

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO
RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

LIZETH XIMENA CAÑÓN BAUTISTA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2018

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO
RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

LIZETH XIMENA CAÑÓN BAUTISTA

Proyecto Integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director:
CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2018

Nota de aceptación:

Ing. Elizabeth Torres Gámez
Orientador

Ing. Mario Fernando Ortiz Losada
Jurado 1

Ing. Diana Milena Morales Fonseca
Jurado 2

Bogotá D. C., mayo de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrectora de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAS FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO de JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, el mejor ingeniero por hacer posible la culminación de mi carrera como Ingeniera Química.

A mi abuelito y a la vez padre Adolfo Bautista Tobián, quien me brindó su apoyo y compañía incondicional hasta el final de sus días.

A mi madre por su amor permanente y esfuerzo incansable.

A mi abuelita por motivarme diariamente e infundirme aliento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios, mi padre, mi proveedor, mi guía y mi sustento, por regalarme la oportunidad de formarme como profesional y por renovar mis fuerzas día tras día.

A mi madre, por su amor, constante esfuerzo y apoyo incondicional en este gran proyecto de vida.

A mis abuelitos, por su respaldo, compañía y ser mi ejemplo de perseverancia.

A la Fundación Universidad de América, especialmente al Departamento de Ingeniería Química, por aportar a mi formación profesional y personal durante estos años.

A la Ingeniera Elizabeth Torres Gaméz, por su orientación y colaboración en la realización del trabajo de grado.

Al Ingeniero Claudio Alberto Moreno Arias, por depositar su confianza en mí para llevar a cabo este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1 AGUAS RESIDUALES	23
1.1.1 Tratamientos fisicoquímicos para aguas residuales	24
1.1.1.1 Desinfección	24
1.1.1.2 Filtro de carbón	24
1.1.1.3 Filtro de arena	25
1.1.2 Tratamientos biológicos de aguas residuales	25
1.1.2.1 Tratamiento aeróbico	25
1.1.2.2 Biorreactor de membrana (MBR)	25
1.2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO QUÍMICO	25
1.2.1 Coagulación	25
1.2.2 Floculación	25
1.2.2.1 Factores influyentes en la coagulación y la floculación	25
1.2.3 Sedimentación	26
1.3 DESCRIPCIÓN Y FIJACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	28
1.4 CORROSIÓN	31
1.4.1 Inspección visual	31
1.4.2 Otras técnicas de inspección no destructiva	32
1.4.3 Aspectos a tener en cuenta para la correcta selección de la técnica	32
1.5 MARCO LEGAL	33
2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL AGUA RESIDUAL RECOLECTADA Y DEL PROTOTIPO	36
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO	36
2.2 DIAGNÓSTICO INICIAL	37
2.2.1 Funcionamiento	37
2.2.2 Estética y mantenimiento	38
2.2.3 Calidad y tratamiento del agua	39
2.3 ANÁLISIS DE CORROSIÓN EN LA BOMBA	39
2.3.1 Inspección visual	39
2.3.2 Prueba metalográfica	40
2.3.3 Análisis de resultados	46
2.4 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA	50
2.4.1 Identificación de parámetros a evaluar	50
2.4.2 Caracterización del agua residual doméstica	50

2.4.3 Reporte de resultados	51
2.4.4 Análisis de resultados	51
3. SELECCIÓN DE LAS MEJORAS QUE SE AJUSTEN A LA OPERATIVIDAD DEL PROTOTIPO	53
3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO QUÍMICO	53
3.1.1 Antecedentes	53
3.1.2 Selección de las alternativas de coagulantes	57
3.2 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LOS COAGULANTES	66
3.2.1 Metodología de la experimentación	66
3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	69
3.3.1 Alternativa coagulante sulfato de aluminio	69
3.3.2 Alternativa coagulante policloruro de aluminio	72
3.3.4 Análisis de resultados	78
3.4 POSIBLES ALTERNATIVAS DE MEJORA OPERACIONALES	78
3.4.1 Impulsor de la bomba	78
3.4.2 Tanque de almacenamiento	79
3.4.3 Otras mejoras	79
4. ESPECIFICACIONES DE LAS MEJORAS PROPUESTAS EN EL PROTOTIPO	80
4.1 MONTAJE Y AJUSTE DEL EQUIPO	80
4.1.1 Mejora en el funcionamiento	80
4.1.2 Mejora en la estética y el mantenimiento	82
4.1.3 Mejoras en la calidad y tratamiento del agua	82
4.2 RESUMEN DE ACCESORIOS	86
4.3 PROTOTIPO MODIFICADO	86
5. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO EN UN CASO DE ESTUDIO ESTRATO 1-3	88
5.1 COSTOS	88
5.1.1 Costos de los equipos	88
5.1.2 Costos de mantenimiento	89
5.1.3 Costos de insumos	89
5.2 COMPARACIÓN DE FLUJOS DE CAJA E INDICADORES FINANCIEROS	89
5.2.1 Flujo de caja sin proyecto	89
5.2.2 Flujo de caja	90
5.2.3 Flujo de caja con proyecto	91
5.3 ANÁLISIS DE LOS INDICADORES FINANCIEROS	93
6. CONCLUSIONES	95
7. RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97

ANEXOS

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de la sedimentación	26
Cuadro 2. Escala de pH	27
Cuadro 3. Características generales de la bomba	36
Cuadro 4. Características generales del motor	36
Cuadro 5. Especificaciones de la bomba	37
Cuadro 6. Reactivos utilizados para ataque químico	45
Cuadro 7. Síntesis de los antecedentes y sus aportes	56
Cuadro 8. Clasificación de coadyuvantes de floculación más usados	59
Cuadro 9. Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua	61
Cuadro 10. Rango óptimo de pH	64
Cuadro 11. Calificación en la matriz de selección	65
Cuadro 12. Ponderación	66
Cuadro 13. Parámetros requeridos para el test de jarras	70
Cuadro 14. Características técnicas del filtro de carbón activado	84
Cuadro 15. Materiales de la bomba dosificadora	85
Cuadro 16. Características de la bomba dosificadora	85
Cuadro 17. Resumen de accesorios	86

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Prototipo	36
Figura 2. Bomba periférica Barnes	37
Figura 3. Fundición gris	40
Figura 4. Bronce	41
Figura 5. Diagrama de proceso para la prueba metalográfica	42
Figura 6. Máquina cortadora metalográfica	43
Figura 7. Muestras	43
Figura 8. Probetas encapsuladas con bakelita	44
Figura 9. Pulidora	45
Figura 10. Aplicación de pasta de diamante a la probeta	45
Figura 11. Imágenes de las muestras del bronce del impulsor sin uso	47
Figura 12. Imágenes de la muestras N.1 del bronce del impulsor usado	48
Figura 13. Imágenes de la muestra N.2 del bronce del impulsor usado	48
Figura 14. Imágenes de las muestras de la fundición gris de la carcasa sin uso	50
Figura 15. Imágenes de las muestras de la fundición gris usada	50
Figura 16. Válvula de retención tipo clapeta oscilante	84
Figura 17. Agitador eléctrico	85
Figura 18. Regulador de pH	85
Figura 19. Filtro de carbón activado	86
Figura 20. Bomba dosificadora de coagulante	87
Figura 21. Prototipo con implementaciones	89
Figura 22. Implementaciones específicas en el tanque de almacenamiento	90

Figura 23. Microscopio metalográfico	105
Figura 24. Equipo test de jarras	106

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio.	70
Gráfica 2. Comportamiento de la demanda química de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio.	71
Gráfica 3. Comportamiento de la demanda biológica de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio.	71
Gráfica 4. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio.	72
Gráfica 5. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio.	73
Gráfica 6. Comportamiento de la demanda química de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio.	74
Gráfica 7. Comportamiento de la demanda biológica de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio.	74
Gráfica 8. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio.	75
Gráfica 9. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico.	76
Gráfica 10. Comportamiento de la demanda química con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico.	76
Gráfica 11. Comportamiento de la demanda biológica de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico.	77
Gráfica 12. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico.	77

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas	34
Tabla 2. Reporte de resultados de la caracterización	51
Tabla 3. Matriz de selección de los coagulantes	66
Tabla 4. Parámetros requeridos para los coagulantes y su dosificación	68
Tabla 5. Costo de los equipos e instrumentos	88
Tabla 6. Masa de coagulante por unidad de volumen	89
Tabla 7. Valor de reactivo por unidad de masa	89
Tabla 8. Flujo de caja diferencial	91
Tabla 9. Dosificaciones para el Sulfato de Aluminio	105
Tabla 10. Resultados de los parámetros con el Sulfato de Aluminio	105
Tabla 11. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el Sulfato de Aluminio	105
Tabla 12. Análisis de control para la réplica con Sulfato de Aluminio	106
Tabla 13. Dosificaciones para el Policloruro de Aluminio	107
Tabla 14. Resultados de los parámetros con el Policloruro de Aluminio	107
Tabla 15. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el Policloruro de Aluminio	107
Tabla 16. Dosificaciones para el Cloruro Férrico	108
Tabla 11. Resultados de los parámetros con el Cloruro Férrico	108
Tabla 12. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el Cloruro Férrico	108

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Equipos	102
Anexo B. Resultados de tratabilidad en el test de jarras: coagulación con sulfato de aluminio	104
Anexo C. Resultados de tratabilidad en el test de jarras: coagulación con policloruro de aluminio	106
Anexo D. Resultados de tratabilidad en el test de jarras: coagulación con cloruro férrico	107

GLOSARIO

AGUA CONTAMINADA: es aquella que contiene sustancias tóxicas y bacterias y por lo tanto no debe ser usada.

AGUA CRUDA: es aquella que no ha recibido ningún procedimiento de potabilización proveniente de ríos, quebradas, etc.

AGUA POTABLE: es aquella que no presenta ningún riesgo para el consumidor ni produce daño en bienes materiales.

AGUA TRATADA: es aquella que ha tenido un tratamiento de una planta de potabilización, para eliminar microorganismos e impurezas a través de desinfectantes y coagulantes.

ANAEROBIO: proceso biológico u organismo que puede subsistir sin la presencia de oxígeno.

AUTODEPURACIÓN: proceso de recuperación de propiedades físicas y biológicas del agua, donde los compuestos orgánicos se diluyen y se transforman a través de descomposición bioquímica.

BIOREACTOR DE MEMBRANA (MBR): tecnología que permite la degradación biológica y la separación de la materia orgánica existente en aguas residuales.

BOMBA: dispositivo mecánico que tiene como función transportar a un fluido líquido de un lugar a otro o para presurizarlo.

CONTAMINACIÓN NATURAL: el agua lluvia al caer recoge diferentes partículas del aire y una vez en el suelo arrastra materia orgánica e inorgánica; generando erosiones y derrumbes.

CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL: este tipo de contaminación se presenta por aguas residuales domésticas, residuos sólidos o basuras; como también se genera por la industria y productos agrícolas.

DEMANDA HÍDRICA: captación de agua desde su fuente natural para suplir necesidades de consumo o de producción.

DESARROLLO SOSTENIBLE: propuesta para lograr la satisfacción de las necesidades de la sociedad actual sin generar daño para las generaciones futuras.

ELECTO VÁLVULA: dispositivo que permite el paso de un líquido y la regulación del caudal del mismo, por medio de un pulso de corriente.

FILTRO: dispositivo que retiene partículas sólidas presentes en un líquido.

RECICLAJE DE AGUA: proceso que permite el almacenamiento, el tratamiento y la reutilización de aguas grises.

RESILIENCIA: capacidad que tiene un sistema o elemento ambiental para recuperar el equilibrio después de sufrir algún tipo de contaminación.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL: desarrollar alternativas de energía, teniendo como principio la conservación de los recursos naturales.

RESUMEN

El presente proyecto de grado consiste en el desarrollo de una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, ubicada en la ciudad de Bogotá D.C; la realización del mismo inicia con el diagnóstico del estado actual del agua residual recolectada y del prototipo, donde se identifican los parámetros a evaluar, tomando como base la Resolución 1207 de 2014 y la Resolución 631 de 2015. Se procede a una caracterización del agua residual doméstica recolectada. Las muestras de aguas grises residuales generadas en la ducha se toman en un apartamento estrato 3. La caracterización del agua incluye la cuantificación de los siguientes parámetros: pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables, grasas y aceites, compuestos semivolátiles fenólicos y sustancias activas al azul de metileno. Al tener los resultados de la caracterización se analizan los indicadores críticos del efluente residual, para seleccionar un tratamiento químico que permita mejorar la calidad del agua y la mitigación de olores.

De acuerdo al diagnóstico obtenido, se seleccionan las mejoras que se ajustan a la operatividad del prototipo, a través de un desarrollo de experimentos, donde las operaciones unitarias que intervienen en el proceso son: coagulación, floculación, sedimentación y filtración; la experimentación se realiza por medio de un test de jarras, el cual permite evaluar el comportamiento del agua tratada en el sistema de reciclaje del recurso hídrico residual doméstico. En cuanto a los aspectos de mantenimiento y funcionamiento se plantean alternativas de mejora para las anomalías detectadas.

Para el aspecto estético y operacional, se realiza una inspección visual y prueba metalográfica de los componentes de la bomba, se modifican las dimensiones y los materiales del tanque de almacenamiento, la inclusión de nuevos elementos y equipos en el prototipo, debido a los cambios realizados en el proceso del tratamiento del agua.

Con la selección y las especificaciones técnicas de las mejoras en el prototipo se analiza financieramente la implementación del mismo en un estudio de caso para un apartamento estrato 1 a 3, vivienda de interés social, determinando los flujos de caja con proyecto y sin proyecto; y evaluando los indicadores financieros como lo son VPN, TIR y Beneficio/ Costo, con el fin de calcular el periodo de recuperación de la inversión del proyecto.

INTRODUCCIÓN

Las principales fuentes hídricas en la ciudad de Bogotá son Chingaza, la cuenca del río Bogotá y del río Sumapaz; teniendo como red de calidad hídrica de Bogotá al canal Torca, Salitre, Río Fucha, Río Tunjuelo y Río Bogotá, para lograr así el abastecimiento de la ciudad.

La tasa de crecimiento demográfico para el 2020 será del 22.52% en la ciudad de Bogotá¹, lo cual afecta en gran manera el suministro necesario para la ciudad. Esta afectación en el suministro de agua también está relacionada con el cambio climático, como también el desperdicio de agua potable en actividades que no requieren este tipo de agua, principalmente actividades como descargas de residuos biológicos humanos o la limpieza de pisos y otras superficies.

El aumento en el suministro de agua potable en Bogotá influye negativamente en el bienestar de una población que va creciendo exponencialmente y que en un futuro cercano exista una crisis de disponibilidad de agua potable; por lo tanto es necesario tanto crear conciencia en la sociedad y establecer reciclaje y reutilización de aguas grises, en las actividades que lo permitan.

Una adecuada solución para esta problemática es la implementación de hábitos o en su defecto tecnologías de reutilización de aguas grises, por medio de recuperadores o sistemas de aguas de lavadoras, duchas y lavamanos o la simple recolección de estas. Sin embargo la recolección y/o almacenamiento de agua, genera problema de olores.

En la Fundación Universitaria Los Libertadores se diseñó un prototipo para un sistema de reutilización de aguas grises como trabajo de grado en el 2012; no obstante, el prototipo reutilizador de aguas grises, ha enfrentado problemas como la generación de olores en las aguas recolectadas, deterioro del sistema de bombeo, así como falencias estéticas y operacionales.

El no llegar a implementar en un mediano plazo reutilizadores de aguas grises incrementaría la tendencia en la descarga de agua potable en sanitarios. Esto se refleja en alzas de las tarifas del servicio, costos de mantenimiento de equipos, además de afectaciones en cuerpos hídricos.

Para la implementación del prototipo es necesaria la correcta reutilización de aguas grises y la mitigación de olores de las mismas, incluir un tratamiento químico, realizar una mejora en la calidad del agua recolectada, mejoras en la

¹ MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Población y principales indicadores demográficos de Colombia. [En línea], [consultado el 23 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: https://www.imebu.gov.co/web2/documentos/observatorio/demografía/indicadores_demograficos_2020.pdf

estética y mantenimiento del equipo, como también en los aspectos de funcionamiento del mismo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del agua residual recolectada y del prototipo.
- Seleccionar las mejoras que se ajusten a la operatividad del prototipo de acuerdo al diagnóstico.
- Establecer las especificaciones de las mejoras propuestas en el prototipo.
- Realizar el análisis financiero de la implementación de la versión mejorada del prototipo en un estudio de caso estrato 1-3.

1. GENERALIDADES

1.1 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son las aguas usadas y los sólidos introducidos en cloacas y transportados por medio del sistema de alcantarillado; estas pueden ser clasificadas según su uso y tratamiento como aguas negras y aguas grises.

Las aguas negras son aguas con alta carga contaminante y por lo tanto no son aprovechables, se generan en el uso de lavaplatos, debido a los residuos de alimentos; también se generan en la descarga de sanitarios. Para el caso específico de los sanitarios, estas aguas contienen heces y orina y por lo tanto sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes totales, por lo que deben ser desechadas; mientras que las aguas grises tienen baja carga contaminante y son aprovechables, se producen en la ducha, el lavamanos y la lavadora; este tipo de agua contiene demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos, fósforo y grasas. La reutilización de aguas grises al sistema consiste en el aprovechamiento de estas aguas, para ser empleadas donde no es indispensable el uso de agua potable.

A su vez las aguas residuales pueden ser domésticas o industriales. Las aguas residuales domésticas son aquellas procedentes de viviendas o zonas comerciales. Las aguas residuales industriales son tóxicas y se originan en actividades industriales, tales como textil, química, alimentaria, entre otras.

Para el almacenamiento de aguas grises es necesario el uso de tecnologías, para lograr la reducción de bacterias y otros microorganismos que se multiplican a gran escala por el estancamiento del agua.

Dichas tecnologías pueden ser de carácter fisicoquímico, el cual permite la desinfección y filtración para eliminar los contaminantes presentes; o de carácter biológico, donde se utiliza aireación y biorreactores de membrana.

1.1.1 Tratamientos fisicoquímicos para aguas residuales. A continuación se explican las tecnologías con tratamiento fisicoquímico para aguas residuales.

1.1.1.1 Desinfección. Es una de las principales técnicas del tratamiento de aguas residuales, donde se hace uso principalmente de cloro, aunque este compuesto genera cierta toxicidad. Esta etapa del proceso es indispensable para matar los microorganismos presentes en el agua.

1.1.1.2 Filtro de carbón. Consiste en absorber olores y colores de diferentes componentes, esta técnica logra la filtración de diferentes compuestos orgánicos, tales como el cloro. Sin embargo, no es efectiva para la filtración de elementos como el sodio y los nitratos; también tiene como desventaja una corta vida útil.

1.1.1.3 Filtro de arena. Otra técnica de tratamiento es llamada filtro de arena, donde los bancos de arena son superficies ásperas encargadas de absorber los contaminantes presentes en las aguas grises. Tiene como ventaja un bajo costo tanto de operación como de mantenimiento y como desventaja no eliminar completamente agentes patógenos, así como también presenta atascamientos e inundaciones.

