Esta floculación se debe a gradientes de velocidad originados por disipación de energía externa mecánica o hidráulica. Conocida como floculación ortocinética.

1.4.1 Factores que influyen en la floculación

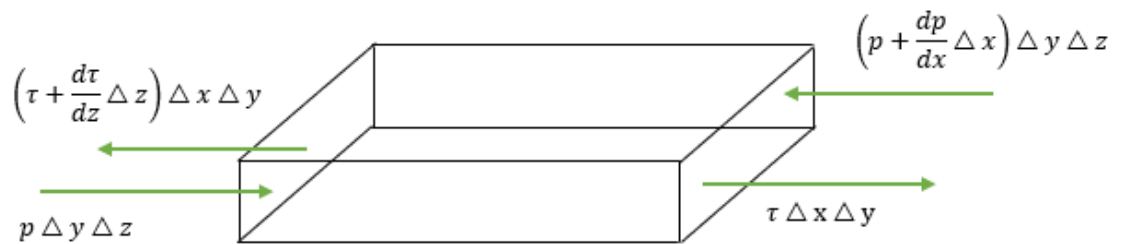
- **Naturaleza del agua:** La floculación es extremadamente sensible a las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad. La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en el proceso. Estos aspectos son generalmente confirmados en la práctica: por regla general, es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presenten una amplia distribución de tamaños de partículas¹⁶.
- **Tiempo de floculación:** En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación.
- **Gradiente de velocidad:** En la mayoría de las ecuaciones que caracterizan la velocidad de aglomeración de las partículas en la floculación ortocinética,

¹⁶ BARRENECHEA MARTEL. Op Cit. 73p.

aparece el parámetro de gradiente de velocidad como un factor de proporcionalidad. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas.

Camp y Stein¹⁷, propusieron un esquema para comprender mejor la expresión de gradiente de velocidad G . Ellos consideran un pequeño cubo de agua, de dimensiones dx , dy y dz , sobre el cual actúan fuerzas de corte por acción de la gravedad supuestas en la dirección X y fuerzas de presión como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Esquema del gradiente de velocidad G



Igualando las fuerzas se tiene:

$$\frac{d\tau}{dz} = -\frac{dp}{dx}$$

Suponiendo que la figura puede girar, se origina una potencia con un valor:

$$P = \tau \Delta x \Delta y \Delta z \frac{du}{dz}$$

Y por tanto la potencia por unidad de volumen sería:

$$\frac{P}{V} = \tau \frac{du}{dz}$$

¹⁷ CAMP, T. R. y STEIN, P. C, Velocity gradients and internal work in fluid motion. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol. 30, 1943.

Aplicando la “ley de la viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz}$$

Siendo du/dz el gradiente de velocidad, tendríamos:

$$G = \frac{du}{dz}$$

$$\frac{P}{V} = \mu \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \mu G^2$$

Luego:

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

Este factor es sobre el cual uno puede actuar en la floculación y de ahí su importancia, cada tipo de agua contiene un valor de G dependiendo de las partículas contenidas en ellas, ya que un valor muy grande puede generar ruptura de los flocs ya formados por la acción de fuerzas de corte del líquido.

1.4.2 Floculadores Tipo Alabama

La función de los floculadores es ayudar al desarrollo del flóculo, el cual se genera al agregarle al agua una agitación lenta y con velocidades que vayan decreciendo a medida que el agua circula por los canales. Estos floculadores consisten en tanques provistos de pantallas en los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección. En estas unidades (Anexo A) el agua hace un movimiento ascendente-descendente dentro de cada compartimiento, por lo que es muy importante mantener la velocidad del agua constante. La velocidad ascensional será constante mientras el caudal sea

constante; por esta razón, las unidades son muy vulnerables a las variaciones. Si el caudal de operación baja, el agua ya no hace su recorrido ascensional y solamente pasará por el fondo de la unidad de una boquilla a la otra, lo que generará un cortocircuito en esta zona y un gran espacio muerto en toda la parte superior.

El gradiente de velocidad se produce casi exclusivamente en los puntos de paso (niples, codos, boquillas, etcétera), los cuales están localizados en el fondo de la unidad y distribuidos alternadamente en uno y otro extremo¹⁸.

¹⁸ CORREDOR BRISEÑO, Augusto y TRIANA HERNÁNDEZ, Javier, Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, de dispondrá en del laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. Trabajo de Grado De Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Católica de Colombia. 2017. 82p

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Validar los parámetros de operación del floculador tipo Alabama (pH, tiempo de retención, gradiente de velocidad y cantidad de coagulante) mediante ensayos de jarras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer y verificar según el RAS 2000 las condiciones bajo las cuales opera el floculador del sistema actual de la planta (el gradiente de velocidad y tiempo de retención), a partir de un análisis de su diseño.
- Escalar los datos calculados para luego validarlos en el floculador mecánico de paletas (equipo de ensayo de jarras).
- Determinar un rango de dosificación coagulante y alcalinizante durante la visita técnica, que permitan la formación floc según las características de agua cruda como turbiedad y pH.

3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

3.1 CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL FLOCULADOR

El floculador de la planta está dividido en cuatro secciones que trabajan en paralelo, cada una de ellas cuenta con 9 cámaras las cuales se enumeraron según el recorrido del agua, comenzando por la entrada del caudal y finalizando en la cámara que da paso al sedimentador (Fotografía 1). Como las secciones operan de manera simultánea, se eligió solo una para analizar.

Fotografía 1. Cámaras de una sección del floculador



Se estudiaron tres características fundamentales del proceso de floculación, que son: la forma de producir agitación, el gradiente de velocidad y el tiempo de retención.

En primera instancia, el técnico midió el caudal, leído en la regleta (Anexo A) ubicada en la canaleta Parshall donde ocurre la mezcla rápida del proceso.