Otros sistemas incluyen filtros de carbón activado, filtros de arcilla y dispositivos para la desinfección, como lo son la cloración y purificación por medio de rayos UV.

1.1.2 Tratamientos biológicos de aguas residuales. A continuación se tiene una breve explicación de las tecnologías con tratamiento biológico de aguas residuales.

1.1.2.1 Tratamiento aeróbico. Se basa en la introducción de aire en el agua dando lugar a la formación de burbujas para lograr la disolución del oxígeno y activar las bacterias existentes, dando lugar a la reducción de los compuestos tóxicos.

Este tratamiento mejora la calidad y posibilita mayor tiempo de depósito. No obstante el procedimiento es complejo y no retira todos los agentes patógenos e implica altos costos.

Los sistemas de aguas grises que utilizan tratamiento aeróbico biológico pueden estar elevados o ubicados subterráneamente, lo cual depende de la cantidad de agua gris a tratar; como el caso Nubian Oasis, una compañía australiana que trata de 1.000 a 50.000 litros diariamente.

Esta tecnología comprende filtros de membrana, con el fin de la remoción de contaminantes, virus y bacterias; por medio del tratamiento biológico. Los tratamientos aeróbicos pueden incluir láminas de plástico corrugadas y así favorecer el crecimiento de bacterias. Otros tratamientos puede incorporan discos rotatorios a la entrada y salida del agua.

1.1.2.2 Biorreactor de membrana (MBR). Se fundamenta en la unión de tratamiento biológico, la filtración y el consumo de contaminantes orgánicos; tiene la capacidad de obtener diferentes calidades de agua gris y de almacenarla durante más tiempo, aunque requiere de altos costos y la técnica es compleja.

Las membranas se componen de fibras con vacío y láminas planas. La tecnología Copa MBR incluye membranas de placa plana Kubota. Los panales de membrana tienen un poro de 0.1 a 0.4 micras, permitiendo la filtración de pequeñas partículas y esporas como por ejemplo bacterias y protozoos como la *giarda* y la *cryptosporidia*, los cuales generan problemas emergentes en el agua.

Los tratamientos biológicos con biorreactores de membrana (MBR), se utilizan desde 1990. El biorreactor de membrana inició cuando la separación de la membrana se sumergió en el biorreactor.

Este biorreactor necesitaba de alta presión para la filtración. La membrana inmersa depende de la burbuja de aireación para la mezcla del efluente y evitar la acumulación en los poros de la membrana. El requerimiento del sistema sumergido puede ser dos veces más bajo que los biorreactores anteriormente usados. La aireación es un parámetro fundamental para el desempeño hidráulico y biológico.²

1.2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO QUÍMICO

1.2.1 Coagulación. Etapa donde ocurre la desestabilización del coloide generado por la compresión de la doble capa eléctrica u otros mecanismos, es decir por reducción de fuerzas que tienden a separarlas. Este proceso conduce a la formación de partículas de tamaño microscópico³.

1.2.2 Floculación. Formación de partículas sedimentables a partir de partículas desestabilizadas microscópicas. Se diferencia de la coagulación, en que la fuerza primaria es de tipo electrostático o interiónico, en cambio la floculación ocurre por un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos⁴.

Durante este proceso las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto, dicho aumento se debe a la adición de sustancias químicas en los procesos de precipitación. La formación de flóculos sucede por una agitación moderada, aumentando el contacto entre las partículas. La agitación no debe ser exagerada, al final del tanque debe ser menor que al principio, porque puede llegar a destruir los flóculos⁵.

1.2.2.1 Factores influyentes en la coagulación y la floculación

- Tipo de coagulante
- Cantidad de coagulante
- Características de los coloides
- Composición química del agua
- pH del agua

² MORENO, Claudio. Valoración cuantitativa de la reducción en la demanda de agua potable. Colombia: Universidad de Manizales, 2014. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/.../271195063_VALORACION_CU...

³ CATALÁN. Tratado del agua: control de la contaminación y depuración. Tema 14: Floculación y Coagulación. 2005, p. 107. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: ocw.bib.upct.es/mod/resource/view.php?id=5698&redirect=1

⁴ *Ibíd.*, p. 107

⁵ CATALÁN. *Op. Cit.* p. 108

- Tiempo de contacto del agua con los reactivos
- Temperatura del agua
- Fuerza de agitación
- Presencia de núcleos⁶

1.2.3 Sedimentación. La sedimentación es una operación donde los componentes del agua se separan en fase sólida, formada por sólidos suspendidos, con mayor peso que el agua, depositados en el fondo por la fuerza gravitacional; la otra fase es líquida, compuesta por agua y otras disoluciones. La sedimentación se puede clasificar de acuerdo a la naturaleza y la concentración de las partículas, y al proceso realizado anteriormente en el agua residual.⁷

Este proceso favorece el depósito de las partículas suspendidas en el agua, partículas formadas en algún tratamiento químico como floculación y/o coagulación.⁸

La clasificación de la sedimentación se muestra en el Cuadro 1.

⁶ GLYNN Henry y HEINKE, Gary W. Libro de Ingeniería ambiental. Contaminación y tratamiento de aguas residuales. p. 98. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.u-cursos.cl/usuario/.../mi_blog/r/ingenieria-ambiental_glynn.pdf

⁷ Ibíd., p.98

⁸ CATALÁN. Op. Cit. p. 97

Cuadro 1. Clasificación de la sedimentación

Sedimentación	
Discreta	Floculante
<p>Las partículas mantienen su individualidad y no varían en forma ni densidad. Se fundamenta en la acción de la fuerza de empuje de Arquímedes y la otra de rozamiento, logrando que la partícula tenga velocidad constante, llamada "velocidad crítica". Los sólidos en suspensión tienen una masa relativamente grande y no muy concentradas. Se produce en desarenadores y parcialmente en tanques de decantación primaria, también en precipitación química, si no existe tratamiento primario⁹.</p>	<p>Permite la aglomeración de las partículas, modificando el tamaño de las mismas y la velocidad de sedimentación. Es un tratamiento realizado en las aguas residuales domésticas e industriales, como en la industria de la pulpa y el papel. Corresponden a partículas mucho más pequeñas que en la sedimentación discreta, no hay excesiva concentración de sólidos y a los procesos de coagulación. Se produce por lo general en los tanques de decantación primaria, en las zonas superiores de los decantadores secundarios y en los tanques de sedimentación química.¹⁰</p>
Zonal	Por compresión
<p>Se realiza en las aguas con lodos activados suspendidos, también en aguas floculadas con sulfato de aluminio, si la concentración de sólido es mayor a los 500mg/L. Las partículas se sedimentan uniformemente, manteniendo la misma posición relativa; por encima de la región de sedimentación se produce agua relativamente clara. En la región de sedimentación, las partículas sedimentan como partículas discretas, es decir, sin interactuar entre ellas, o como partículas floculadas, en otros términos sedimentación con obstrucción. Zonas que se separan por una interfase. Después se forma una capa de partículas con interacciones entre sí, en el fondo del recipiente. La concentración de sólidos disminuye ascendentemente, de igual forma ocurre con las fuerzas de interacción de las partículas.¹¹ Se produce en los tanques de decantación secundaria, posteriores al tratamiento biológico y en los tanques de sedimentación de la precipitación química.¹²</p>	<p>Consiste en la formación de una estructura de partículas sedimentadas y se genera por compresión de esa estructura. La compresión ocurre por el peso de las partículas que sedimentan desde la superficie a los fangos del tanque. A mayor compresión, menor volumen de fangos obtenidos; la compresión se realiza en las capas inferiores de la masa del fango. Se produce poco en los tanques de tratamiento primario y por lo general en los tanques de sedimentación procedentes de la precipitación química y en los de proceso secundario.¹³</p>

⁹ GLYNN Henry y HEINKE, Gary W.Op. Cit.p.22

¹⁰ Ibíd.

¹¹ CATALAN. Op. Cit. p.98 y 99

¹² Ibíd., p. 98

¹³ GLYNN Henry y HEINKE, Gary W.Op. Cit. p.99

1.2.3.1 Aplicaciones de la Sedimentación. Este tratamiento tiene aplicación tanto en potabilización de aguas como en aguas residuales domésticas e industriales¹⁴. Las principales aplicaciones se nombran a continuación:

-Decantación de lodos en la depuración de aguas residuales domésticas.

-Decantación previa al tratamiento de aguas potables.

-Decantación de precipitados en el acondicionamiento de agua para la industria (Reducción de dureza de aguas)¹⁵.

1.3 DESCRIPCIÓN Y FIJACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

-pH: Es el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de iones hidrógeno.

$$pH = -\log[H^+]^{16}$$

Este valor indica si una sustancia es ácida, neutra o básica. El pH tiene relación con la concentración de protones en el agua. El agua H₂O se disocia en protones (H⁺) e iones hidroxilo (OH⁻).¹⁷

La escala de pH es un rango de 0 a 14, que permite la siguiente clasificación¹⁸.

En el Cuadro 2 se encuentra la clasificación de este parámetro, de acuerdo al valor del mismo.

Cuadro 2. Escala de pH

Valor de pH	Clasificación
pH = 7	Aguas neutras, ni ácidas ni alcalinas
pH > 7	Aguas alcalinas o básicas
pH < 7	Aguas ácidas
pH > 9	Muy alcalinas o fuertemente alcalinas
pH < 5	Muy ácidas

Fuente. SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Operación potabilización. Biblioteca Sena.

¹⁴ Ibíd., p. 100

¹⁵ CATALAN. Op. Cit. p. 100

¹⁶ BROWN, Teodoro. Química central. pág. 621. . [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <https://es.slideshare.net/DiegoIFV/quimica-la-cienciacentral>

¹⁷ HIDRITEC. Parámetros de caracterización del agua. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.hidritec.com/hidritec/parametros-de-caracterizacion-del-agua>

¹⁸ SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Operación potabilización. Biblioteca Sena. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/17651/operacion_potabilizacion/index.html#

De esta manera se tiene que, una sustancia es neutra cuando el número de átomos de hidrógeno (H^+) y de hidroxilos (OH^-) es igual. Si el número de átomos de hidrogeno es mayor al número de átomos de hidroxilos, la sustancia se considera ácida. Si por el contrario el número de átomos de hidroxilos es menor al número de átomos de hidrógeno, es una sustancia alcalina¹⁹.

-Demanda Química de Oxígeno (DQO): cantidad de oxígeno que se requiere para que ocurra oxidación química de materia orgánica e inorgánica en una muestra de agua,²⁰ en medio de las siguientes condiciones; agente oxidante, temperatura y tiempo.²¹ Cuyas unidades son miligramos de oxígeno diatómico por litro ($mg\ O_2/l$).

La demanda química de oxígeno es mayor a la demanda bioquímica de oxígeno, debido al hecho de que una sustancia se oxide químicamente no quiere decir que se oxide biológicamente²², es decir representa no solo la materia orgánica biodegradable, sino la no biodegradable.²³

-Demanda Biológica de Oxígeno, (DBO_5): es la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para degradar la materia orgánica biodegradable existente en agua residual. Este parámetro indica la cantidad de contaminación orgánica. Este valor hace referencia a la degradación de materiales orgánicos carbónicos (microorganismos aerobios), nitrógeno oxidable (nitrosomas y nictrobacter), y los compuestos químicos reductores (aquellos que se oxidan con el oxígeno disuelto.²⁴ Se expresa como mgO_2/L .

-Sólidos Suspendidos Totales, (SST): el promedio del total de sólidos en suspensión (SST) en el recurso hídrico es la suma de los valores del total de sólidos en suspensión (SST) por punto de muestreo dividido por el número de puntos de muestreo. Los sólidos suspendidos totales corresponden al material particulado en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual, estos

¹⁹ DIGESA-MINSALUD. Parámetros organolépticos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf

²⁰ *Ibid.*, p. 12

²¹ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES –IDEAM-. Demanda química del Oxígeno. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.ideam.gov.co/documents>

²² DIGESA-MINSALUD. Op. Cit. p. 12

²³ HIDRYTEC. Tratamiento de aguas residuales y demanda química del oxígeno. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-aguas-residuales-y-disminucion-de-dqo>

²⁴ DIGESA-MINSALUD. Op. Cit. p. 12

sólidos hacen referencia a la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio²⁵.

-Sólidos Sedimentables, (SSED): son la porción de los sólidos suspendidos cuyo tamaño y peso es suficiente para que sedimenten en un periodo de tiempo definido.²⁶

También se definen como sólidos que tienen mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos por las fuerzas de arrastre o turbulencias. Estos sólidos se precipitan en el fondo cuando las fuerzas y velocidades cesan y el agua se encuentra en reposo. Se eliminan generalmente por métodos de filtración.²⁷ Se expresa en mg/L.

-Grasas y Aceites: se definen en los “Métodos Estándar” como “cualquier material recuperado en la forma de una sustancia soluble en el solvente”. El solvente que se recomienda es triclorofluoreto, pero debido a problemas ambientales con los clorofluorocarbonos, se usan solventes alternativos.²⁸

Se caracterizan principalmente por ensuciar las instalaciones de tratamiento, pequeñas cantidades en el cauce receptor ocupan grandes superficies debido a la tensión superficial de estas sustancias. Además, biológicamente impiden la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a la masa del líquido, lo cual se debe a la baja solubilidad del oxígeno en los aceites y las grasas. La luz incidente sobre la superficie es menor.²⁹

-Compuestos semivolátiles fenólicos y fenoles totales: los fenoles y/o sus derivados, son sustancias derivadas del fenol (hidroxibenceno o bencenol).

Los derivados fenólicos más importantes en el análisis de aguas son: Fenol, monoclorofenol, diclorofenol, triclorofenol, pentaclorofenoles, cresoles, naftoles. El grupo fenólico posee acidez débil, por lo que se le agrupa químicamente junto a los ácidos carboxílicos y a los taninos, haciendo parte del grupo de los ácidos orgánicos.

²⁵ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. diagnóstico ambiental del manejo de vertimientos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf.

²⁶ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. La contabilidad nacional verde en Colombia y su contribución con el desarrollo de indicadores ambientales económicos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MMA-0034/MMA-0034-CAPITULO5.pdf>

²⁷ HIDRYTEC. Op. Cit. p. 11

²⁸ DIGESA –MINSALUD. Op. Cit. p. 12

²⁹ AULA VIRTUAL. Caracterización de las aguas residuales. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/Demos/Simulacion/modulos/Curso/uni_03/U3C3S5.htm#Anchor6

Las concentraciones naturales de estos compuestos son generalmente inferiores a 1 µg/l y los más identificados en la evaluación de este parámetro son: fenol, cresol y los ácidos siríngico, vainílico y phdroxibenzoico. En rellenos sanitarios, su concentración total es aproximadamente 20 mg/L.³⁰

-Sustancias Activas al Azul de Metileno: también llamados agentes tensoactivos. Son sustancias formadas por moléculas de gran tamaño, ligeramente solubles en agua y generan espuma en las plantas de tratamiento. En las aguas residuales, la espuma se debe a la presencia de detergentes³¹.

-Nitrógeno Total (TN): es una medida de todas las formas de nitrógeno existentes en una muestra de agua. El nitrógeno total corresponde a la suma de los valores de nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal. El gas nitrógeno disuelto en agua no es incluido, ni el nitrógeno orgánico. Se expresa como mg N/L.

El nitrógeno total consiste en formas inorgánicas y orgánicas. Las formas son: nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), el amoníaco (NH_4^+) ionizado, no incluye el amoníaco no ionizado (NH_3), y gas del nitrógeno (N_2). Los aminoácidos y las proteínas son formas orgánicas naturales de nitrógeno.

El nitrito por lo general no afecta negativamente el agua, no obstante, una alta cantidad de oxígeno disponible en el agua para que se oxide, el nitrito se transforma en nitrato, y este compuesto contamina los acuíferos de las aguas tanto subterráneas como superficiales³².

1.4 CORROSIÓN

Deterioro lento y paulatino de un material metálico por la acción química o electroquímica del ambiente que lo rodea, acelerada por condiciones de proceso, generando reacciones de oxidación.³³

1.4.1 Inspección visual. La detección de la corrosión se relaciona con el término “inspeccionar”, lo cual consiste en identificar y evaluar la corrosión, sin implicar el tratamiento de la misma.

Las inspecciones deben ser cumplidas analizando condiciones ambientales, el nivel de protección aplicada y las exigencias y responsabilidades mecánicas o estructurales de los materiales con los cuales están fabricados los componentes y estructuras.

³⁰ DIGESA- MINSALUD. Op. Cit. p.13

³¹ AULA VIRTUAL. Op. Cit. p. 13

³² DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Op. Cit. p.13

³³ VILA CASADO, Gustavo. Corrosión. electroquímica – mecanismos y métodos de control. Bogotá: Universidad Nacional, unidad de publicaciones. Facultad de Ingeniería, 1990, p. 3

Para su identificación y valoración, la detección se realiza por medio de procedimientos no destructivos. La identificación de la corrosión es la determinación cualitativa del tipo de corrosión, su origen y mecanismos de reacción. Como también la determinación del grado de corrosión presentada en el material a estudiar.

La inspección comprende la visual directa como la visual remota, la remota se hace a través de equipos o instrumentos, como los boroscopios, videoscopios y flexoscopios. Los anteriores equipos o instrumentos permiten la inspección visual en áreas donde no hay acceso para la inspección visual directa, haciendo uso de sondas que recorren el interior de las estructuras, y así mostrar al inspector el estado interno de la superficie de los materiales.

1.4.2 Otras técnicas de inspección no destructiva

-Corrientes de Eddy: Funciona a partir del principio de conductividad superficial del material, la cual varía con la presencia de productos de corrosión, reportando el deterioro.

-Radiografía: se realiza por medio de un negatoscopio, donde se observa un tono de gris diferente al resto del material sin presencia de productos de corrosión. Técnica basada en la absorción diferencial de radiación penetrante.

-Ultrasonido: utiliza la velocidad del sonido en materiales, para detectar la presencia de agentes corrosivos, por efecto del cambio de densidad una misma frecuencia.

1.4.3 Aspectos a tener en cuenta para la correcta selección de la técnica

- Acceso a la superficie a inspeccionar
- Propiedades del material
- Geometría de la pieza, componente o estructura a inspeccionar
- La luminosidad al momento de inspeccionar
- Condición superficial del material
- Presencia de materiales que pueden intervenir en la inspección
- Confiabilidad de los equipos o herramienta a utilizar a través de la calibración y cuando sea necesario de los patrones a utilizar para la calibración.
- Limpieza de la zona a inspeccionar³⁴

³⁴ ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Juan Manuel. Estructuras metálicas y materiales compuestos. Inspector en pruebas no destructivas, conferencista y columnista en pinturas y corrosión. 1990, p. 34-36. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: www.inpralatina.com › Control de Corrosión.

1.4.4 Metalografía. La metalografía es la rama de la metalurgia encargada de estudiar la estructura y los constituyentes de un metal o aleación, y su relación con las propiedades físicas y mecánicas, como también la composición química del material.³⁵

Por medio del ensayo metalográfico es posible determinar características, tales como el tamaño de grano, distribución de las fases de la aleación, inclusiones no metálicas (sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias), las cuales afectan las propiedades mecánicas del metal. Por esta razón, esta experimentación permite el diagnóstico y pronóstico del material de estudio.

La prueba de metalografía se puede realizar antes de que la pieza sea utilizada, con el fin de prevenir inconvenientes durante su uso, y/o también después de su uso, es decir, piezas deformadas, rotas o con desgaste, para así determinar la causa del mismo³⁶.

1.5 MARCO LEGAL

Para la realización del proyecto de grado propuesto se requiere conocer la normatividad actual para aguas residuales domésticas, reutilización del recurso hídrico y uso eficiente y ahorro del agua; para así lograr el cumplimiento de la misma.

-Decreto 3930 de 2010. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, el cual reglamenta los diferentes usos, del recurso hídrico y la generación de vertimientos a Cuerpos de Aguas Superficiales, Subterráneas y Marinas así como también a Sistema de Alcantarillado Público.³⁷

-Resolución 631 de 2015. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en vertimientos a Cuerpos de Aguas Superficiales y a Sistema de Alcantarillado Público, tiene como objeto la regulación de las condiciones generales para el Saneamiento del Medio Ambiente, dando a conocer otras disposiciones para el control y la disminución de la contaminación hídrica a nivel nacional.³⁸

³⁵ PUCP. Metalografía: Ensayos metalográficos conocimiento de materiales. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: icp.pucp.edu.pe/formación/continua/analisis-metalografico/

³⁶ Ibíd.

³⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA. Decreto 3930 de 2010. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.ins.gov.co:81/normatividad/Decretos/DECRETO%203930%20DE%202010.pdf>

³⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA. Resolución 631 de 2015. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_0631_2015.htm

-Resolución 1207 de 2014. Disposiciones relacionadas con los diferentes usos de aguas residuales tratadas. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece el reúso del agua residual como una estrategia para el ahorro y uso eficiente del recurso hídrico; lo cual constituye la sostenibilidad ambiental, la reducción de los impactos negativos asociados con la extracción y descarga a cuerpos de aguas naturales. El reúso no aplica como fertilizante o acondicionador de suelos.³⁹

-Ley 373 de 1997. Uso eficiente y ahorro de agua. Mediante la presente ley El Congreso de Colombia regula todo proyecto y/o acción elaborado por las entidades encargadas y relacionadas con el recurso hídrico. Se decretan aspectos como el contenido del programa de uso eficiente y ahorro del agua, la reducción de pérdidas, la reutilización obligatoria del agua, los consumos básicos y máximos e incentivos tarifarios, las campañas educativas y de concientización, los programas docentes, la posible nueva tecnología de bajo consumo y la protección de zonas de manejo especial, es decir la protección de fuentes hídricas.⁴⁰⁴¹

El Art. 8 de la Resolución 631 de 2015 establece los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) de los parámetros fisicoquímicos, valores especificados en la Tabla 1.

³⁹ _____. Resolución 1207 de 2014. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

⁴⁰ _____. Resolución 631 de 2015. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambientes_0631_2015.htm

⁴¹ CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 373 de 1997. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf

Tabla 1. Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES. (CARGA ≤ A 625,00 kg/DÍA DBO5)
Generales		
pH	Unidades de pH	6.00 a 9.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/LO2	180.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/LO2	90.00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90.00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	5.00
Grasas y Aceites	mg/L	20.00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte

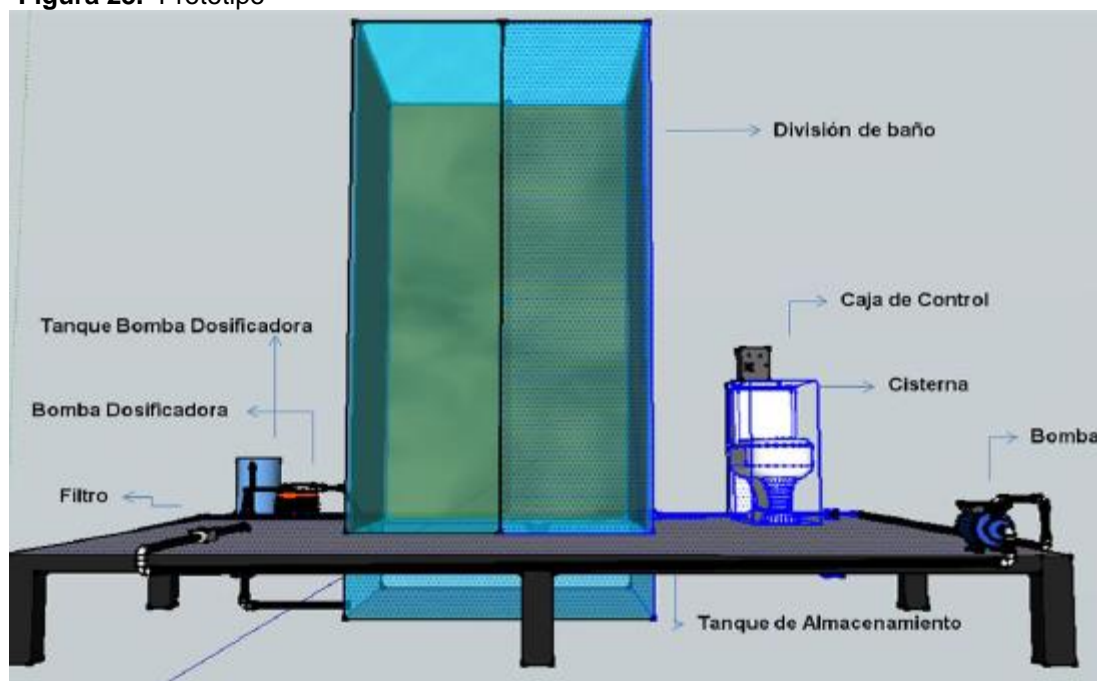
Fuente. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2015. Resolución 631 de 2015.

2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL AGUA RESIDUAL RECOLECTADA Y DEL PROTOTIPO

Para seleccionar las mejoras que se ajusten a la operatividad del prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se realiza un diagnóstico inicial en cuanto al estado y la operatividad del equipo, y se realiza la caracterización del agua procedente de la ducha, mitigando los malos olores.

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO

Figura 23. Prototipo



Fuente. DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A.

Es un sistema, que permite que una vez que se hace uso del agua de la ducha, esta sea recirculada y filtrada, para luego ser dirigida y almacenada en un tanque interconectado con una bomba y unas electroválvulas que desembocan en el inodoro (la cisterna) y por último desechar el agua por el desagüe.

Todo este proceso está automatizado, tiene una serie de sensores (de nivel, actúan en serie con la bomba y las electroválvulas) que son los encargados de dar la señal al sistema para así activar la bomba y que esta lleve el agua gris a la cisterna, y así sucesivamente cada vez que se descargue. Una vez se agota el agua del tanque el sistema activa la entrada del agua potable del acueducto y así se garantiza el funcionamiento en caso que no haya agua en el tanque o que no haya energía.

A continuación se describe el estado del prototipo en cuanto al aspecto de estética y mantenimiento, así como de funcionamiento y calidad del agua.

2.2 DIAGNÓSTICO INICIAL

2.2.1 Funcionamiento.

-Bomba: es necesaria para garantizar el transporte del agua almacenada en el tanque de almacenamiento hacia la cisterna del inodoro.

Figura 24. Bomba periférica Barnes



Fuente. McFluid SA.

En el Cuadro 3 se encuentran las características generales de la bomba de agua.

Cuadro 3. Características generales de la bomba

Bomba Periférica Barnes	
Equipo autocebante, monofásico	
Tipo de bomba	Regenerativa
Tipo de acoplamiento	Monobloque
Tipo de impulsor	Semiabierto en bronce
Cantidad de impulsores	1
Flujo máximo	36L/min
Cabeza Máxima	35m
Elevación de succión máxima	8m
Uso	Instalaciones domésticas

Fuente. DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRIGUEZ NIETO, Wilber A.

En el Cuadro 4 están las características generales del motor.

Cuadro 4. Características generales del motor

Características del Motor	
Tipo	Eléctrico monofásico
Velocidad	3.5000 RPM (nominal)
Frecuencia	60 Hz

Fuente. DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRIGUEZ NIETO, Wilber A.

Las especificaciones de la bomba se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Especificaciones de la bomba

Modelo	Ref.	Succión	Descarga	Potencia (HP)	Amperaje		H máx. (marca) *	Q máx. [GPM] **
					110 V	220 V		
QB 60	E0280	1 "	1 "	½	7.6	3.8	35	8

Fuente. DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A.

* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada.

** El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta.⁴²

La bomba presenta deterioro en la carcasa y en el impulsor, existiendo la posibilidad de corrosión; por lo tanto no se encuentra en operación.

-Sensores de contacto: Son dos sensores, que están en buen estado, uno ubicado en el tanque de almacenamiento que detecta cuando hay contenido de agua para que la válvula permita acceso al paso del agua reciclada, otro sensor para indicar que la cisterna ha completado su volumen máximo y por lo tanto apaga la bomba.

-Electroválvulas normalmente abiertas: Son dos electroválvulas, de las cuales una permite el transporte del agua potable al estar el sistema energizado y sin agua residual en el tanque, otra electroválvula funcionando de la misma manera pero cuando el sistema no está energizado; esto para asegurar la entrada del agua, ya sea potable o residual a la cisterna. No presentan ningún daño.

-Electroválvula normalmente cerrada: Válvula encargada de presurizar el agua potable, evitando el retorno del agua residual, y también para que se cierre al estar llena la cisterna con el agua reciclada⁴³. No presenta daño alguno.

-Tubería: En policloruro de vinilo liso (PVC), con longitud de 6m.⁴⁴

2.2.2 Estética y mantenimiento.

-Tanque de almacenamiento: tiene las siguientes dimensiones: 1m de largo x 1m de ancho x 0.25m de profundidad, construido en vidrio, dimensiones que no son apropiadas para un baño de un apartamento de estrato 1-3, por lo cual es necesario reducir el tanque y cambiar el material utilizado, para facilitar su instalación y su uso.

⁴² DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A. Diseño, implementación y evaluación de prototipo para un sistema de reutilización de aguas grises que reduzca el consumo de agua potable en una vivienda unifamiliar. Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores, Proyecto de grado, Facultad de Ingeniería Química.

⁴³ Ibíd., p. 36

⁴⁴ Ibíd., p.36

-Caja de control: se encuentra ubicada sobre la cisterna, lo cual no es muy agradable a la vista.

No hay especificaciones de bomba dosificadora, tanque dosificador, filtro ni caja de control.

2.2.3 Calidad y tratamiento del agua. El sistema no cuenta con un control de retención de impurezas, tiene una válvula *check*, utilizada de forma incorrecta como filtro. Por lo tanto se acumula cabello, tensoactivos, grasas, entre otros.

El agua es tratada con cloro, pero no se indica la dosificación, la concentración del reactivo, ni detalle sobre este tipo de tratamiento. Al existir estas falencias en el tratamiento se generan malos olores en el agua.

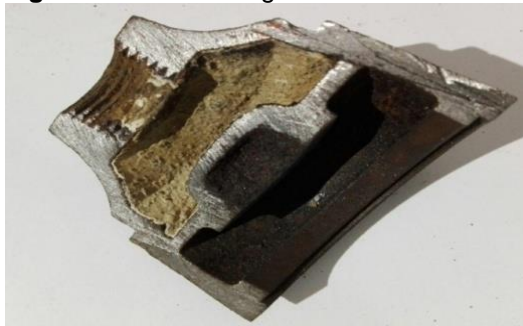
2.3 ANÁLISIS DE CORROSIÓN EN LA BOMBA

Es necesario realizar un análisis de corrosión en los componentes de la bomba, dado que este fenómeno influye en la vida útil de los mismos.

2.3.1 Inspección visual. Se identifica y se valora la corrosión a partir de la inspección visual y con ayuda de una lupa 10X, marca Konus.

2.3.1.1 Fundición gris. Material de la carcasa.

Figura 25. Fundición gris



Se visualiza color negro debajo de la superficie blanca, el color blanco representa los carbonatos de calcio y magnesio, adheridos en el material; los cuales actúan como protectores de corrosión, formando una película pasivante, si estos carbonatos se fraccionan, la corrosión se acelera.

Al interior de la película pasivante, es decir de los carbonatos, está el ataque de la fundición, el cual se evidencia en el color negro, a partir de óxido de hierro, formado por la mezcla de monóxido de hierro y dióxido de hierro.

En las áreas donde el material se encuentra negro, amarillo o naranja, significa que hay alta presencia de oxígeno y por lo tanto se genera corrosión.

La carcasa presenta corrosión uniforme en la superficie, por la formación de Fe_3O_4 , a partir de FeO , lo cual se debe a la escasez de O_2 , transformándose después en Fe_2O_3 y con el tiempo generándose Fe_3O_4 , por la mezcla de los óxidos anteriores.

2.3.1.2 Bronce. Material del impulsor

Figura 26. Bronce



El color naranja evidencia la presencia de corrosión. El material presenta corrosión por tensión acompañada de corrosión por O_2 , debido al esfuerzo del impulsor al funcionar, generando ruptura y daño a la carcasa. Lo cual también está relacionado con el pequeño espesor del impulsor (2mm).

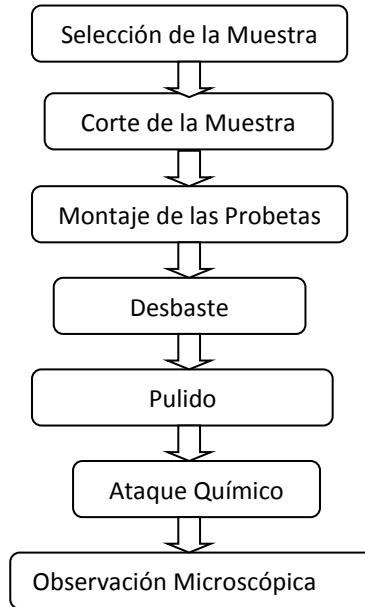
La corrosión se debe a la alta presencia de O_2 , con probabilidad de ser ocasionada al caer el agua de la ducha en forma aireada al prototipo, y por lo tanto absorbiendo O_2 .

Existe fractura, al observarse una parte de la superficie plana, debido a la corrosión que presenta, generando rompimiento en el impulsor y a su vez ocasionando daños y corrosión en la fundición. Lo cual afectó el funcionamiento de la bomba, por esta razón el prototipo no está en operación.

2.3.2 Prueba metalográfica. Como complemento de la inspección visual, se realiza una prueba metalográfica para la carcasa y el impulsor de la bomba, es decir para sus materiales, los cuales son fundición gris y bronce, en su respectivo orden.

2.3.2.1 Procedimiento para prueba metalográfica.

Figura 27. Diagrama de proceso para la prueba metalográfica



2.3.2.2 Selección de la muestra. Los materiales seleccionados para determinar las posibles causas y consecuencias del deterioro del material son el bronce (Aleación de Cobre, Estaño), el cual es el constituyente principal del impulsor de la bomba periférica regenerativa, marca BARNES_R, y la fundición gris, material de la carcasa de la bomba. En este ensayo se analizan los componentes en su estado inicial, como se encuentra en una bomba sin uso alguno, y posteriormente se toman muestras de los materiales cuando ya han sido utilizados.

El detalle de las muestras son las siguientes:

- Bronce del impulsor sin usar: 2 probetas
- Bronce del impulsor usado: 2 probetas
- Fundición gris de la carcasa sin usar: 2 probetas
- Fundición gris de la carcasa usada: 2 probetas





2.3.2.3 Corte de la muestra. Se hace uso de la máquina cortadora metalográfica, con el fin de evitar la destrucción de los elementos constituyentes de la bomba (impulsor, carcasa). Se cortan fragmentos muy pequeños del material y así obtener el tamaño adecuado para su posterior encapsulación con bakelita.

Figura 28. Máquina cortadora metalográfica



Es así como se obtienen las respectivas muestras, presentadas en la Figura 7.

Figura 29. Muestras

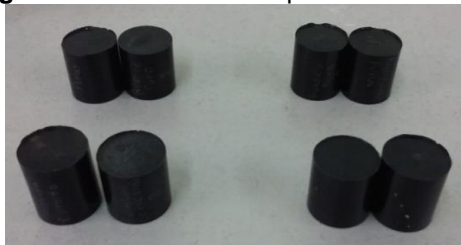
	
Bronce Puro	Bronce Corroído
	
Fundición Gris Pura	Fundición Gris Corroída

2.3.2.4 Montaje de las probetas. Para tener el tamaño adecuado de las muestras y poder realizar el proceso de desbaste, se encapsulan en una máquina probeteadora metalográfica, el montaje se realiza por medio de bakelita, se cubre la pieza con este material, a través de un sistema de calefacción.⁴⁵

Obteniendo las probetas finales, como se muestra en la Figura 8.

⁴⁵ PUCP. Op. Cit. p. 27

Figura 30. Probetas encapsuladas con bakelita



2.3.2.5 Desbaste. Se hizo uso de papel abrasivo (lijas), con diferente granulometría, como se especifica a continuación:

- Número de grano 80, 100, 150, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200.

El papel abrasivo se ubica sobre una superficie plana y limpia, haciendo movimientos de la probeta, los movimientos se hacen de manera uniforme y con dirección longitudinal de un extremo a otro extremo del abrasivo, es necesario mantener la dirección para que las rayas formadas en el material metálico sean paralelas ejerciendo sobre la probeta una presión suave, puesto que si la presión es exagerada, aumenta la distorsión y la aparición de rayas profundas. Se debe dejar durante este proceso una corriente de agua para que limpie los pequeños desprendimientos del material, también para que exista lubricación y refrigeración del área desbastada.

Cada vez que se cambia de abrasivo por uno de menor número de grano, se debe rotar la probeta en 90°, lo cual permite la desaparición de las rayas profundas generadas, la presión debe ir disminuyendo, también es necesario enjuagar la probeta y las manos, para eliminar las partículas desprendidas con el abrasivo anteriormente utilizado, evitando la aparición de nuevas rayas⁴⁶.

2.3.2.6 Pulido. El pulido de una probeta metalográfica consiste en la eliminación de las rayas finas existentes en la superficie, producidas en la etapa de desbaste.

El pulido se realiza en forma mecánica (pulidora), utilizando un paño para pulimiento metalográfico, humedecido con un abrasivo, siendo en este caso la alúmina (óxido de aluminio) en forma acuosa, el cual se considera como el mejor abrasivo a nivel metalográfico. La humedad del paño debe ser moderada, puesto que si el abrasivo es abundante, hace el proceso más lento e insuficiente, ocasionando manchas en la probeta.⁴⁷

⁴⁶ PUCP. Op. Cit. p. 30

⁴⁷ *Ibíd.*, p. 30

Figura 31. Pulidora



El pulido termina al aplicar pasta de diamante sobre la superficie de la probeta, lo que permite llevar a la superficie a un brillo especular, con ayuda de un paño metalográfico.