Por otra parte, para el cálculo de las condiciones de operación se realizó un análisis del diseño del floculador. Se hizo un dimensionamiento de las cámaras como se explica a continuación:

Cada cámara está construida en forma de un trapecio rectángulo, lo que hizo indispensable asignar una variable para diferenciar cada uno de sus lados (Figura 4 y 5), y se enumeraron por filas según su tamaño (Figura 6).

Figura 4. Vista lateral del cámara

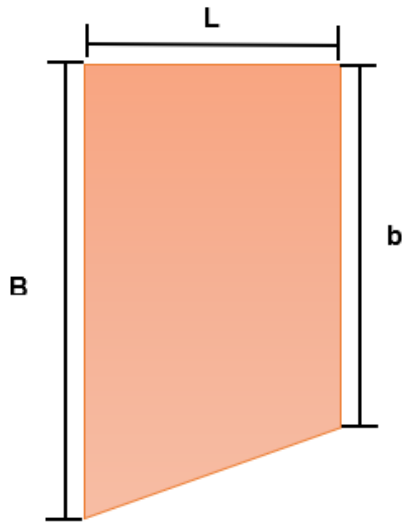


Figura 5. Vista superior de la cámara

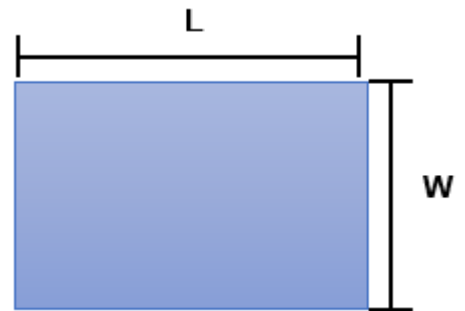
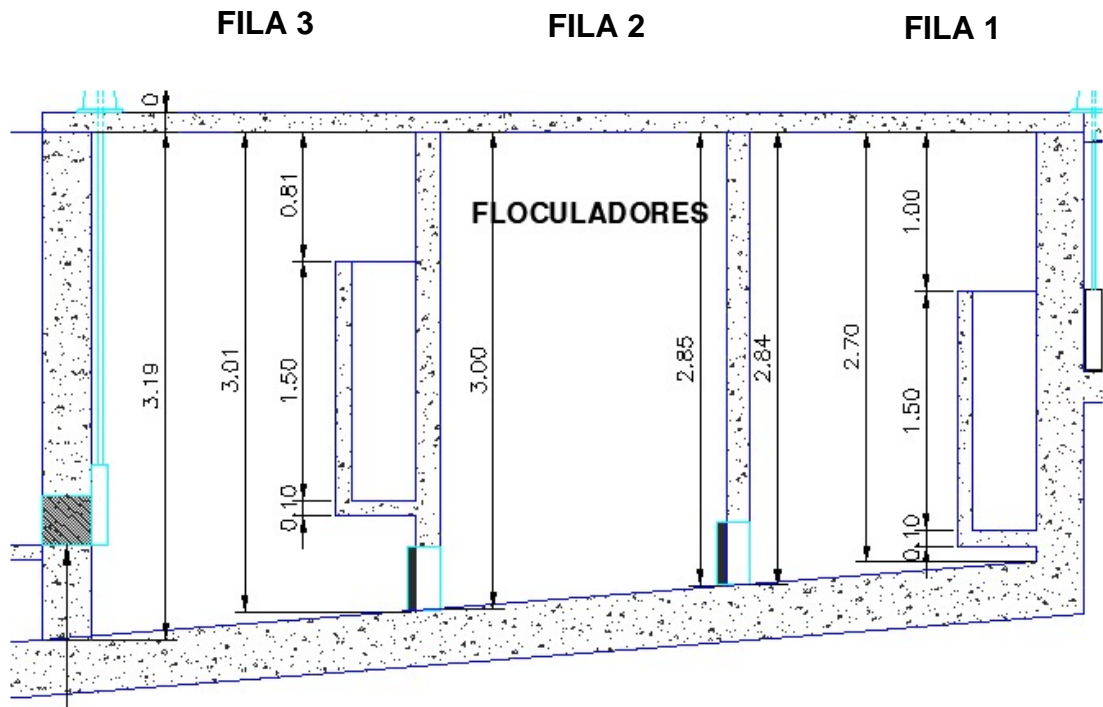


Figura 6. Vista lateral de la sección de floculación



Donde:

L: Largo de la cámara (m)

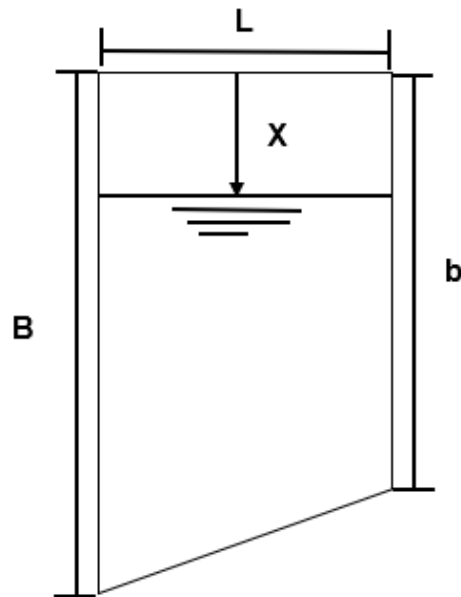
W: Ancho de la cámara (m)

b: Profundidad 1 de la cámara (m)

B: Profundidad 2 de la cámara (m)

Los cálculos se hicieron sobre el volumen total de líquido en cada cámara, por tanto, el técnico midió la sección libre de agua (X) como lo indica la Figura 7.

Figura 7. Sección libre de agua



X: Sección libre de agua (m)

Teniendo este dato, se restó a la medida de cada lado:

$$Y_b = b - X \quad (Ec. 1)$$

$$Y_B = B - X \quad (Ec. 2)$$

Luego, se estableció el área de cada cámara a partir de la ecuación del área de un trapecio que se denominó área húmeda. En base a esta, se calculó el volumen de operación, donde W está definido como el ancho de la cámara:

$$A = \frac{(Y_b + Y_B)}{2} * L \quad (m^2) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$V = A * W \quad (m^3) \quad (\text{Ec. 4})$$

Cálculo del tiempo de retención:

Comúnmente para el diseño se utiliza el denominado periodo de retención, conocido como el tiempo promedio en el que el fluido de caudal Q_d pasa a través de la cámara del floculador de volumen V como lo indica la Ecuación 6¹⁹. Este caudal se halló dividiendo el caudal de operación de la planta en las cuatro secciones que componen el sistema total de floculación:

$$Q_d = \frac{Q}{4} \quad (m^3/s) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$t_r = \frac{V}{Q_d} \quad (s) \quad (\text{Ec. 6})$$

Cálculo de las pérdidas de carga:

En los floculadores tipo Alabama el paso entre las cámaras se hace mediante orificios sumergidos, la energía requerida para la agitación de la masa de agua se obtiene de la pérdida de carga que se produce en la unidad. Esta puede definirse como la pérdida de presión del mismo líquido cuando se encuentra en movimiento. Esta pérdida de carga se calculó con la diferencia de altura entre una cámara y otra siguiendo el recorrido del agua:

$$h = X_{i+1} - X_i \quad (m) \quad (\text{Ec. 7})$$

¹⁹ BAQUE MACÍAS, Alberto. Op Cit. 170p.

Cálculo del gradiente de velocidad:

El gradiente de velocidad asocia la viscosidad cinemática, una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales. El técnico se encargó de medir la temperatura del agua que ingresa a la planta con la ayuda del equipo Medidor de PH WTW pH 3210 y a partir de esta se encontró la viscosidad dinámica²⁰.

Luego, se calculó la viscosidad cinemática dividiendo la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido:

$$v = \frac{\mu}{\rho} (m^2/s) \quad (Ec. 8)$$

Ya establecidos los parámetros del agua, se calculó el tiempo de retención total y pérdida de carga total con una ecuación simple de sumatoria:

$$t_r(\text{total}) = \sum t_{ri} (s) \quad (Ec. 9)$$

$$h(\text{total}) = \sum h_i (m) \quad (Ec. 10)$$

Por último, se encontró el gradiente de velocidad de la sección comprendida por las 9 cámaras de floculación²¹:

$$G = \sqrt{\frac{g * h}{v * t_r}} (s^{-1}) \quad (Ec. 11)$$

Donde g es la gravedad con un valor de $9,81 (m/s^2)$.

²⁰ [En línea] [Citado: 30, enero, 2021] Disponible en: [TABLA A-7 \(ugto.mx\)](#)

²¹ VILLANUEVA CASTILLO, Wilmer. Op Ct, 127p.

3.2 VERIFICACIÓN DE DATOS SEGÚN EL RAS

Calculados los parámetros con los que opera actualmente el floculador de la planta, se verificó si cumplen con el RAS 2000²². Reglamento que tiene por objeto señalar los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias. Para los floculadores tipo Alabama nos dice:

C.5.4.1.3 Floculador Alabama

En los floculadores Alabama debe ubicarse un codo en cada cámara para impulsar el fluido hacia arriba. Los codos deben colocarse de forma alternada, en una cámara a la derecha y en la que sigue a la izquierda; en el fondo debe dejarse un desagüe conectado a un múltiple para permitir la extracción de los lodos. En cada tabique debe dejarse una boca de drenaje.

C.5.5.1.2 Floculador Alabama

1. Número de cámaras

Se recomienda un número mínimo de 8 cámaras de floculación.

3. Gradiente de velocidad y tiempo de retención

El gradiente de velocidad debe estar entre $20s^{-1}$ y $70s^{-1}$ de acuerdo con el obtenido en la prueba de ensayo de jarras y el tiempo de detención entre 20 y 40 minutos, debe determinarse de acuerdo con las pérdidas hidráulicas²³.

²² Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000, Sección II Título C, Sistemas de Potabilización. Bogotá. 2000. 198 p.

²³ Ibid., 198 p.

3.3 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE AGITACIÓN²⁴

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Para la determinación de esta intensidad, se calculó primero la potencia requerida en el equipo a partir del gradiente de velocidad establecido anteriormente. Esta potencia está definida por la Ecuación 12:

$$P = G^2 * \mu * V * 1 * 10^7 \left(\frac{gcm^2}{s^3} \right) \quad (Ec. 12)$$

Donde V es el volumen de cada jarra perteneciente al quipo.

La potencia además está directamente relacionada con el área de las paletas, su velocidad, su coeficiente de arrastre y el peso específico del agua, que para la temperatura 24°C corresponde a $\gamma = 1 (g/cm^3)$ ²⁵. La velocidad de las paletas se calculó a partir de la ecuación:

$$\alpha = \left(\frac{2 * P}{A_p * \gamma * C_d} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (cm/s) \quad (Ec. 13)$$

Donde Cd es el coeficiente de arrastre de la paleta que se determinó halló con la relación que existe entre la Longitud de la Paleta / Ancho de la Paleta:

$$\frac{L_p}{W_p} \quad (Ec. 14)$$

Luego, se buscó el coeficiente de arrastre en la tabla establecida por Rouse²⁶:

²⁴ BARRENECHEA MARTEL, Ada. Op Cit, 73 p.

²⁵ VILLANUEVA CASTILLO, Wilmer. Op Ct, 127p.