Figura 32. Aplicación de pasta de diamante a la probeta



2.3.2.7 Ataque químico. El ataque químico permite dar a conocer la estructura del metal o la aleación a la hora de observarlo microscópicamente. Siendo atacado primero el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción, visualizándose más oscuro al microscopio, mientras que el constituyente menos atacable se observa más brillante en el microscopio y con más luz.

Se sumerge la muestra en el reactivo adecuado, asegurándose de que el reactivo cubra toda la muestra, haciendo leves movimientos de 3 a 5 segundos. Inmediatamente se sumerge la probeta en agua, luego en etanol; se procede a secar en corriente de aire, como lo es la deshumidificadora⁴⁸.

La aplicación del reactivo permite observar las características estructurales del material de interés, debido a las diferentes fases y planos cristalográficos con diferentes orientaciones.

Las zonas estructurales donde la energía libre del sistema es mayor, como los

⁴⁸ ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Metalografía: preparación de probetas y observación al microscopio. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet en https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf

límites de fases, bordes de grano, etc., son atacadas más rápido que las zonas con una sola fase o intergranulares⁴⁹

Los reactivos se seleccionaron de acuerdo a la información establecida en el cuadro 6.

Cuadro 6. Reactivos utilizados para ataque químico

Reactivo de ataque	Composición	Usos
Ácido Nítrico (Nital)	Ácido Nítrico 5 cc Etílico 95 cc	Alcohol Aceros y hierros
Ácido Pítrico (Picral)	Ácido pícrico 4 mg Etílico 100 mL	Alcohol Aceros de baja aleación
Cloruro Férrico y Ácido Clorhídrico	Cloruro Férrico 5mg Ácido Clorhídrico 50mL Agua 100 mL	Aceros austeníticos al níquel y aceros inoxidable
Persulfato de Amonio	Persulfato de Amonio 10 mg Agua 90 mL	Cobre, latón, bronce, aluminio, níquel, plata
Ácido fluorhídrico	Ácido Fluorhídrico 0.5 mL 99.5 mL	Agua Aluminio y sus aleaciones

Fuente. Laboratorio de Ingeniería de Materiales 1. Departamento de Ing. Mecánica. Lectura previa. Practica 1

El reactivo utilizado para la muestras de bronce es el persulfato de amonio, para esta caso la solución se hizo con 3g de persulfato de amonio en 90 mL de agua. Para la fundición gris se utiliza el Nital como reactivo, con un 3% de ácido nítrico concentrado y 97 % de alcohol etílico.

Se procede a secar las probetas, usando el deshumidificador.

2.3.2.8 Observación microscópica. Se ubica la muestra en la placa del microscopio metalúrgico, de tal forma que la muestra sea perpendicular al ojo óptico. Es así como la imagen proyectada de la muestra se puede observar con aumentos diferentes (10X, 20X, 50X).⁵⁰

La observación microscópica permite analizar la forma y el tamaño de los granos de la muestra, así como también los microconstituyentes; dando lugar al análisis metalográfico.⁵¹

⁴⁹ PUCP. Op. Cit.31

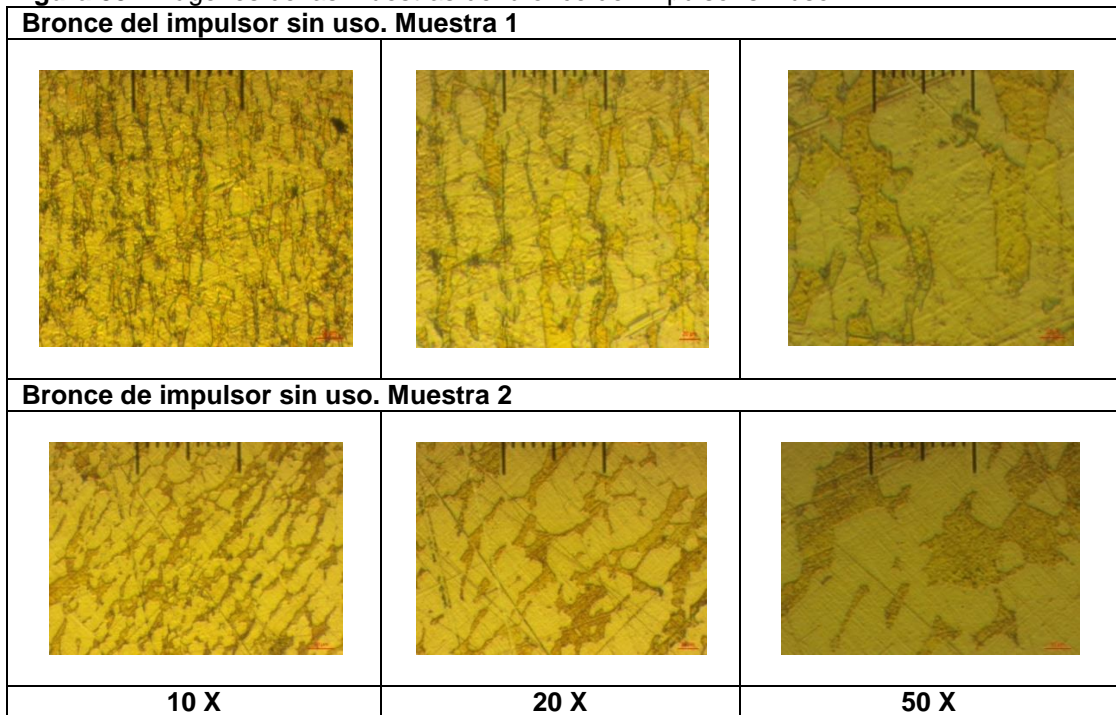
⁵⁰ ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Op. Cit. p. 32

⁵¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ensayos estructurales: metalografía y microscopía. Ciencia y Tecnología de los Materiales. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: www.academia.edu/8476186/Ensayo_de_metalografia

2.3.3 Análisis de resultados.

2.3.3.1 Bronce.

Figura 33. Imágenes de las muestras del bronce del impulsor sin uso



En la muestra 1 se observa una estructura bandeada, donde la sección amarilla clara es la fase con mayor porcentaje en estaño.

Se destaca que la concentración del persulfato de amonio, como también el tiempo de ataque en el que se sumergió la probeta y la limpieza de la misma, porque las rayas profundas generadas por la manipulación del metal y el calentamiento de la probeta no se evidencian notoriamente.

En la muestra 2, imagen con aumento de 50X no hay corrosión. El área más oscura es una hojuela incorporada en la muestra al momento del desbaste.

Se observa estructura dendrítica perfecta. Se distingue la fase delta δ y se observa la fase alfa α .

2.3.3.2 Bronce del impulsor usado.

Figura 34. Imágenes de la muestras N.1 del bronce del impulsor usado

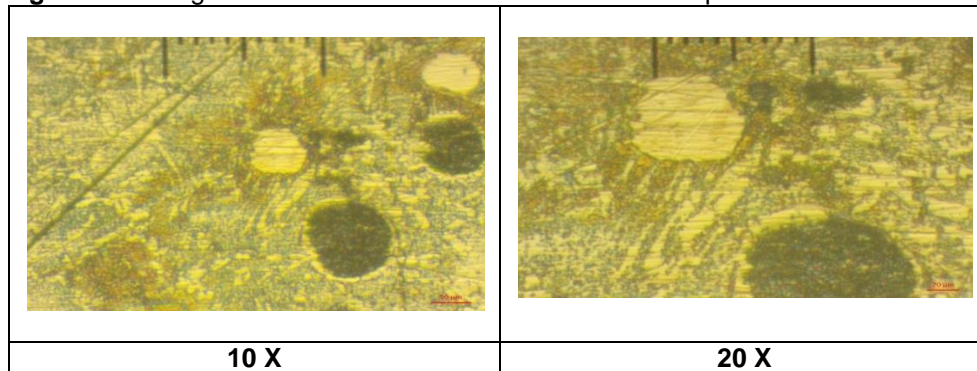
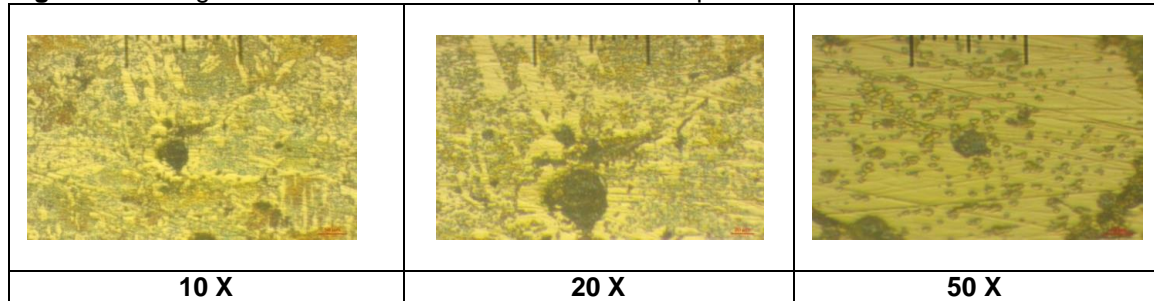


Figura 35. Imágenes de la muestra N.2 del bronce del impulsor usado



Es extenso el daño por tensión en la muestra atacada, puesto que la muestra ya había sufrido corrosión.

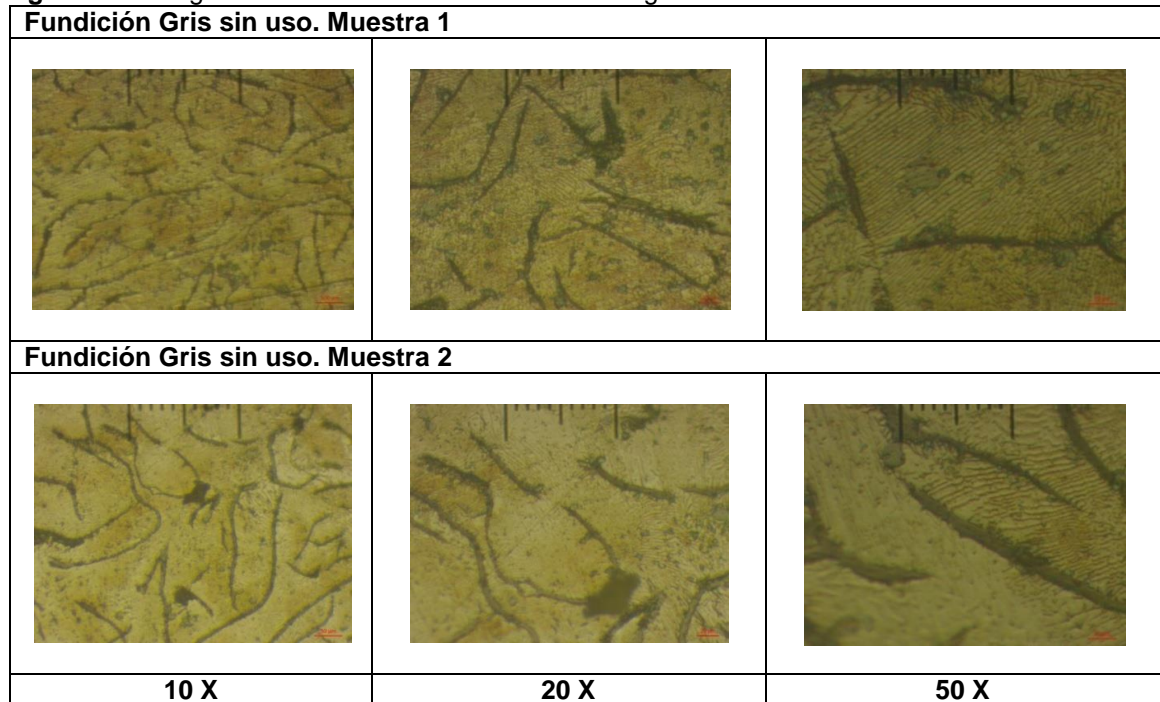
Las zonas más oscuras manifiestan la existencia de corrosión por tensión, corrosión localizada; lo que corrobora que el material estaba debilitado (durante el proceso de uso) antes del ataque químico.

El bronce presenta gran evidencia de fenómeno corrosivo durante el ataque químico.

Se asume que la susceptibilidad al ataque químico en la muestra N.2 del bronce del impulsor usado, se debe a que el Cu (Cobre) está sufriendo desgastes en la bomba.

2.3.3.3 Fundición gris.

Figura 14. Imágenes de las muestras de la fundición gris de la carcasa sin uso



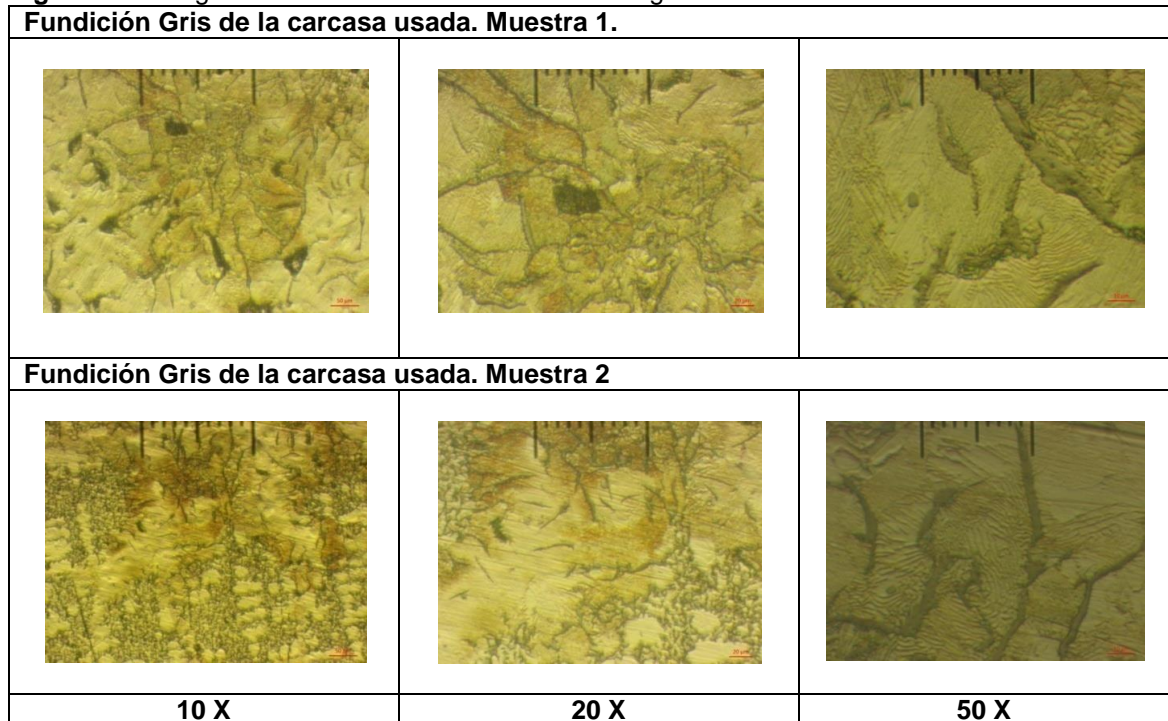
Se observan presentaciones dendríticas de la fase α , con algunas inclusiones de precipitados redondos y alargados de los constituyentes de la aleación. La textura es semejante a la del Cu puro, pero de manera no homogénea. Se observa grafito en forma de hojuelas.

Las imágenes muestran una estructura perlítica, las zonas claras pertenecen a la fase conocida como ferrita, constituida por bajo porcentaje de carbono; y las zonas más oscuras, se conocen como cementita, es la fase rica en carbono. No se evidencia corrosión por picadura en material de referencia.

Es una estructura gráfitica distribuida homogéneamente en la matriz del metal, se observan las hojuelas del grafito de color oscuro.

2.3.3.4 Fundición gris de la carcasa usada.

Figura 36. Imágenes de las muestras de la fundición gris usada



Se evidencia corrosión tenue, lo cual se debe a que el Nital ataca preferencialmente ciertas regiones de la estructura.

Se presenta corrosión localizada de preferencia en la estructura y regiones por corrosión de preferencia, avanzada en la estructura.

Se presentan algunas inclusiones de precipitados de diferentes formas, alargados y redondeados de manera intergranular de sus fases.

La carcasa en operación había sufrido menos daño que el impulsor, debido a la baja velocidad relativa del agua residual domestica; mientras que el impulsor presenta corrosión por oxígeno, por causa de su funcionamiento, teniendo mayor velocidad relativa del efluente y por lo tanto la caída de la presión, dando lugar a un fenómeno de implosión, donde se generan ondas de choque, por el movimiento del fluido y de las partículas disueltas en el mismo.

2.4 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA

2.4.1 Identificación de parámetros a evaluar. Teniendo en cuenta el tipo de agua a tratar, en este caso agua residual doméstica, la Resolución 631 de 2015, permite conocer los parámetros que deben tenerse en cuenta para ser analizados cuando se requiere algún tipo de tratamiento.

En el Artículo 8, en el que se establecen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD) de las actividades industriales, comerciales, o de servicios, y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales. De acuerdo con este artículo y a la muestra tomada, los parámetros de interés son los generales, nombrados a continuación:

- pH
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Sólidos Sedimentables (SSED)
- Grasas y Aceites
- Sustancias Activas al Azul de Metileno
- Nitrógeno Total
- Fenoles Totales
- Compuestos Fenólicos Semivolátiles

2.4.2 Caracterización del agua residual doméstica. Para realizar el diagnóstico del estado actual del agua residual doméstica recolectada es necesaria la identificación y caracterización de la misma, evaluando los parámetros requeridos establecidos en la Resolución 631, con una carga menor o igual a 625 Kg/Día DOB₅.


Esta caracterización se realizó en ChemiLab (Chemical Laboratory).

2.4.3 Reporte de resultados. Los resultados de la caracterización se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Reporte de resultados de la caracterización

Ítem	Parámetro	Técnica	Unidad	AGUA PROCE-DENTE DE DUCHA	Res. 631 Art. 8
1	Compuestos Fenólicos Semivolátiles	Extracción líquido-líquido, CG/FID	mg/L	<0.007	Análisis y Reporte
2	DBO5 (Demanda Biológica de oxígeno)	Incubación 5 días y Luminiscencia	mg O2/L	1047	90
3	Detergentes - Tensoactivos (SAAM)	Extracción líquido-líquido, Colorimetría	mg SAAM /L como las de peso molecular 288.38 g/mol	117	Análisis y Reporte
4	DQO	Reflujo cerrado y Colorimétrico	mg O2/L	2326	180
5	Fenoles totales	Directo - Colorimetría (Celda 10 mm)	mg Fenol /L	0.108	Análisis y Reporte
6	Grasas y Aceites	Espectrofotometría Infrarrojo	mg/L	10.1	20
7	Nitrógeno total	Digestión – kjeldhal	mg N/L	8.83	Análisis y Reporte
8	pH	Electrometría	Unidades de pH	7.10	6.00 a 9.00
9	Sólidos sedimentables	Cono Imhoff	ml/L	<0.1	5
10	Sólidos Suspendidos Totales	Gravimetría Secado 103-105°C	mg/L	122	90

Fuente. CHEMICAL LABORATORY

 Parámetros que incumplen con la Resolución 631 de 2015.