²⁶ Ibid., p 73.

Tabla 1. Coeficiente de arrastre

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

Fuente. BARRENECHEA MARTEL, Ada, *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual 1: Teoría Tomo 1, Capítulo 4*. Lima. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), 2004. 73 p.

Si el valor calculado es un intermedio, se debe hacer una interpolación:

$$C_d = C_{di} + \frac{\left(\frac{L_p}{W_p}\right) - 1}{\left(\frac{L_p}{W_p}\right)_{i+1} - 1} * (C_{di+1} - C_{di}) \quad (Ec. 15)$$

Teniendo esto, se calculó la velocidad de las paletas (α) en unidades de (cm/s), con un área de las paletas de $17,5 \text{ cm}^2$, usando la Ecuación 13 y se hizo la conversión de unidades a rpm.

$$\omega = \frac{\alpha}{r} * \frac{60s}{1min} * \frac{1rev}{2\pi} \quad (Ec. 16)$$

De lo anterior, r representa el radio de la paleta en (cm).

3.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO Y SODA CÁUSTICA

Para la ejecución de los ensayos de jarras, se organizaron dos salidas técnicas: la primera en pro de comprender la operatividad de la planta y la segunda para realizar los ensayos de jarras. A la hora de ejecutarlos, aparte de la unidad de agitación, es necesario un cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones comprendidas (coagulación, floculación y sedimentación).

Es imprescindible conocer cuatro variables importantes, pH, turbiedad, cantidad de coagulante (sulfato de aluminio) y alcalinizante (soda cáustica) y la velocidad de las paletas. El ph y la turbiedad fueron medidos antes y después de terminada la prueba para poder evidenciar la eficiencia del proceso con la ayuda de dos equipos: Turbidímetro portátil 2100Q HACH y Medidor de PH WTW PH 3210.

La prueba de jarras se dividió en tres pasos:

1. Soluciones patrón de sulfato de aluminio y soda cáustica: Es ideal usar los mismos químicos que se emplean en el tratamiento y no con reactivos purificados en laboratorio. De acuerdo con esto, se prepararon dos soluciones, una de sulfato y otra de soda en recipientes de 500 ml con concentraciones del 1% y 0,5% respectivamente, utilizando agua destilada como solvente.

2. Cálculo de la concentración de sulfato y soda: Se pesó con la ayuda de una gramera la cantidad de sulfato sólido que descarga el equipo dosificador en 1 minuto. Luego, se calculó la concentración de coagulante a partir de la ecuación de descarga:

$$C_c = \frac{D}{Q * 0,06} \left[\frac{mg}{l} \right] \quad (Ec. 17)$$

Donde:

C_c: Concentración de coagulante

D: Descarga de coagulante sólido (g/min)

Q: Caudal de agua cruda a la entrada a la planta (l/s)

$$0,06 [=] \left(\frac{s * g}{mg * min} \right)$$

La solución de soda cáustica que se usa en el tratamiento de la planta es preparada por los operadores con una concentración del 10% y se encuentra en tanques de

almacenamiento lista para ser usada. Se midió el volumen que descarga la bomba dosificadora en un tiempo de 1 minuto y se reemplazó en la ecuación de descarga:

$$C_a = \frac{D * Cst}{Q * 0,06} \left[\frac{mg}{l} \right] \quad (Ec. 18)$$

Donde:

C_a: Concentración de soda cáustica

D: Descarga de solución alcalinizante (ml/min)

Cst: Concentración de soda cáustica en el tanque (g/ml)

3. Cantidad de solución a utilizar: Se necesita saber qué volumen de las soluciones patrón se debe aplicar a las jarras. Para esto, se calculó el volumen a partir de la ecuación de balance de masas:

$$C * V = q * Y \quad (Ec. 19)$$

Dónde:

Y: Concentración de la solución patrón $\left(\frac{mg}{l}\right)$

V: Capacidad de la jarra = 2 (l)

q: Volumen de solución patrón (ml)

C: Concentración de producto químico $\left(\frac{mg}{l}\right)$

Despejando del balance de masas tenemos:

$$q = \frac{C * V}{Y} (ml) \quad (Ec. 20)$$

El segundo ensayo de jarras se realizó para establecer la cantidad de sulfato de aluminio y soda cáustica que permitiera una mayor remoción de turbiedad, según las características (pH y turbiedad) del agua durante la visita técnica.

Para esta segunda prueba se nombró un recipiente del equipo como jarra estándar (Jarra 3), que representó el proceso actual de la planta.

A las jarras restantes se les aplicó una cantidad diferente de sulfato y soda con los cuales se pudo comparar los resultados que arrojó cada una y así se eligió la que presentó un mayor rendimiento, es decir, una mayor remoción de unidades de turbiedad.

4. RESULTADOS

4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL FLOCULADOR

El resultado del dimensionamiento de las cámaras de se evidencia a continuación:

Q: Caudal de operación = 204 (l/s)

L: Largo de la cámara = 1,8 (m)

W: Ancho de la cámara = 1,5 (m)

b: Profundidad 1 de la cámara (m)

B: Profundidad 2 de la cámara (m)

Tabla 2. Profundidad de las cámaras de floculación

FILA	PROFUNDIDAD b (m)	PROFUNDIDAD B (m)
1	2,7	2,84
2	2,85	3
3	3,01	3,19

Tabla 3. Sección libre de agua de cada cámara de floculación

CÁMARA	X (m)
1	0,35
2	0,39
3	0,42
4	0,43
5	0,43
6	0,44
7	0,45
8	0,46
9	0,47

El valor real de cada lado del trapecio se resume en la Tabla 4:

Tabla 4. Profundidad real de operación

CÁMARA	Y_b (m)	Y_B (m)
1	2,35	2,49
2	2,31	2,45
3	2,28	2,42
4	2,27	2,57
5	2,27	2,57
6	2,26	2,56
7	2,25	2,74
8	2,24	2,73
9	2,23	2,72

Ya con las dimensiones establecidas, se encontraron los valores del área y el volumen de cada cámara:

Tabla 5. Área húmeda y volumen de cada cámara

CÁMARA	ÁREA (m^2)	VOLUMEN (m^3)
1	4,35	6,53
2	4,28	6,42
3	4,23	6,34
4	4,35	6,53
5	4,35	6,53
6	4,34	6,51
7	4,49	6,74
8	4,47	6,71
9	4,45	6,68

Con la ayuda de las ecuaciones 5 y 6 se obtuvo:

$$Q_d = \frac{Q}{4} = \frac{204 \text{ (l/s)}}{4} = 51 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Tabla 6. Tiempo de retención en cada cámara

CÁMARA	t_r (s)
1	128,1
2	126
3	124,4
4	128,1
5	128,1
6	127,6
7	132,1
8	131,6
9	131

Resultado de las pérdidas de carga:

Tabla 7. Pérdida de carga total entre las cámaras

CÁMARA	h
1	
2	0,04
3	0,03
4	0,01
5	0
6	0,01
7	0,01
8	0,01
9	0,01

La temperatura del agua que ingresa a la planta fue 24°C, por tanto, la viscosidad dinámica encontrada en la tabla de propiedades del agua saturada es:

$$\mu = 9,132 * 10^{-4} \text{ (Pa * s)}$$

Luego, con la densidad del fluido se halló la viscosidad cinemática:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{9,132 * 10^{-4}(\text{Pa} * \text{s})}{1000(\text{kg}/\text{m}^3)} = 9,132 * 10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$$

Ya establecidos los parámetros del agua, se calculó el tiempo de retención total y pérdida de carga total:

$$t_r(\text{total}) = \sum t_{ri} = 1157,0294 \text{ (s)}$$

$$h(\text{total}) = \sum h_i = 0,12 \text{ (m)}$$

Po último se encontró el gradiente de velocidad de la sección comprendida por las 9 cámaras de floculación

$$G = \sqrt{\frac{9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * 0,12(\text{m})}{9,132 * 10^{-7} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) * 1157,0294(\text{s})}} = 33,3787 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Se estableció mediante la fórmula, un tiempo teórico de retención de 19.28 minutos, considerando este valor eficiente para el paso del agua en el floculador, teniendo en cuenta su tamaño y el caudal que circula. En general, el tiempo de retención se encuentra muy cerca del rango que se plantea como tiempo total de floculación descrito en el RAS (20-40 minutos), siendo esto es un indicador de la rapidez con la que trabaja la planta.

4.2 VERIFICACIÓN DE DATOS SEGÚN EL RAS 2000

Con los datos obtenidos de la evaluación del diseño del floculador que opera en la planta de tratamiento, se verificó que el gradiente de velocidad cumple con los parámetros mínimos instaurados por el RAS-2000, donde dice que debe estar entre 20s^{-1} y 70s^{-1} .

4.3 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE AGITACIÓN

Con la ecuación 12 se calculó la potencia:

$$P = 33,3787^2(s^{-1}) * 9,132 * 10^{-4}(Pa * s) * 0,002(m^3) * (1 * 10^7)$$

$$P = 20348,60938 \left(\frac{g * cm^2}{s^3} \right)$$

Luego se obtuvo el coeficiente de arrastre:

$$\frac{L_p}{W_p} = \frac{7(cm)}{2,5(cm)} = 2,8$$

Según la tabla 1 definida por Rouse²⁷, nuestro valor es intermedio por lo que hizo la interpolación:

$$C_d = 1,16 + \frac{2,8 - 1}{5 - 1} * (1,2 - 1,16) = 1,178$$

La velocidad de las paletas según la ecuación 13 fue:

$$\alpha = \left(\frac{2 * 20348,60938 \left(\frac{g * cm^2}{s^3} \right)}{17,5(cm^2) * 1 \left(\frac{g}{cm^3} \right) * 1,178} \right)^{\frac{1}{3}} = 12,5447 (cm/s)$$

Por último, se hizo la conversión de unidades a rpm.

$$\omega = \frac{12,5447(cm/s)}{3,5(cm)} * \frac{60s}{1min} * \frac{1rev}{2\pi} = 34,2266 (rpm)$$

4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO Y SODA CÁUSTICA

La concentración de coagulante según la descarga fue:

²⁷ BARRENECHEA MARTEL, Ada. Op Cit, 73 p.

$$C_c = \frac{251,6 (g/min)}{204 (l/s) * 0,06} = 20,55 \left[\frac{mg}{l} \right]$$

D: Descarga de coagulante sólido = 251,6 (g/min)

Q: Caudal de agua cruda a la entrada de la planta = 204 (l/s)

Concentración de soda según la descarga:

D: Descarga de solución alcalinizante = 740 (ml/min)

Cst: Concentración de soda caústica en el tanque = 0,1 (g/ml)

$$C_a = \frac{740 \left(\frac{ml}{min} \right) * 0,1 (g/ml)}{204 (l/s) * 0,06} = 6,166 (mg/l)$$