2.4.4 Análisis de resultados. De acuerdo con la caracterización del agua residual doméstica sin tratar, procedente de la ducha, los resultados obtenidos en la Tabla 8 muestra para los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), y Sólidos Suspendidos Totales (SST) valores que se encuentran fuera del límite permitido según la Resolución 631, Artículo 8.

El parámetro de Demanda Biológica de Oxígeno, cuyo valor es 1047 mgO₂/L que supera el límite de 90 mgO₂/L, indicando que en este tipo de agua residual la cantidad de oxígeno (O₂) requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica existente en el agua residual es mayor a la estipulada.

El valor de 2326 mgO₂/L correspondiente a la Demanda Química de Oxígeno, se encuentra fuera del límite de 180 mgO₂/L, denotando que la cantidad de O₂ requerida para que ocurra oxidación química de la materia orgánica e inorgánica de la muestra de agua es mayor a la especificada.

Los Sólidos Suspendidos Totales sobrepasa el límite permitido con un valor de 122 mg/L, ocasionado por el material particulado excesivo que se encuentra en suspensión en esta corriente de agua residual.

Debido al incumplimiento de los límites permisibles para los anteriores parámetros, es necesario implementar un tratamiento en el agua residual para disminuir su contenido, reduciendo así mismo la cantidad de materia orgánica en descomposición y la presencia de sustancias químicas volátiles que generan olores desagradables, con el fin de implementarlo en el prototipo de agua residual doméstica.

Para los demás parámetros, los resultados obtenidos, son valores que están dentro de rangos permisibles en la normatividad, notando que no requieren de ningún proceso para su modificación.

3. SELECCIÓN DE LAS MEJORAS QUE SE AJUSTEN A LA OPERATIVIDAD DEL PROTOTIPO

Se requiere plantear alternativas de mejora en el prototipo, en cuanto a la calidad del agua a partir de un tratamiento químico, y también en cuanto al aspecto operacional, estético y de mantenimiento.

3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO QUÍMICO

El tratamiento químico del agua es importante porque al mejorar la calidad del agua, se reducen los problemas de corrosión en la bomba, evitando daños mayores en los componentes del sistema, disminuyendo costos y protegiendo la inversión del prototipo, al aumentar la vida útil de las partes que lo conforman. Adicionalmente se requiere eliminar impurezas presentes en el agua, como cabello, tensoactivos y otros elementos, que deterioran los equipos e instrumentos, que afectan negativamente el funcionamiento del reciclador de aguas residuales.

La identificación y selección del tratamiento adecuado del agua residual para reducir los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), se realiza a través de los antecedentes y la investigación teórica, teniendo en cuenta la mejora en la calidad del agua y la economía en el desarrollo del mismo.

3.1.1 Antecedentes. Para la correcta selección del tratamiento a implementar en el prototipo de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se investigan antecedentes que brindan información acerca del funcionamiento y los tratamientos químicos empleados en equipos recicladores de aguas residuales domésticas.

3.1.1.1 Diseño de un sistema semiautomático de tratamiento de aguas grises para unidades habitacionales. (Sistema semiautomático de tratamiento de aguas grises para unidades habitacionales). Proyecto de investigación realizado por estudiantes de Ingeniería Mecánica del Instituto Politécnico Nacional, consiste en reciclar las aguas grises generadas en la ciudad de México, dando lugar a la reutilización de las mismas en lavado de automóviles y riego de plantas. En este sistema es imprescindible hacer mantenimiento cada dos años, el cual se basa en el cambio de filtros, la limpieza de contenedores y la aplicación del recubrimiento para impedir la formación de hongos.

El sistema consiste en que el agua utilizada para el aseo personal, la limpieza de la loza y la ropa es dirigida a un contenedor, posteriormente filtrada y tratada químicamente, para así reciclarla. El agua es almacenada en el contenedor máximo por un día y se adicionan químicos específicos por espacio de una hora, se prosigue a realizar la filtración y pasa a otro contenedor con un recubrimiento

especial encargado de obstaculizar la formación de hongos y conecta el agua a los usos terciarios.

Los sedimentos y lodos obtenidos del proceso de purificación del agua debe ser almacenada en otro contenedor y ser aprovechados para fertilizantes de plantas. El sistema necesita de un coagulante para ionizar las partículas suspendidas en el agua gris e incrementar el tamaño de las mismas y así facilitar la sedimentación. Luego se aplica un floculante (sustancia química que aglutina sólidos en suspensión), para dar lugar a la precipitación de lodos⁵².

3.1.1.2 Reciclaje de aguas grises en el santuario de Santa María de Mangalato. Proyecto de investigación relacionado con la instalación de un sistema en forma de bancal (terreno para la siembra) donde ocurre la sedimentación y el tratamiento biológico natural; lo cual permitió recuperar un volumen diario de 35 litros diarios generados por persona en duchas, donde habitaban 400 menores de edad, sumando un volumen de 14m³. Este proyecto constó 4 sedimentadores y logró la recuperación de aguas grises del volumen total, siendo reutilizadas en inodoros; así como también dio lugar a la creación de área verde con cultivos cítricos.

Los resultados obtenidos fueron la recuperación de aguas grises en un total de 14m³ diarios, reutilizados en inodoros y el regadío de 2.000 plantas cítricos, ahorro económico, creación de un área verde con cultivos cítricos y la disminución del impacto ambiental por la reducción del transporte de agua potable.

3.1.1.3 Diseño y creación de un prototipo reciclador de aguas grises. Trabajo de grado de Ingeniería Mecatrónica, realizado por Eduardo Alarcón, Camila Beltrán y David Tumbajoy, en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en el año 2010; realizó el diseño y la creación de un prototipo reciclador de aguas grises, el cual se fundamenta en que el agua procedente de la ducha es almacenada en una plataforma ubicada en el piso, donde es dirigida a un filtro y al alcanzar un volumen máximo, es trasladada por una bomba a un tanque de almacenamiento, para luego ser descargada.⁵³

Su funcionamiento consiste en que el agua procedente de la ducha o de la tina es dirigida a una plataforma, pasando por un filtro, y al alcanzar un nivel máximo, es impulsada por una bomba hasta el tanque de almacenamiento, para ser utilizada en las descargas del inodoro.

⁵² MORENO, Claudio. Valoración cuantitativa de la reducción en la demanda de agua potable para descarga de aguas residuales en sanitarios mediante la implementación de medidas y tecnologías de utilización de aguas grises. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/profile/Claudio_Alberto_Moreno/publication/271195063

⁵³ *Ibíd.*, p.53

La bomba únicamente está activa cuando la plataforma alcance el nivel máximo, lo cual evita el gasto innecesario de energía eléctrica. En dado caso que el tanque no alcance este nivel con agua reciclada, será llenado con agua potable.

Los estudiantes midieron el caudal de la ducha en tres hogares, teniendo como resultado 6L/min, para la construcción de su prototipo asumieron que las personas se demoran 5 min en su baño corporal, siendo el consumo 30L por persona, volumen que sería reutilizado en 6 descargas del inodoro, siendo cada descarga de 5L y 10 descargas en un inodoro con capacidad de 3L.

El prototipo tiene cuatro componentes, un recolector de agua generada en la ducha, el cual consta de una plataforma recolectora removible y un filtro. El segundo sistema es una bomba que impulsa el efluente desde la plataforma hasta el tanque de recolección, siendo este el tercer componente, el cual tiene una capacidad de 120L, dos entradas y una salida. Por la entrada superior ingresa el agua procedente de la ducha, y cuenta con un sensor electromecánico que desactiva la bomba. La otra entrada está diseñada para el agua potable, el nivel de agua potable es regulado por una válvula con flotador. La salida se encuentra en la parte inferior del tanque, para que mediante el efecto de gravedad transporte el agua al inodoro.

Por último, tiene un sistema de control, para el funcionamiento automático, compuesto por sensores mecánicos y eléctricos.

El consumo eléctrico del equipo es de 20 V, incrementando en \$500 (pesos) mensuales la factura de la luz, para una vivienda estrato 3, habitada por 4 personas, siendo \$14.000 pesos mensuales el ahorro en la factura del acueducto.⁵⁴

3.1.1.4 Construcción de modelo reciclador de aguas grises. El modelo reutilizador de aguas grises propuesto por Francisco Jaime Mejía en el departamento del Quindío, da a conocer un sistema de reutilización de aguas grises en viviendas, generadas en la ducha, lavamanos, lavadero de ropa y lavadora. El tratamiento del afluente inicia con la separación del agua, el agua que contiene jabón es transportada al sistema de reutilización y si no contiene jabón pasa al alcantarillado público. El agua que continúa en el sistema recolector se entrega a un tanque clarificador, donde ocurre la coagulación y sedimentación, después de que el agua reciclada es tratada pasa a dos filtros. Y por último se bombea al tanque distribuidor, el cual abastece la cisterna del inodoro, el lavadero, entre otros usos.

⁵⁴ *Ibíd.*, p. 32

3.1.1.5 Elaboración de una guía ambiental para la reutilización de aguas grises y aprovechamiento de las aguas lluvias en edificaciones. Los estudiantes de la especialización en Ingeniería Ambiental Jackson López R. y Nayibe Vergara B, de la Universidad Industrial de Santander, desarrollaron en el año 2011 un proyecto que propone un sistema combinado, reutilizando aguas grises y aguas lluvia en descarga de sanitarios principalmente.

La guía ambiental plantea alternativas de tratamiento, brinda información acerca de los aspectos a tener en cuenta en la selección del mismo, así como sus diferentes etapas y posibles reactivos a utilizar.⁵⁵

En el Cuadro 7 se encuentra la síntesis de los antecedentes anteriormente explicados junto a sus respectivos aportes.

Cuadro 7. Síntesis de los antecedentes y sus aportes

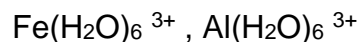
Antecedente	Aporte
Proyecto de investigación "Diseño de un Sistema Semiautomático de Tratamiento de Aguas Grises para unidades habitacionales", realizado por estudiantes de Ingeniería Mecánica, consiste en reciclar las aguas grises generadas en la ciudad de México. (2010)	Modelo reciclador doméstico, donde se analiza el tipo de sistema de filtrado para una adecuada limpieza en proyectos de almacenamiento y reciclaje de aguas grises en viviendas. Información sobre el tratamiento químico a realizar. . (Filtración y coagulación)
Proyecto de investigación "Reciclaje de aguas grises en el santuario de Santa María de Mangalato", por el docente Torsten Lingern, en Ecuador, se basa en la instalación de un sistema donde ocurre la sedimentación. (2008)	Información estadística, ofrece parámetros de ahorro en términos económicos. Información relacionada con el tratamiento químico del agua. (Sedimentación).
Trabajo de grado de Ingeniería Mecatrónica, en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá; diseño y la creación de un prototipo reciclador de aguas grises, el cual se fundamenta en que el agua procedente de la ducha es almacenada en una plataforma ubicada en el piso. (2013)	Limitantes desde el punto de vista técnico, en los cuales se evitaría incurrir en el prototipo actual. (Tamaño del equipo). Información acerca de prácticas de mantenimiento preventivo a componentes del sistema.
Modelo reutilizador de aguas grises en el departamento del Quindío, da a conocer un sistema de reutilización de aguas grises en viviendas, generadas en la ducha, lavamanos, lavadero de ropa y lavadora. (2004)	Conocimiento detallado acerca de los tratamientos químicos necesarios en el agua generada de la ducha, para así poder ser reutilizada en el sanitario de viviendas. (Coagulación y sedimentación).
Proyecto de especialización en Ingeniería Ambiental, en la Universidad de Santander propone un sistema combinado, reutilizando aguas grises y aguas lluvia en descarga de sanitarios principalmente. (2011)	Información acerca de variables de ingeniería; tales como caudales, tuberías y rugosidades.

⁵⁵ LÓPEZ RINCÓN, Jackson y VERGARA BAUTISTA, Nayibe. Elaboración de una guía ambiental para la reutilización de aguas grises y aprovechamiento de las aguas lluvias en edificaciones. Santander: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímica, 2011.

De acuerdo a los antecedentes presentados, debido a la similitud de los sistemas analizados y también tomando como base la referencia bibliográfica consultada, se elige el tratamiento de coagulación, para mitigar el olor, generado por el material particulado y a su vez, mejorar la calidad del agua.

3.1.2 Selección de las alternativas de coagulantes. Es necesario hacer una revisión bibliográfica para conocer los diferentes coagulantes, sus características, como también sus respectivas ventajas y desventajas, para así lograr la selección correcta de las alternativas de los mismos.

- **Coagulantes metálicos (convencionales):** este tipo de coagulantes, sales de Hierro y Aluminio, son los más utilizados en la clarificación de aguas, en la reducción de la Demanda Biológica y fosfatos existentes en aguas residuales. Actúan no solo como coagulantes sino a su vez como floculantes. Formas especies hidratadas complejas cargadas positivamente:



- **Sales de aluminio:** Forman un floc ligeramente pesado⁵⁶.

- **Sulfato de aluminio:** $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, conocido como Alumbre, es el más utilizado debido a su bajo costo y manejo sencillo. Su pH óptimo es 6 a 8, teniendo mejor resultado con un pH entre 6 y 7. Produce un flóculo pequeño.⁵⁷

- **Policloruro de aluminio:** Coagulante inorgánico, utilizado generalmente para remover color y materia coloidal en sistemas acuosos. Contribuye a la remoción de sólidos suspendidos, turbidez y partículas orgánicas⁵⁸.

- **Aluminato de sodio:** Por lo general no se usa, permite eliminar el color a pH bajo. Se puede usar en el ablandamiento de agua con cal.

- **Sales de hierro:** Forman un floc más pesado y se asientan más rápido que las sales de Aluminio⁵⁹.

⁵⁶ UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA. Tema 5. Coagulación-Floculación. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf Tema 5. Coagulación-Floculación

⁵⁷ SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Unidad 3: potabilización del agua. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://es.scribd.com/doc/305534568/Guia-de-Aprendizaje-Unidad-3>

⁵⁸ CINÉTICA QUÍMICA. Policloruro de aluminio. [En línea], [consultado el 12 de noviembre de 2017]. Disponible en Internet: <http://policlorurodealuminio.com/>

⁵⁹ SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Op. Cit. p. 43

- **Cloruro férrico:** (FeCl_3) Es enérgico aunque puede presentar problemas de coloración en las aguas.
 - **Sulfato férrico:** ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) Produce flóculos grandes y densos, por lo que su decantación es rápida, se usa en la precipitación y coprecipitación de aguas residuales, también se usa en tratamiento de aguas potables, pero puede producir coloración. Se utiliza con un rango de pH de 3 a 11, siendo el rango óptimo de 8.5 a 11.⁶⁰
 - **Sulfato ferroso:** (FeSO_4) Al usarlo se necesita agregar cal. Se usa para aguas turbias y alcalinas, con un pH mayor a 8.⁶¹
- Otros de los coagulantes más empleados son el aluminato de sodio, sulfato ferroso, cloruro férrico, entre otros⁶².
- **Polímeros o polielectrolitos:** Son compuestos con alto peso molecular, no son coagulantes como tal, sino ayudantes de coagulación. La dosificación necesaria es en concentraciones muy bajas, lo cual es una ventaja, a pesar del alto costo. Se usan por lo general en el tratamiento de aguas potables, por la menor cantidad de lodos producida y la facilidad del tratamiento de los mismos⁶³.
 - **Coadyuvantes de floculación:** Sustancias utilizadas ya sea para disminuir las interferencias debidas a materiales orgánicos, así como también para incrementar la densidad del flóculo, lo cual favorece el proceso de sedimentación⁶⁴.

El Cuadro 8 muestra la clasificación de los coadyuvantes de floculación más utilizados.

⁶⁰ UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA. Op. Cit. p. 43

⁶¹ PÉREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante -sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP. [En línea], [consultado el 12 de noviembre de 2018]. Disponible en Internet: repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6371/.../6112811-2017-2-IQ.pdf

⁶² CATALAN, Alberto. Op. Cit. p. 10

⁶³ RESTREPO, Alberto. Evaluación del proceso de coagulación. Floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Medellín: Universidad Nacional, 2009, p.206.

⁶⁴ SCIELO COLOMBIA. Polielectrolitos sintéticos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=l_OGMwaGkgQC&printsec=frontcover&source=gbs_r&cad=0

Cuadro 8. Clasificación de coadyuvantes de floculación más usados

OXIDANTES	AGENTES ADSORBENTES - PONDERANTES	SÍLICE ACTIVA	POLIELECTROLITOS			
			Los más utilizados actualmente. Su objetivo es mejorar la floculación y las propiedades mecánicas de los flóculos. Se usan por lo general, después de los coagulantes, sin embargo pueden utilizarse como coagulantes, sustituyendo a los compuestos de aluminio o hierro. Estos compuestos forman "puentes" (enlaces de partículas coaguladas, por el contacto entre estas y los polímeros). Debe usarse en pequeñas cantidades, debido a su alta toxicidad.			
			Polielectrolitos naturales	Aniónicos	Catiónicos	No iónico
			Eliminan o reducen los compuestos orgánicos disueltos.	Usados en el tratamiento de aguas con alta turbiedad, color y pocas sales minerales. Los flóculos que se obtienen en aguas muy turbias con coagulantes como el hierro y/o el aluminio, no se sedimentan fácilmente, por lo que se requiere este tipo de agentes.	Sustancias naturales en suspensión coloidal de ácidos polisilícicos hidratados. Se obtiene a través de la neutralización parcial de la alcalinidad caustica del silicato sódico. Sirve para tratar aguas con alta turbidez. ⁶⁵	La mayoría de polímeros naturales y sus derivados, están compuestos por polisacáridos y grupos carboxilos (propiedades aniónicas). Ventaja: No tienen toxicidad.

⁶⁵ F. RAMIREZ QUIROS. Sílice activada como coadyuvante de la floculación en el tratamiento del agua. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.elaguapotable.com/Silice%20Activada%201.pdf>

Para seleccionar los reactivos coagulantes más adecuados en el tratamiento del agua, se analizan los posibles insumos a través del cuadro 9, donde se observan sus respectivas ventajas y desventajas.

Cuadro 9. Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SULFATO FÉRRICO	<p>Efectivos en la remoción de sustancias orgánicas y bacterias.</p> <p>Usado para la remoción de Hierro y Manganeso.</p> <p>Funciona de forma estable en un amplio intervalo de pH.</p> <p>Producen flocúlos grandes y densos que decantan rápidamente.</p> <p>Es eficiente sin un ayudante de floculación.</p> <p>Coagulante de bajo costo.</p> <p>Alta velocidad de reacción.</p> <p>No hay problemas con el Aluminio residual.</p> <p>Fácil y seguro de manejar y almacenar.</p> <p>Se puede encontrar tanto líquido como sólido.</p>	<p>Puede producir problemas de coloración.</p> <p>Pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>La dosis de Hierro es mayor a la dosis de Aluminio.</p> <p>El producto sólido necesita una muy buena mezcla en la unidad de dilución.</p> <p>Es poco corrosivo para manejar y almacenar.</p>
SULFATO FERROSO	<p>Compuesto coagulante ácido granular de color verde.</p> <p>Se utiliza en residuos altamente alcalinos.</p> <p>Es de fácil absorción.</p> <p>En presentación sólido y líquido.</p> <p>Para clarificación de aguas muy turbias.</p> <p>Se utiliza en aguas muy turbias.</p> <p>Es una fuente de hierro económica.</p>	<p>Se requiere añadir Cal o Cloro para asegurar la coagulación.</p> <p>Debe existir la oxidación del ion ferroso a férrico.</p>
CLORURO FÉRRICO	<p>Elimina fosfatos, sulfuros y metales pesados presentes en las plantas de agua potable.</p> <p>Por ser un producto líquido es de muy fácil aplicación.</p> <p>De bajo costo.</p> <p>Genera alta velocidad de reacción.</p> <p>El rango bajo de pH 3.5 – 7.0 ayuda en la remoción de sustancias orgánicas y microorganismos.</p> <p>El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de Hierro y Manganeso.</p> <p>Eficiente sin ayudante de floculación.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas.</p> <p>Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>Muy corrosivo para manejar y almacenar.</p>

Cuadro 9. (Continuación)

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SULFATO POLIFÉRRICO	<p>Polímero inorgánico de gran eficiencia. Forma flóculos grandes y de rápida sedimentación.</p> <p>No causa contaminación por hierro. Buen efecto en la decoloración capturando microorganismos y reduciendo DBO₅, DQO y metales pesados. Baja corrosión. Eficiente para aguas crudas con alta turbidez. Se requieren bajas dosis a bajos costos de tratamiento.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas. Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada. Muy corrosivo para manejar y almacenar. Requiere acondicionadores de pH.</p>
SALES DE HIERRO CON POLÍMEROS ORGÁNICOS	<p>Requieren pequeñas dosis Actúan como ayudantes de coagulación. Mejorando la formación de flóculos. Se obtienen mejores características en la sedimentación.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas. Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p>
SULFATO DE ALUMINIO	<p>Coagulante químico más empleado en el mercado a costos razonables. De fácil obtención por su bajo costo y facilidad de producción. Efectivo para producir coagulación de vertidos con compuestos carbonatos. Es una sal metálica, que reacciona formando flóculos de hidróxidos de aluminio al contacto con la alcalinidad de las aguas a tratar, facilitando su limpieza. Reducción de coloides orgánicos y fósforo. En presentación sólido y líquido, y en diferentes grados de pureza. Forma flóculos blancos casi invisibles.</p>	<p>El rango de trabajo de pH muy limitado Requiere control de pH. La remoción de material orgánica es limitada. Genera problemas con agua de alta turbiedad y alto contenido de Aluminio residual. Muchas veces requiere un ayudante de floculación.</p>
ALUMINATO DE SODIO	<p>Coagulante y acondicionador de pH en el tratamiento de agua. Se reduce el uso de correctores de pH como la cal, soda cáustica o carbonato de sodio. Elimina color a pH bajo. Permite un tratamiento con pH un poco más altos que el sulfato de aluminio.</p>	<p>Poco empleado en tratamiento.</p>

Cuadro 9. (Continuación)

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
POLICLORURO DE ALUMINIO (Polihidroxocloruros de aluminio)	<p>Es de fácil manejo, almacenamiento y dosificación.</p> <p>Se disminuye el uso de modificadores el pH.</p> <p>Genera un menor tiempo de residencia por la mayor rapidez en la formación de flóculos.</p> <p>Genera menor producción de lodos y un menor residual de aluminio.</p> <p>Mejora la velocidad de formación de flocs y la remoción de color y turbidez.</p> <p>Mejora la eficiencia de la filtración.</p> <p>Trabaja en un amplio rango de pH.</p> <p>No modifica el valor de pH del afluente.</p> <p>Menor costo de operación.</p> <p>Menor consumo de polímero y menor dosis de Aluminio.</p>	<p>Precio más alto por kg.</p> <p>Un pH demasiado alto para la coagulación puede bajar la remoción de sustancia orgánica.</p>
CLOR-HIDRÓXIDO DE ALUMINIO	<p>Contribuye a la remoción de sólidos suspendidos y Turbidez.</p> <p>Forma flóculos de mayor tamaño de aglomeración.</p> <p>Se utiliza principalmente para remoción de color y materia coloidal.</p> <p>Sirve como reemplazo del Sulfato de aluminio y de otras sales inorgánicas convencionales.</p>	<p>Depende de la condición de pH y del tipo de mezcla, requiriendo de su control.</p> <p>Menos empleado en tratamiento de potabilización.</p>
POLIELEC-TROLITOS NATURALES	<p>Baja toxicidad.</p> <p>Polímero de alto peso molecular conducen a la formación de flóculos más grandes.</p> <p>Reduce la cantidad de lodos.</p> <p>Disminuye costos en el tratamiento.</p> <p>Usos como ayudantes coagulación.</p> <p>Incrementa la velocidad de sedimentación de los flóculos.</p> <p>Son biodegradables.</p>	<p>Se utilizan a pH bajos</p> <p>Variación de efectividad por cambios de pH.</p> <p>Debe usarse suficiente agitación mecánica para disolverlo en agua por su alta viscosidad.</p> <p>Pueden reaccionar con otras sustancias químicas que son peligrosas para la salud.</p> <p>Los polímeros agregan carga orgánica al agua que puede no ser retirada antes de llegar al consumidor.</p>

Fuente. PÉREZ BELTRÁN, Jessica P. 2017. ⁶⁶

⁶⁶ PÉREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante -sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP. [En línea], [consultado el 12 de noviembre de 2018]. Disponible en Internet: repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6371/.../6112811-2017-2-IQ.pdf

De acuerdo con la caracterización del agua residual doméstica, el pH del agua a tratar es de 7.10; parámetro influyente en la elección del reactivo a usar como coagulante. El cuadro 10 expone el rango de pH óptimo de los diferentes coagulantes.

Cuadro 10. Rango óptimo de pH

COAGULANTE	INTERVALO DE pH EFECTIVO
Sulfato Férrico	4.0 - 11.0
Sulfato Ferroso	> 8.5
Cloruro Férrico	3.5 - 7.0 y 8.0 - 9.5
Sulfato Poliférrico	De mayor desempeño: 6.0 - 9.0 De trabajo: 4.0 - 11.0
Sales de hierro con polímeros orgánicos	5.0 - 7.0
Sulfato de Aluminio	6.0 - 8.0
Aluminato de Sodio	3.0 -6-0
Policloruro de Aluminio	3.0 -12.0
Polielectrolitos Naturales	3.0 - 5.0

Fuente. PÉREZ BELTRÁN, Jessica P. 2017. ⁶⁷

3.1.2.1 Matriz de selección. En consecuencia con la bibliografía consultada, se realiza una matriz de selección, con el fin de elegir 3 coagulantes para realizar el desarrollo experimental, y así establecer el coagulante más conveniente para el tratamiento químico del agua recolectada.

Los factores a tener en cuenta para esta selección son el uso en aguas residuales domésticas, el pH requerido, la acción corrosiva en el sistema, la facilidad para la formación de flóculos, la eficiencia, la asequibilidad, el estado líquido, la necesidad de coadyuvante de floculación, la corrección del pH, la velocidad requerida para la formación de flóculos y la factibilidad de costo del coagulante.

Es necesario tener en cuenta la aplicabilidad del coagulante en este tipo de agua de acuerdo a los buenos resultados anteriores.

A partir de la caracterización del agua, los coagulantes que se ajustan, deben ser aplicados en un rango de pH, donde se encuentre el valor de 7.10. En la Tabla 12 se muestran estos rangos, adecuándose más el sulfato férrico, el sulfato poliférrico, el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio.

La acción corrosiva debe ser mínima para que no haya deterioro de los elementos metálicos utilizados en el prototipo.

La facilidad y la velocidad requerida para la formación de flóculos es importante

⁶⁷ Ibíd.

porque aumenta la probabilidad de unión de las partículas y retarda el descenso de las partículas por efecto de la gravedad, alcanzando la sedimentación.

La existencia del coagulante en estado líquido es importante porque facilita la homogeneidad de la mezcla.

Es recomendable evitar el uso de un coadyuvante de floculación, lo cual aumenta los costos de los insumos necesarios y el tiempo requerido para el proceso. Los polielectrolitos son coadyuvantes de la floculación, más no coagulantes como tal, razón por la cual, se tuvieron en cuenta únicamente en forma general.

La corrección de pH es importante porque es una sustancia que estabiliza las propiedades alcalinas y ácidas, siendo un reactivo adicional y generando costos.

Otros factores a tener en cuenta son la eficiencia, la asequibilidad y la factibilidad de costo del coagulante.

En el Cuadro 11, se especifica la calificación para la construcción de la matriz de selección.

Cuadro 11. Calificación en la matriz de selección

CALIFICACIÓN	INFLUENCIA DEL FACTOR
1	Influencia negativa
3	Influencia aceptable
5	Influencia positiva

El valor de 1 es la calificación más baja, sugiere que la este aspecto no favorece el tratamiento, el valor de 3 influye de manera aceptable y 5 la calificación más alta, influyendo positivamente. Al sumar estas calificaciones, los valores más altos indican las 3 mejores alternativas.

En el Cuadro 12, se fijan los factores que se deben considerar en la selección de los coagulantes, como también el factor de ponderación, el cual representa la importancia que tiene cada factor en el método

Cuadro 12. Ponderación

FACTOR A EVALUAR	FACTOR DE PONDERACIÓN (%)
Uso en aguas residuales domésticas	8
pH requerido	11
Acción corrosiva en el sistema	8
Facilidad para la formación de flóculos	11
Eficiencia	11
Asequibilidad	8
Estado Líquido	8
Necesidad de coadyuvante de floculación	8
Corrección de pH	8
Velocidad requerida para la formación de flóculos	8
Factibilidad de costos	11
TOTAL	100

En la Tabla 3 se encuentra la matriz de selección, donde se puede observar la calificación de cada aspecto para cada uno de los coagulantes.

Tabla 3. Matriz de selección de los coagulantes

COAGULANTE	Aluminato de sodio	Cloruro Férrico	Clorhidroxido de Aluminio	Policloruro de Aluminio	Polímeros o polielectrolitos	Sales de fierros con polímeros orgánicos	Sulfato de Aluminio	Sulfato Férrico	Sulfato Ferroso	Sulfato Poliférrico
FACTOR A EVALUAR										
Uso en aguas residuales domésticas	1	5	1	5	1	1	5	3	3	3
pH requerido	1	3	5	5	1	3	5	5	1	5
Acción corrosiva en el sistema	5	3	5	5	3	1	5	1	3	1
Facilidad para la formación de flóculos	3	5	5	5	5	3	5	5	3	3
Eficiencia	3	5	3	5	5	3	5	5	5	5
Asequibilidad	3	5	3	5	3	1	5	1	5	1
Estado Líquido	5	5	3	5	5	3	5	1	3	1
Necesidad de coadyuvante de floculación	3	5	3	5	3	3	5	5	5	5
Corrección de pH	3	5	3	5	3	3	5	5	3	3
Velocidad requerida para la formación de flóculos	3	5	3	5	1	3	5	5	5	5
Factibilidad de costos	3	5	3	3	1	3	5	5	3	3
TOTAL PUNTUACIÓN	2.94	4.62	3.44	4.78	2.84	2.52	5.00	3.90	3.48	3.28

Los mayores puntajes obtenidos en la matriz, indican los 3 coagulantes más adecuados para el desarrollo de experimentos, los cuales son: el sulfato de aluminio, el policloruro de aluminio y el cloruro férrico, estos son utilizados en un rango de pH especificado para el agua a tratar, siendo las sustancias más utilizadas en aguas residuales domésticas y eficientes, teniendo poca o nula acción de corrosión en el sistema y un costo bajo o moderado.

Los coagulantes seleccionados son empleados en el desarrollo experimental, empleando la técnica de Test de Jarras, para lograr la determinación de la efectividad de los mismos y la determinación de la dosis óptima en el tratamiento.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE LOS COAGULANTES

La dosis óptima de los coagulantes se determina a través del desarrollo experimental a pequeña escala, realizando el test de jarras.

3.2.1 Metodología de la experimentación. La metodología empleada para los ensayos experimentales incluyó la preparación de los coagulantes, los principios del método, los equipos, instrumentos, y/o materiales, siendo el principal el equipo de jarras.

3.2.1.1 Preparación de coagulantes. Para realizar el test de jarras se utilizaron tres coagulantes: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico. Las dosis recomendadas, según las fichas técnicas de los coagulantes, varían desde 10 ppm hasta 1000 ppm, según el estado del agua.

Para el test se determinó utilizar dosificaciones de 50 ppm, 100 ppm, 150 ppm y 200 ppm. Las cantidades a agregar de cada coagulante, se estimaron teniendo en cuenta la definición de ppm, la densidad y la concentración de los coagulantes.

ppm: Partes por millón

$$\text{ppm} = \frac{mg}{L}$$

ρ : densidad

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

Es necesario tener en cuenta que el volumen de cada jarra es de 800mL, es decir 0.8 L, y que las unidades de masa deben estar en gramos, para poder utilizar la ecuación de densidad, por lo tanto para 50ppm (mg/L), la masa es:

$$\frac{50\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} * 0.8\text{L} = 0.04\text{g}$$

Al aplicar el factor de corrección a la masa indicada, con el porcentaje de pureza del reactivo (17%), se tiene que:

$$\frac{0.04\text{g}}{0.17\text{g}} = 0.2359\text{g} \approx 0.24\text{g}$$

Valor que corresponde a la masa de 50 ppm, se procede a despejar el volumen necesario del reactivo, teniendo en cuenta la densidad del mismo, la cual es 1.12g/mL para el Sulfato de Aluminio.

$$V = \frac{0.24\text{g}}{1.12\text{g/mL}} = 0.2143\text{mL}$$

De esta misma forma se calcula la masa y el volumen para cada reactivo a las diferentes dosificaciones.

En la Tabla 4 se muestran todos los parámetros requeridos para cada coagulante y su respectiva dosificación:

Tabla 4. Parámetros requeridos para los coagulantes y su dosificación

Coagulante	Concentración	Densidad	50 ppm	100 ppm	150 ppm	200 ppm
Sulfato de aluminio	17%	1.12 g/mL	0.24 g	0.48 g	0.71 g	0.94 g
			0.21 mL	0.43 mL	0.63 mL	0.84 mL
Policloruro de aluminio	17%	1.12 g/mL	0.24 g	0.48 g	0.71 g	0.94 g
			0.21 mL	0.43 mL	0.63 mL	0.84 mL
Cloruro férrico	40%	1.42 g/mL	0.1 g	0.2 g	0.3 g	0.4 g
			0.07 mL	0.15 mL	0.2 mL	0.3 mL

3.2.1.2 Test de jarras. El test de jarras es la técnica empleada para seleccionar el coagulante más adecuado, este método es el más utilizado para determinar las dosis óptima de los reactivos, considerando los parámetros que se desean reducir, es decir la Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno y los Sólidos Suspendidos Totales.

Este test permite modelar a nivel laboratorio el proceso que se pretende implementar en el prototipo, comprobando la efectividad del tratamiento en el agua residual doméstica.

El ensayo de jarras es un procedimiento para evaluar el tratamiento, con el fin de reducir el material disuelto, en suspensión, coloidal y no sedimentable del agua a

través de coagulación – floculación química, seguida por sedimentación mediante la gravedad.

La existencia de coloides y sólidos disueltos, involucra procesos dinámicos, dentro de estos se encuentra el proceso hidrodinámico, donde se efectúan las colisiones de partículas desestabilizadas favoreciendo la cohesión entre ellas, formando aglomerados de partículas coloidales, que al unirse, logran sedimentarse por acción de la gravedad⁶⁸.

La prueba de jarras ocurre con diferentes tipos de mezcla y finaliza con la sedimentación de los flóculos formados.

- **Mezcla rápida:** se mezcla el coagulante a cada jarra con las diferentes dosificaciones, utilizando un agitador de múltiples paletas a una velocidad de 175 rpm durante un (1) minuto.
- **Mezcla intermedia:** este tipo de mezcla es importante para que el cambio de velocidad no sea tan brusco y se obtengan mejores resultados. Se establece una velocidad de 85 rpm durante un (1) minuto.
- **Mezcla lenta:** es necesaria para que ocurra la formación de los flóculos con mayor densidad y tamaño, a partir de la colisión de las partículas suspendidas en el agua, a una velocidad de 10 rpm durante un (1) minuto.
- **Sedimentación:** después de realizar la mezcla, se espera a que ocurra la sedimentación en un 80% de los flocs generados, tiempo diferente para cada coagulante.

En el Cuadro 13, se muestran los parámetros establecidos para el test de jarras

Cuadro 13. Parámetros requeridos para el test de jarras

Parámetro	Valor establecido
Velocidad de mezcla rápida	175 rpm
Tiempo de mezcla rápida	1 min
Velocidad de mezcla intermedia	85 rpm
Tiempo de mezcla intermedia	1 min
Velocidad de mezcla lenta	10 rpm
Tiempo de mezcla lenta	1 min
Tiempo de sedimentación	Diferente para cada coagulante
Porcentaje sedimentación de los flocs generados	80%

⁶⁸ FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Química Inorgánica Experimental Práctica No. 7, Determinación de DQO, OD y método de jarras. Bogotá: Uniamérica, programa de Ingeniería de Química

-Procedimiento de test de jarras

1. Evaluar los parámetros de pH, DQO, DBO₅ y SST del agua cruda.
2. Utilizar 4 jarras con 800 mL de muestra, para cada tipo de coagulante.
3. Dosificar la dosis de cada coagulante en cada jarra, comenzando con la menor dosificación hasta alcanzar la más alta. (Previamente medidas).
4. Iniciar la agitación un a 175 rpm durante 1 min, (mezcla rápida), luego durante 1 min a 85 rpm y finalmente, se mezclan a 10 rpm durante otro minuto. Cuando el agitador se detiene se dejan las muestras en reposo, se observa la sedimentación y se mide el tiempo en el cual el 80 % de los sólidos se sedimentaron.
5. Filtrar las muestras y realizar el control correspondiente, evaluando pH y DQO.
6. Determinar la mejor dosificación para cada coagulante, teniendo como referencia la mayor disminución de DQO y la apariencia visual del agua, y a dicha dosificación se le evalúa el parámetro de DBO₅, SST.
7. Realizar replica únicamente a la mejor dosificación obtenida de las tres alternativas y evaluar los parámetros de pH, DQO, DBO₅ y SST.