Volumen de solución a aplicar:

$$q(\text{sulfato}) = \frac{20,55(ppm) * 2000(ml)}{1 * 10^4(ppm)} = 4,11 (ml)$$

$$q(\text{soda}) = \frac{6,166(ppm) * 2000(ml)}{0,5 * 10^4(ppm)} = 2,46 (ml)$$

5. CONCLUSIONES

- Se determinó que el modelo diseñado para el floculador tipo Alabama satisface la demanda de la planta para un caudal máximo de 204 l/s, manejando un tiempo de retención aproximado de 20 minutos y un gradiente de velocidad de $33,4 \text{ s}^{-1}$. Estos parámetros cumplen con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), garantizando un agua de calidad para el consumo humano.
- El floculador tipo Alabama que opera en la planta se compone de 4 secciones cada una con 9 cámaras, las cuales tienen un flujo ascendente-descendente con pérdidas de carga entre 0,01 y 0,04 m que mantienen un caudal de entrada constante, lo que garantiza que el proceso se lleve a cabo. Como el flujo que ingresa está circulando de manera correcta, no hay presencia de cortocircuitos en la zona, por tanto, se considera que la velocidad ascensional es constante.
- Se comprobó que la intensidad de agitación en las jarras (velocidad de las paletas 34,22 rpm) permite la formación de floc sin que este se rompa, siendo esto un parámetro de sustentación de la eficiencia del proceso de floculación.
- Mediante el ensayo de jarras se logró observar que la concentración de alcalinizante y coagulante según la descarga de la planta, permitió la desestabilización de las partículas y por consiguiente la formación de aglomerados visiblemente más grandes. Esto llevó a que las unidades de turbiedad disminuyeran de 19 a 2 transcurrido el periodo de sedimentación, lo que indica que la planta estaba operando con las dosificaciones adecuadas para las características del agua de entrada.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el análisis de diseño desarrollado en la presente investigación sea estudiado en otras PTAP de la ESPA, con el propósito de determinar los parámetros óptimos de tratamiento que respondan a las necesidades y características propias de cada lugar.
- Se propone incluir válvulas en la evacuación de los lodos en cada uno de los compartimientos del floculador para así tener el control individual de estos.
- En general se recomienda realizar ensayos de jarras para determinar la dosificación óptima de coagulantes que se utilizan en la planta; de esta manera se debería capacitar al personal que labora dentro de la misma para que así tengan más conocimiento acerca del trabajo que realizan.

BIBLIOGRAFÍA

BARRENECHEA MARTEL, Ada, Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual 1: Teoría Tomo 1, Capítulo 4. Lima. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), 2004. 73 p.

BAQUE MACÍAS, Alberto. Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Tesis de Grado de Ingeniero Mecánico. Guayaquil.: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Mecánica Y Ciencias de la Producción. 2001. 170p.

BASANTES BARAHONA, Cristina, Alternativas de coagulantes para el tratamiento de agua en la Planta de tratamiento “El Placer” perteneciente a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Trabajo de investigación de Químico. Quito.: Universidad Central Del Ecuador, 2016. 122 p.

BETANCOUR C, Bibiana. y JIMÉNEZ G, David. Potencial zeta como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *DYNA*. 2012, vol. 79, nro. 175, pp.166-172. ISSN 0012-7353.

CAMP, T. R. y STEIN, P. C, Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, vol. 30, 1943.

CÁRDENAS GUZMÁN, Andrés y MEDINA RINCÓN, Julián, Diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua potable a escala para el laboratorio de

hidráulica de la Universidad Santo Tomás. Trabajo de Grado de Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Santo Tomás. 2017. 80p.

CARREÑO, Erika; CASTIBLANDO, Christopher, Optimización del floculador tipo Alabama en la Planta de Tratamiento de Acuanamay con la incorporación de mallas en cada una de sus cámaras. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. 2016. 63p.

CORREDOR BRISEÑO, Augusto y TRIANA HERNÁNDEZ, Javier, Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, de dispondrá en del laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. Trabajo de Grado De Ingeniero Civil. Bogotá.: Universidad Católica de Colombia. 2017. 82p.

[En línea] [Citado: 30, enero, 2021] Disponible en: [TABLA A-7 \(ugto.mx\)](#)

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Continuación de la resolución “por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.”. RESOLUCION NÚMERO 2115. 2007. 23 p.

Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000, Sección II Título C, Sistemas de Potabilización. Bogotá. 2000. 198 p.

MUÑOZ PULIDO, Sebastián y BERNAL CARRILLO, Fernando, Diseño hidráulico de una planta de potabilización de agua en la vereda de San Antonio de Anapoima. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. 2016. 135p.

RODRIGUEZ PEÑA, Carlos, Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.1995. p 115.

RODRIGUEZ SALCEDO, Francisco, Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable. Trabajo De Grado Modalidad Monografía Ingeniero Civil. Sucre.: Universidad De Sucre. 2008. 97p.

Tesis de la Uson. [En línea] Bogotá [Citado: 27, enero, 2021] Disponible en internet: URL <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/913/Capitulo3.pdf>

VILLANUEVA CASTILLO, Wilmer, Alternativas de deshidratación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis de Ingeniero Sanitario. Lima.: Universidad Nacional De Ingeniería. 2017. 127p.

YOVAL SANDOVAL, Luciano, *et al.* Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. México.: Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua, [c.a.]. 15 p.