3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El método realizado para el desarrollo experimental, es el Test de Jarras, incluyendo el análisis de los parámetros a reducir, como lo son Demanda Química de Oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales; para así obtener la mejor alternativa de coagulante, junto con la dosificación correcta.

La selección del coagulante depende de la dosis adecuada del mismo, lo cual se analiza con la evaluación de las alternativas de coagulantes. Las siguientes pruebas corresponden a la misma réplica.

3.3.1 Alternativa coagulante sulfato de aluminio. Los resultados de la prueba con Sulfato de Aluminio se encuentran en la Tabla 10 del Anexo B, donde se observa el comportamiento de los parámetros en las diferentes dosis del mismo.

Se realizó una prueba con 4 dosificaciones diferentes, la más baja fue de 50 ppm y la más alta fue de 200 ppm. Al realizar el desarrollo experimental con todas las dosificaciones se observó el proceso de coagulación, sin embargo el floc formado no fue muy grande, por lo tanto la sedimentación tardó 20 min en ocurrir, presentando el mayor tiempo, en comparación con los otros coagulantes. El color del agua después de sedimentado el floc fue transparente, variando con respecto al agua cruda la cual tenía un aspecto blanco pero translucido.

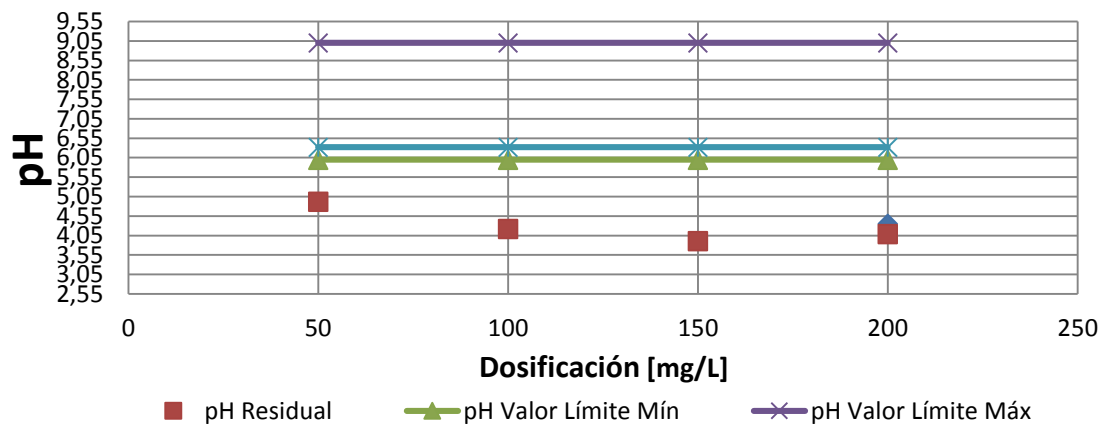
Según los resultados obtenidos del DQO, DBO₅, SST y la apariencia visual de la muestra, se decide que la mejor concentración fue la del recipiente 4 con 200 ppm y se evalúan los demás parámetros establecidos.

Al ser el experimento que presenta la mayor disminución en el parámetro de DQO, DBO₅ y SST en comparación con los otros coagulantes, como se puede observar en la Tabla 10, por lo tanto se realiza el duplicado de la muestra y se evalúan nuevamente los otros parámetros, cuyos resultados se registran en la Tabla 12.

3.3.1.1 Comportamiento del pH. En la Tabla 9 del Anexo B, se encuentran los resultados obtenidos para la muestra original, para las diferentes dosificaciones.

La Gráfica 1, presenta estos valores, el pH en la réplica, límite máximo y mínimo del pH de acuerdo a la resolución 1207 de 2014 para aguas residuales tratadas. Se observa que el rango de pH está entre 4 y 5, disminuyendo a medida que se aumenta la dosificación del Sulfato de Aluminio.

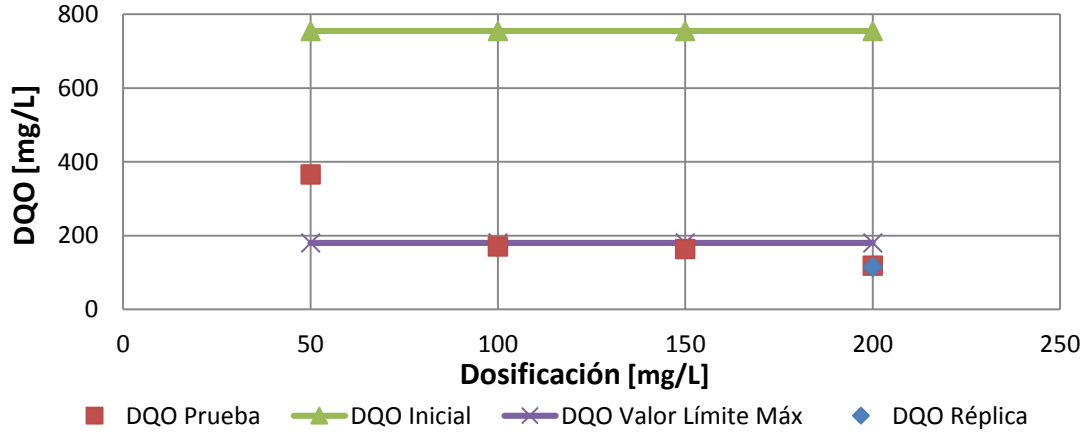
Gráfica 1. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio



3.3.1.2 Comportamiento de la demanda química de oxígeno. En la Tabla 10 del Anexo B se presentan los resultados del DQO del agua cruda y el pH de la prueba para las diferentes cantidades de coagulante.

La Gráfica 2 permite observar que el DQO es menor a medida que se aumenta la dosificación del coagulante, culminando con un valor de 365 ppm en la primera jarra y de 118 ppm en la última, y muestra el valor límite permisible, tomando como referencia la Resolución 631 de 2015, siendo este valor 180mg/L.

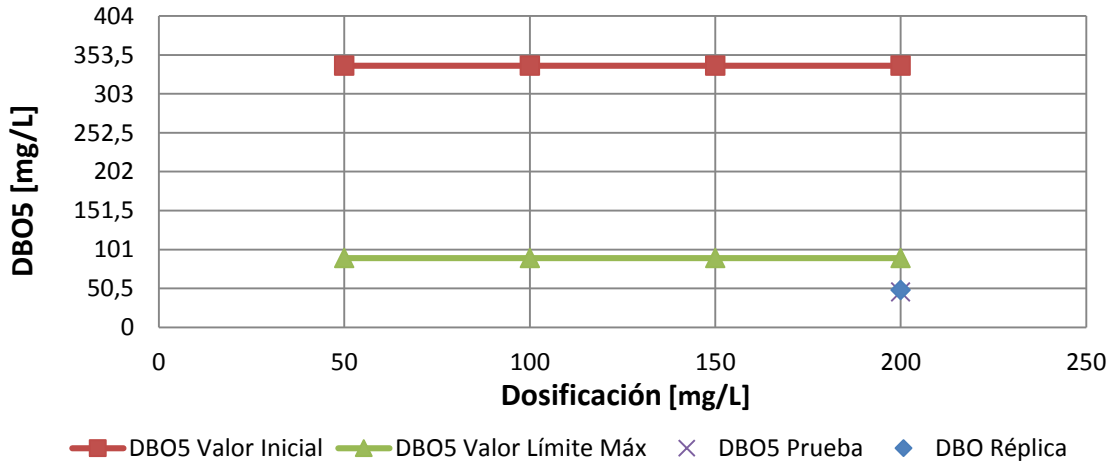
Gráfica 2. Comportamiento de la demanda química de oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio



3.3.1.3 Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno. De acuerdo con la Tabla 9, la cual muestra el DBO₅ del agua cruda, el residual para una dosificación de 200mg/L.

La Gráfica 3 evidencia que el parámetro de DBO₅ disminuyo en la jarra 4, la cual tuvo mayor remoción de DQO y el valor límite según la resolución 631 de 2015.

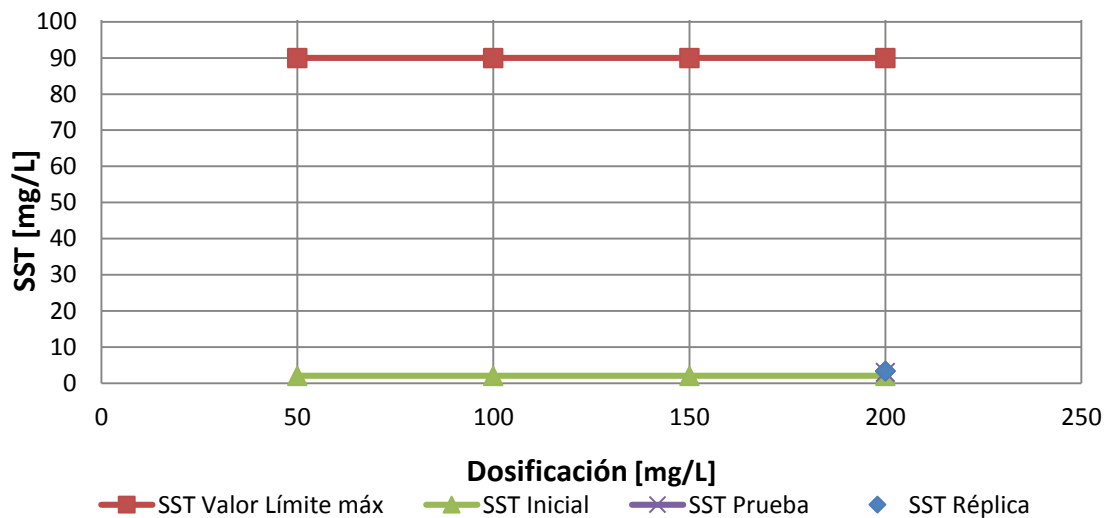
Gráfica 3. Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante Sulfato de Aluminio.



3.3.1.4 Comportamiento de Sólidos Suspendidos Totales. En la Tabla 10, se presentan los resultados obtenidos de los SST del agua cruda y de la prueba para la jarra 4.

En la Gráfica 4 se observa el valor de este parámetro para la jarra 4, aumentando en comparación con los sólidos en el agua cruda y el límite permisible teniendo como referencia la resolución 631 de 2015.

Gráfica 4. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante sulfato de aluminio



3.3.2 Alternativa coagulante policloruro de aluminio. En la Tabla 14 del Anexo C, se encuentran los resultados para la prueba con el policloruro de aluminio.

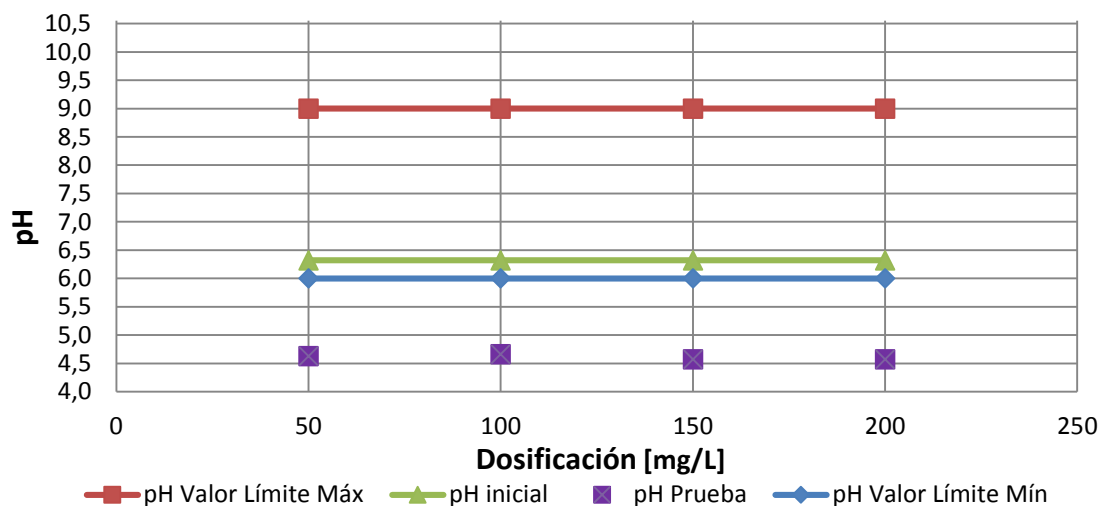
Se realizó el test con 4 dosificaciones, la más baja fue de 50 ppm y la más alta fue de 200 ppm. Se pudo observar que con todas las dosificaciones se presentó coagulación, el floc formado fue mejor que el obtenido con el sulfato de aluminio, aunque el tiempo de sedimentación fue de 15 min. El color del agua después de sedimentado el floc mantuvo el aspecto blanco del agua cruda, sin embargo después de filtrada tomo una apariencia menos blanca y más transparente.

A partir de los resultados obtenidos del DQO y la apariencia visual de la muestra, se decide que la mejor concentración fue la del recipiente 1 con 50 ppm y se analizan los demás parámetros.

3.3.2.1 Comportamiento del pH. La Tabla 14 indica el valor del pH para el agua cruda y para la prueba con diferente con las diferentes dosificaciones.

En la Gráfica 5, se puede observar que el rango de pH está entre 4.57 y 4.63, y tiende a disminuir a medida que se aumenta la dosificación del policloruro de aluminio.

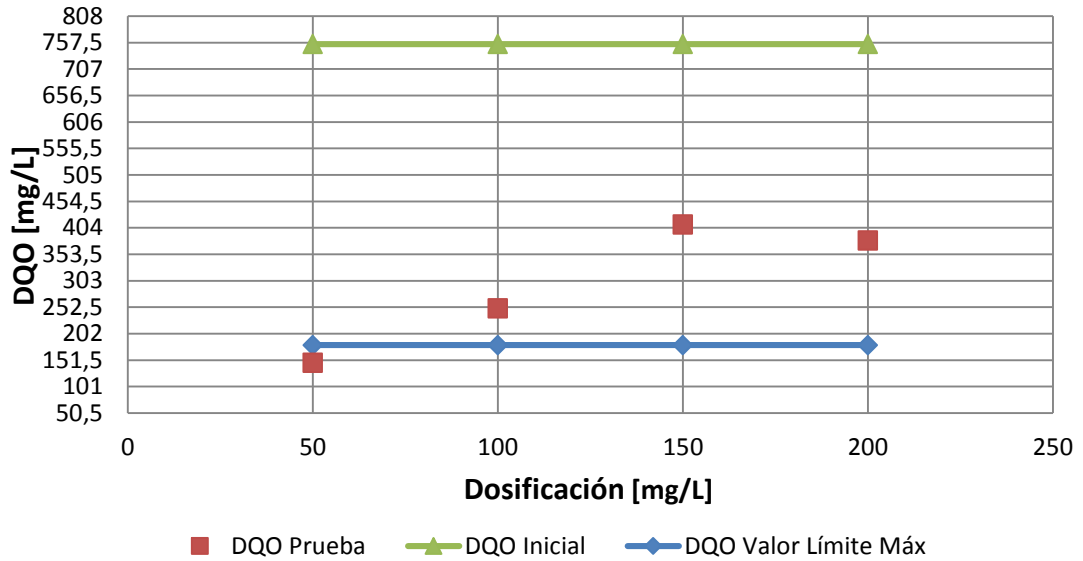
Gráfica 5. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio



3.3.2.2 Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno. El comportamiento del DQO para las diferentes dosificaciones y para el agua cruda se indica en la Tabla 14 del Anexo C.

La Gráfica 6 muestra el incremento del DQO al aumentar la dosificación del coagulante, iniciando con un valor de 146 ppm en la primera jarra y 379 ppm en la última.

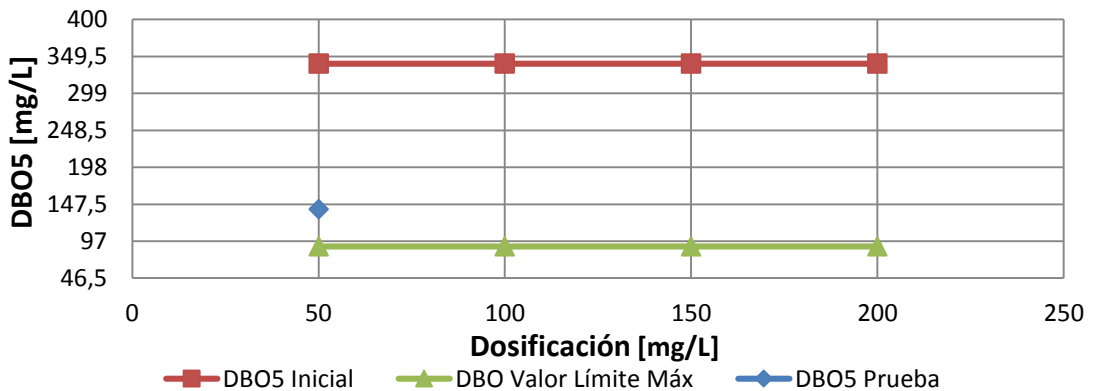
Gráfica 6. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio



3.3.2.3 Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno. Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 14, donde está el DBO₅ del agua cruda, de la prueba para la dosificación de 50mg/L, a cual tuvo la mayor remoción de DQO.

En la Gráfica 7 se observa la reducción de DBO₅ de la jarra uno en comparación con el agua cruda.

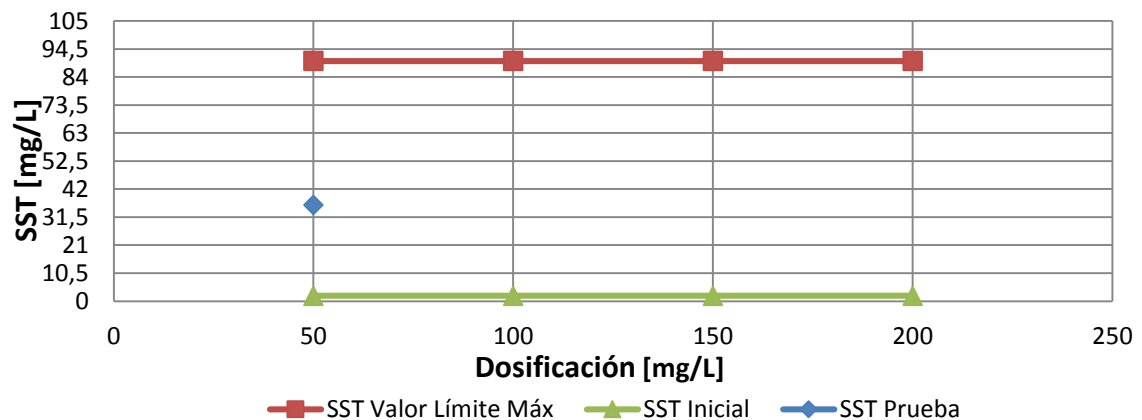
Gráfica 7. Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio.