ANEXOS

Anexo A. Registro fotográfico de la planta

Fotografía 2. Canaleta Parshall



Fotografía 3. Floculador tipo Alabama



Fotografía 4. Sedimentador



Fotografía 5. Filtro



Fotografía 6. Inyección de cloro gaseoso



Fotografía 7. Regleta de medición de caudal



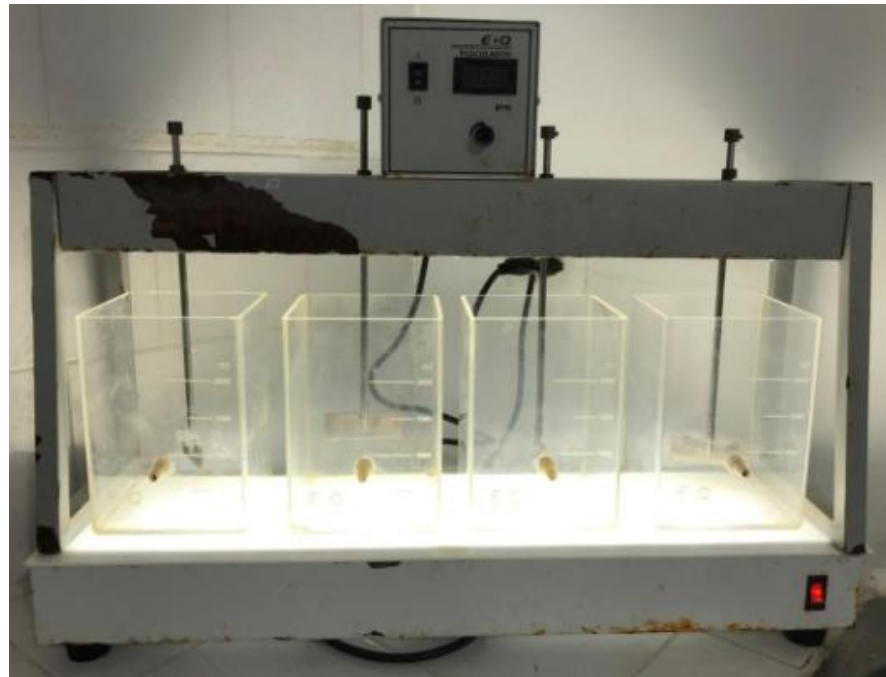
Anexo B. Ensayo de Jarras

El objetivo de este ensayo es determinar la dosis de coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales, que permita la formación de un flóculo grande compacto y pesado, que pueda ser fácilmente retenido en los sedimentadores y que no se rompa y traspase el filtro. El flóculo que se busca es el que dé una mayor remoción de turbiedad junto con todo el conjunto de procesos.

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas.

El equipo que se encuentra en el laboratorio de la planta cuenta con 4 jarras con capacidad de 2000 ml cada una y un agitador mecánico provisto de 4 paletas capaz de operar a velocidades variables de 0 a 400 revoluciones por minuto (Fotografía 8). Además, tiene un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador.

Fotografía 8. Equipo de ensayo de jarras



1.Consideraciones para el ensayo de jarras

Con la prueba de jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en la planta de tratamiento. Cuando los ensayos se efectúan en el equipo se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Análisis de laboratorio requeridos: Medición de pH y turbiedad.
- Dosis de coagulante
- Concentración del coagulante
- Sistema de adición del coagulante y del ayudante de coagulación: Con la ayuda de jeringas entre 3 y 10 ml se adiciona el volumen de cada solución.
- Dosificación del ayudante de floculación: Se usa soda cáustica como ayudante de coagulación, permite el ajuste del pH para que el sulfato de aluminio pueda reaccionar.
- Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida: El proceso de coagulación tiene establecido un gradiente de 150 rpm (velocidad de las paletas) y un tiempo de mezcla rápida de 2 minutos aproximadamente.
- Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta: Mediante el análisis que se desarrollará en el proyecto se establecerán los valores del tiempo de retención y del gradiente de velocidad del proceso de floculación.

2.Parámetros

Para el ensayo de jarras se utilizaron los siguientes parámetros.

Características iniciales del agua:

$$pH = 6,8$$

Turbiedad: 19,9 UTN

Jarra estándar:

$$C_c = 20,55 \text{ (mg/l)}$$

$$C_a = 6,166 \text{ (mg/l)}$$

$$q \text{ (sulfato)} = 4,11 \text{ (ml)}$$

$$q \text{ (soda)} = 2,46 \text{ (ml)}$$

A las jarras restantes se les aplicó una cantidad diferente de sulfato y soda con los cuales se pudo comparar los resultados que arrojó cada una y así se eligió la que presentó un mayor rendimiento, es decir, una mayor remoción de unidades de turbiedad.

Tabla 8. Dosificación de las jarras

JARRA	C_c (mg/l)	C_a (mg/l)	q (sulfato) (ml)	q (soda) (ml)
1	10	3	2	1,2
2	15	5	3	2
4	25	8	5	3,2

Para la mezcla rápida se tiene un tiempo de retención establecido de 1 min y una velocidad de 150(rpm). Para la mezcla lenta tomamos los valores calculados anteriormente:

$$t_r = 19,28 \text{ (min)}$$

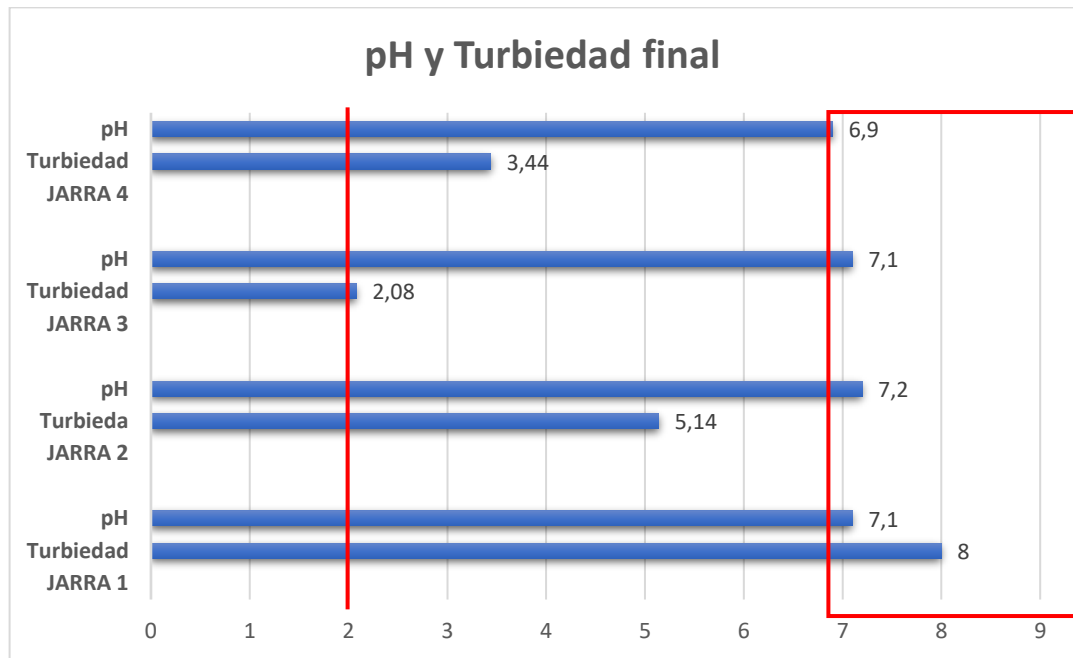
$$\omega = 34,22 \text{ (rpm)}$$

3.Resultados

Se pudo comprobar con la ayuda del ensayo de jarras la eficiencia de los parámetros con los que trabaja la unidad. La prueba arrojó un floc muy similar al obtenido en el funcionamiento normal de la planta, con una velocidad aproximada de 35 (rpm).

Se muestran los resultados del proceso de floculación que arrojó cada dosificación en las jarras según su pH y turbiedad final.

Gráfica 1. pH y turbiedad final

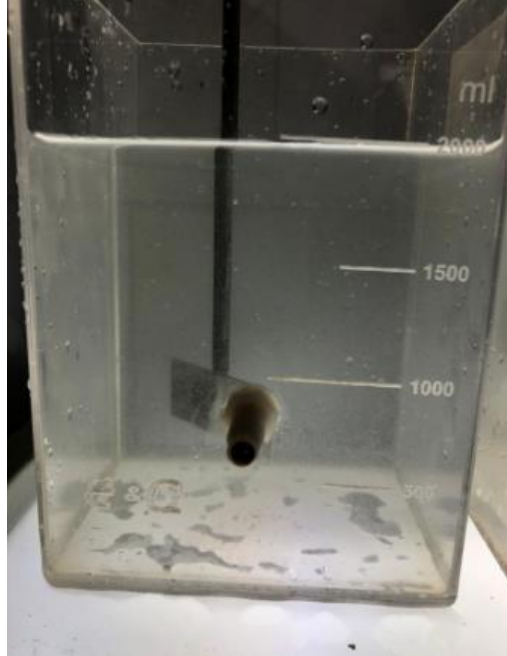


Según la resolución 2115 del 2007, la calidad del agua debe cumplir los siguientes parámetros mostrados en la gráfica anterior en color rojo: Turbiedad máxima 2 UNT y el valor de pH debe estar comprendido entre 6,9 y 9.

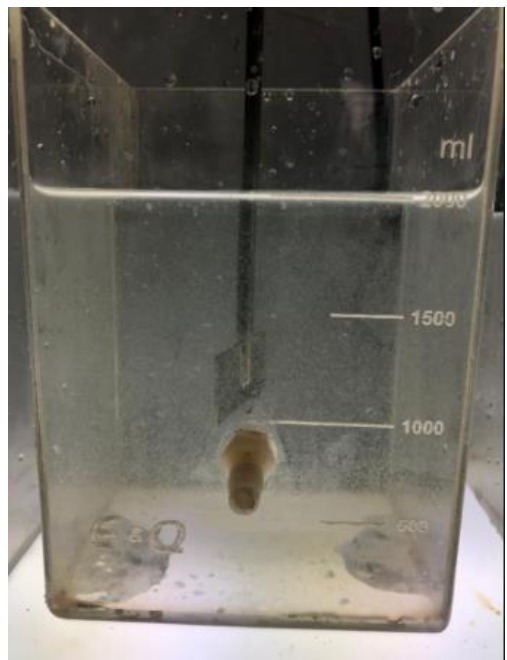
Siguiendo esto, se eligió la Jarra 3 (Anexo C) como la mejor, la cual permitió una mayor remoción de turbiedad, con un pH final de 7,1 y una turbiedad de 2,08. Esto es gracias a la formación de un floc visiblemente más grande en comparación con las otras jarras. Lo anterior indica que la dosificación con la que estaba operando la planta era eficiente, de esta manera los filtros deberían retener pocas unidades de turbiedad, permitiendo que el agua tratada saliera con una excelente calidad.

Anexo C. Registro fotográfico del ensayo de jarras

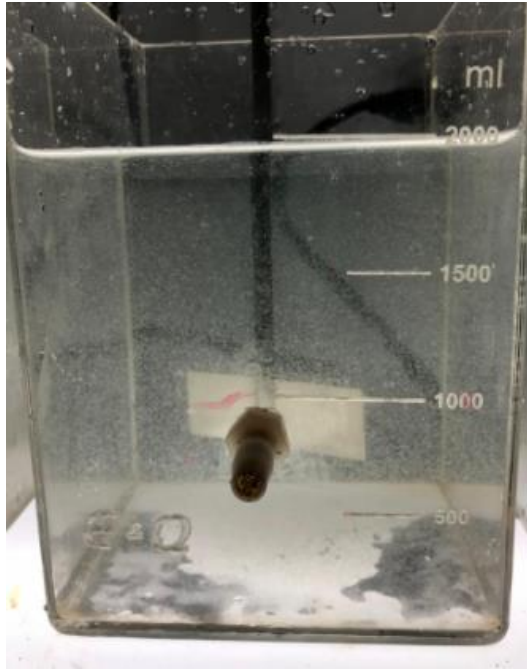
Fotografía 9. Jarra 1



Fotografía 10. Jarra 2



Fotografía 11. Jarra 3



Fotografía 12. Jarra 4