3.3.2.4 Comportamiento de Sólidos Suspendidos Totales. En la Tabla 14 del Anexo C, se encuentran los resultados de los SST presentes en el agua cruda y el valor para la dosificación de 50mg/L.

La Gráfica 8 muestra el incremento de los sólidos suspendidos totales respecto al agua cruda.

Gráfica 8. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante policloruro de aluminio



3.3.3 Alternativa coagulante cloruro férrico. Los resultados para el ensayo con el Cloruro Férrico se encuentran registrados en la Tabla 17 del Anexo D.

Se utilizó el reactivo con 4 dosificaciones diferentes, la más baja fue de 50 ppm y la más alta fue de 200 ppm. Se observó que con todas las dosificaciones se presentó coagulación, el floc formado fue el mejor de los tres coagulantes y el tiempo de sedimentación también fue el menor de los tres, siendo de 10 min. El color del agua después de sedimentado el floc fue transparente, sin embargo a mayor dosificación seguía siendo transparente pero con una tonalidad roja.

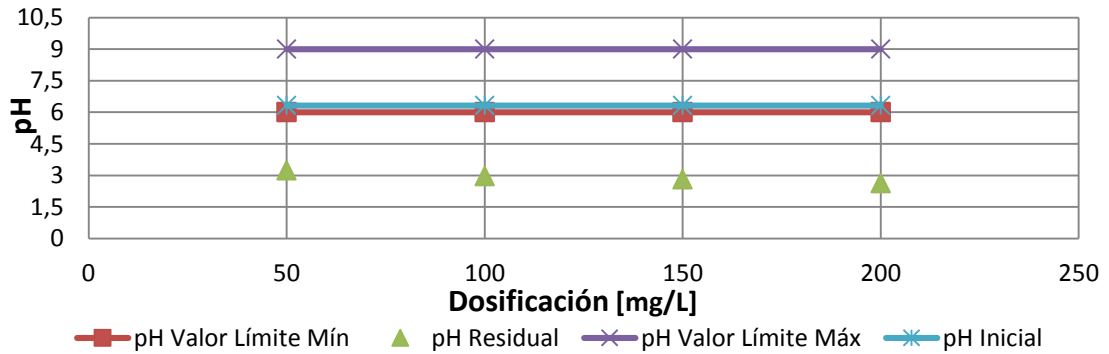
De acuerdo con los resultados obtenidos del DQO y la apariencia visual de la muestra, se establece que la mejor concentración fue la del recipiente 1 con 50 ppm.

3.3.3.1 Comportamiento del pH. La Tabla 17 del Anexo D presenta el valor del pH para el agua cruda y el comportamiento del parámetro a diferentes dosificaciones.

La Gráfica 9 se observa el rango de pH entre 2,6 y 3,2 para el pH residual. Se analiza que el pH tiende a disminuir al incrementar la dosificación del Cloruro

Férrico. También se observan los valores límites permisibles de acuerdo con la normatividad.

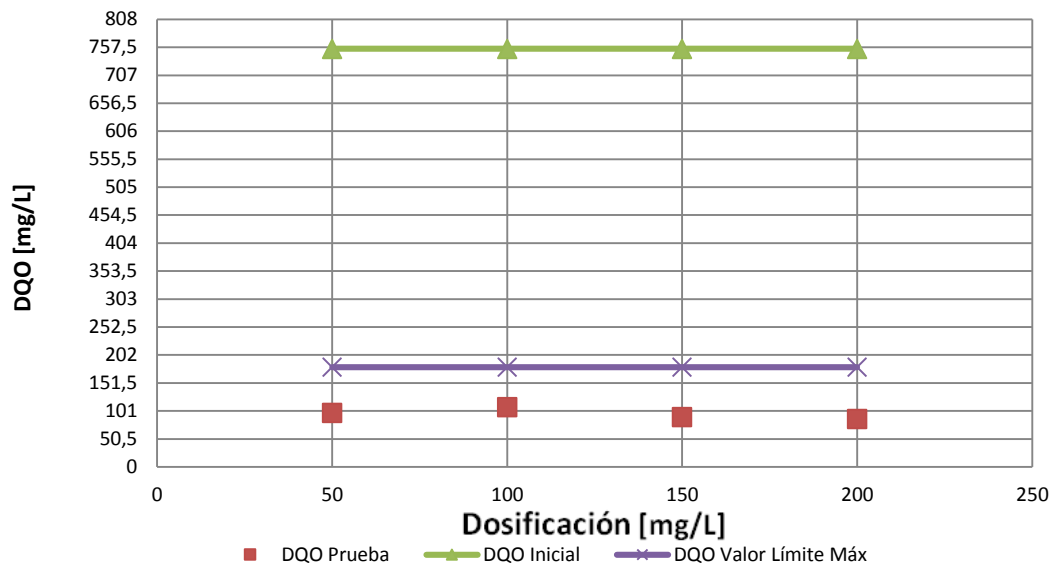
Gráfica 9. Comportamiento del pH con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante Cloruro Férrico



3.3.3.2 Comportamiento de la Demanda Química de oxígeno. Los resultados expuestos en la Tabla 17 del Anexo D permiten observar el DQO del agua cruda y el comportamiento con las diferentes dosificaciones del reactivo.

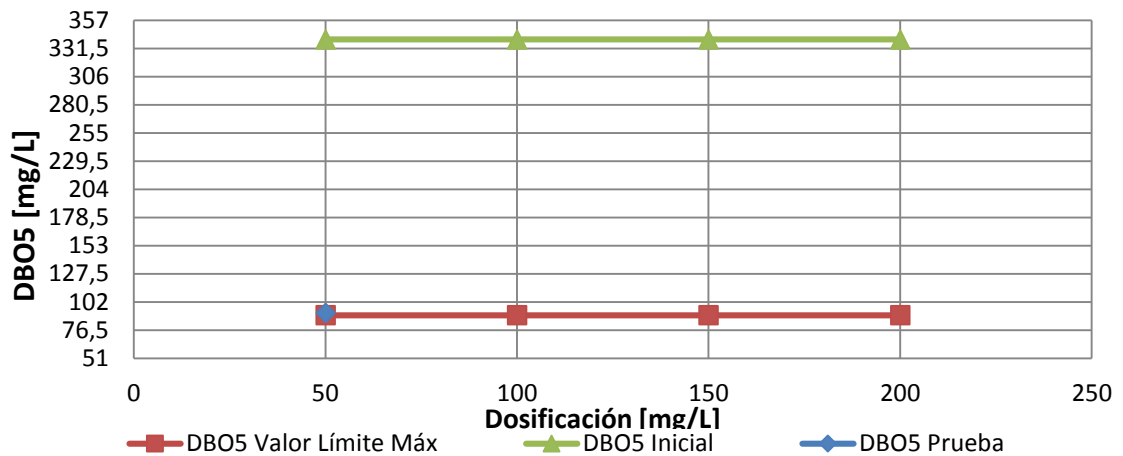
En la Gráfica 10 se evidencia la disminución del DQO a medida que se aumenta la dosificación del coagulante, iniciando con un valor de 114,7 ppm en la primera jarra y terminando con 86,6ppm en la última.

Gráfica 10. Comportamiento de la Demanda Química con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico



3.3.3.3 Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno. Los resultados registrados en la Tabla 17 del Anexo D representan el DBO₅ del agua cruda y el comportamiento del parámetro para diferentes dosificaciones del coagulante, en esta jarra no hubo mayor remoción de DQO, pero si tenía la mejor apariencia visual y como se muestra en la Gráfica 11, el DBO₅ fue menor al usar el coagulante en comparación con el resultado para el agua cruda.

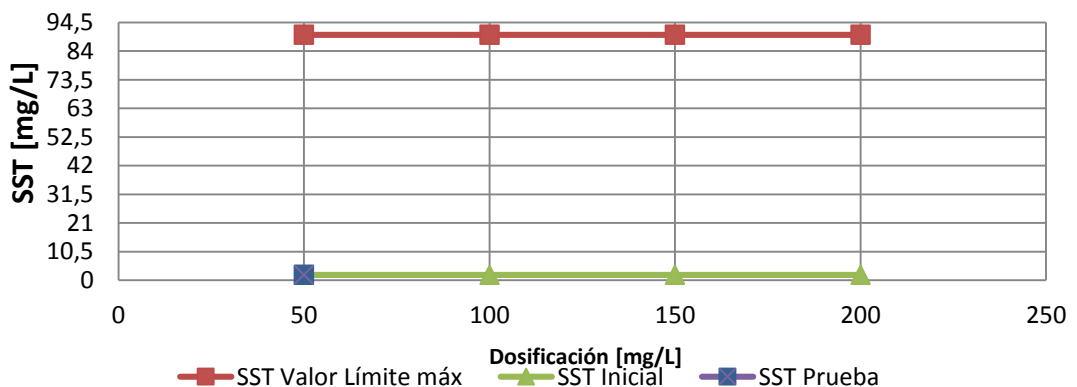
Gráfica 11. Comportamiento de la Demanda Biológica de Oxígeno con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico



3.3.3.4 Comportamiento de sólidos suspendidos totales. Los datos registrados en la Tabla 17 son obtenidos al evaluar los SST en el agua cruda y el comportamiento del parámetro con el coagulante en las 4 jarras.

En la Gráfica 12 se observa que los Sólidos Suspendidos Totales se mantienen en comparación con el agua cruda.

Gráfica 12. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales con las dosis empleadas de 50 a 200 mg/L con el coagulante cloruro férrico



3.3.4 Análisis de resultados. El desarrollo experimental permitió evaluar el comportamiento en los parámetros de pH, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales a diferentes dosificaciones con las diferentes sustancias coagulantes.

Estas sustancias se seleccionan a partir de la investigación teórica, teniendo en cuenta los factores influyentes en el uso de las mismas para el agua residual doméstica, siendo los más apropiados: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico. Para así determinar la dosis adecuada en el tratamiento del agua residual doméstica, logrando la disminución en la Demanda química de oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales.

La mejor alternativa de coagulante para emplear en el tratamiento es el Sulfato de Aluminio con una dosificación de 200 ppm, debido a que presentó la mayor disminución de DQO, DBO₅ y SST con respecto a la muestra original del agua.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 10 del Anexo B, el pH de la muestra del agua cruda, está en 6,32, el cual cumple con la resolución 1207 de 2014 para aguas residuales tratadas, al aplicar los coagulantes, los valores están entre 3.91 y 4.92, los cuales no están dentro del rango de la norma, entre 6 y 9. Por lo tanto, es necesario corregir el pH con hidróxido de potasio. Esta corrección se debe hacer después de agregado el coagulante.

Los otros parámetros evaluados con el Sulfato de Aluminio, cumplen con la Resolución 631 de 2015, normatividad tomada como base para los parámetros de DQO y DBO₅, donde el valor máximo para DQO es 180mg O₂/L, para DBO 90mg O₂/L y para SST 90 mg/L.

3.4 POSIBLES ALTERNATIVAS DE MEJORA OPERACIONALES

3.4.1 Impulsor de la bomba. Agregar al sistema del prototipo un tanque que suministre inhibidor secuestrante de oxígeno como la hidracina. Pero por un tema de espacio y de economía no es factible.

Otra posible solución es cambiar el material del impulsor por Acero Martensítico AISI 410, pues este tipo de acero inoxidable es altamente resistente a la corrosión y a esfuerzos mecánicos, y posee alta dureza; proceso que no es viable financieramente para el desarrollo de este proyecto, únicamente si se implementa a escala mayor el prototipo.

La solución más efectiva y económica para el impulsor de la bomba es cambiarlo cada dos años, ya que la corrosión que presenta el impulsor es moderada.

3.4.2 Tanque de almacenamiento. El tanque propuesto para el almacenamiento se divide en dos compartimientos, uno de recolección y estabilización y otro de suministro del agua tratada, con una válvula de retención que comunica las dos partes, agitador eléctrico para mejorar el proceso de floculación.

3.4.3 Otras Mejoras. Adición de regulador automático de pH, filtro de carbón activado, tanque y bomba dosificadora de Sulfato de Aluminio.

4. ESPECIFICACIONES DE LAS MEJORAS PROPUESTAS EN EL PROTOTIPO

Para implementar las mejoras en el prototipo referenciado, se propone la modificación del tanque de almacenamiento, junto con la utilización de coagulantes dentro del mismo tanque con su respectiva dosificación. El tanque de almacenamiento modificado está ubicado por encima del nivel del piso, para poder facilitar la observación, control y retiro de los lodos.

4.1 MONTAJE Y AJUSTE DEL EQUIPO

4.1.1 Mejora en el funcionamiento

4.1.1.1 Tanque de almacenamiento. El tanque propuesto para el almacenamiento y la estabilización del agua procedente de la ducha, tiene las siguientes dimensiones 0.82m x 0.85m x 0.26m, y está conformado por dos compartimientos, los cuales son:

- Compartimiento de recolección y estabilización
- Compartimiento de suministro del agua tratada

(Ver Figura 22. Implementaciones específicas en el tanque de almacenamiento)

Estas divisiones se comunican entre sí, a través de una válvula de retención tipo clapeta oscilante.⁶⁹

Las dimensiones del tanque se definen con base en el volumen determinado, teniendo en cuenta que el tiempo en que una persona se ducha es de 16.46 min, el caudal de la ducha es de 5.23 L/min, el promedio de habitantes por vivienda es 4.32 habitantes.

Por lo tanto el volumen diario generado en la ducha se obtiene de la siguiente manera:

$$4.32 * 16.46 \text{ min} * \frac{5.23L}{\text{min}} = 371.89L$$

Por otra parte para la descarga del sanitario, existe un promedio de descarga de 3.259 veces el sanitario, con un volumen de descarga de 6L, el agua requerida para descargar el sanitario se calcula así:

⁶⁹ MORENO, Claudio. Valoración cuantitativa de la reducción en la demanda de agua potable. Colombia: Universidad de Manizales, 2014. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/.../271195063_VALORACION_CU...

$$4.32 * 6L * 3.259 = 84.47L$$

Volumen que está disponible, al utilizar un tanque con las siguientes dimensiones anteriormente especificadas.

➤ **Materiales empleados en el tanque**

-Fibra de Vidrio: Material utilizado en la base del tanque y en la tapa superior. Se estima un espesor de 10mm debido a la resistencia del material y al peso moderado, se toma como referencia dos personas con un peso promedio de 80 Kg por persona y con un factor de seguridad de 1.25, para un peso total de 200 Kg.

-Acrílico Transparente: Empleado en las 4 tapas laterales y en la división del tanque. Con un espesor de 3mm, dado que la presión del agua es bastante baja en el tanque.

$$\text{Presión del agua} = \gamma * h$$

$$\text{Presión del agua} = 1000 \frac{Kg}{m^3} * \frac{9.8m}{s^2} * 0.26m = 2548 \frac{N}{m^2} = 2548 Pa$$

$$\text{Presión del agua} = 2548Pa/10^6 = 2.55 * 10^{-3} MPa$$

$$\text{Presión del agua} = 2.55 * 10^{-3} MPa * 145.038 = 0.37 Psi$$

Las dimensiones de las tapas son 0.26m * 0.82m.

4.1.1.2 Válvula de retención tipo clapeta oscilante. Es una válvula anti retorno que permite el paso del agua en un solo sentido desde el compartimiento de recolección y estabilización hacia el compartimiento de suministro del agua tratada. Se encuentra ubicada en la división del tanque.

Su diámetro es de 2.5 pulgadas, equivalente a 6.25cm.⁷⁰

Figura 37. Válvula de retención tipo clapeta oscilante



Fuente. Ecoflap.

⁷⁰ ECOFLAP. Clapeta anti retorno para redes domésticas. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.cagcanalizaciones.com/ecoflap-brid-a-clapeta-anti-retorno-para-redes-domesticas>

4.1.1.3 Sensor de nivel. Cada vez que el tanque alcance su máximo nivel, actuará un sensor que permite el funcionamiento del agitador y se apaga cuando el nivel del tanque es mínimo (0.05m).

4.1.1.4 Tuberías. El material de la tubería es policloruro de vinilo liso (PVC), con diámetro de ½ pulgada, equivalente a 12.7mm, y una longitud requerida de 6m⁷¹.

Se utiliza para transportar el agua desde el tanque de la bomba dosificadora de coagulante al compartimiento de recolección y estabilización, y del compartimiento de suministro del agua tratada hacia la cisterna.

4.1.2 Mejora en la estética y el mantenimiento

4.1.2.1 Compartimiento de recolección y estabilización. Área donde se deposita el agua una vez utilizada en la ducha, a través de la rejilla ubicada en el piso, y dentro del mismo ocurre el tratamiento de coagulación.

Sus dimensiones corresponden al 30% del tamaño del tanque, las cuales son 0.25m x 0.82m x 0.26m, en esta área se encuentran los lodos sedimentados, generados por la coagulación. Por medio de un acrílico transparente, instalado como tapa lateral, se observa el nivel y estado de los lodos, los cuales se retiran manualmente de forma periódica.

4.1.2.2 Compartimiento de suministro del agua tratada. En esta sección se encuentra el agua tratada, lista para ser suministrada al sanitario. Sus dimensiones corresponden al 70% del tamaño del tanque, las cuales son 0.60m x 0.82m x 0.26m.

4.1.3 Mejoras en la calidad y tratamiento del agua

4.1.3.1 Agitador eléctrico. Para que el tiempo de coagulación sea muy breve y la disolución sea lo más homogénea posible, es necesario utilizar un agitador, en este caso de tipo eléctrico⁷².

Figura 38. Agitador eléctrico



Fuente. Gines, Ortuno.

⁷¹ DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabian A. y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A. Op. Cit. p. 30.

⁷² TIMSA. Coagulación – floculación agua. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.timsa.com/coagulacion-floculacion-agua/>

El eje es de 750mm de longitud, y el material en que está construido es acero inoxidable AISI 316. Funciona con un adaptador de corriente de 110 V corriente alterna a 12 V corriente continua.⁷³

4.1.3.2 Regulador automático de pH. Equipo automático necesario para corregir el pH con Hidróxido de potasio, debido a que al aplicar el coagulante (Sulfato de Aluminio), los valores del pH están entre 3.91 y 4.92, los cuales no están dentro del rango de la norma que es de 6-9, resolución 1207 de 2014 para aguas residuales tratadas. Es de fácil parametrización, debido al menú visualizado en la pantalla LCD y evita la sobredosificación⁷⁴.

Figura 39. Regulador de pH



Fuente. TIENDA PISCINAS.NET. Productos exclusivos Zodiac Premium/995. Regulación automática de ph zodiac Expert.

4.1.3.3 Filtro de carbón activado. Equipo encargado de mitigar el mal olor del agua, elimina los sólidos en suspensión; y su medio filtrante es carbón activado.

Figura 40. Filtro de carbón activado



Fuente. EL ALMACÉN DEL AGUA. Filtro carbón activo

⁷³ GINES, Ortuno. Agitadores eléctricos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.ginesortuno-sl.es/agitadores-electricos.html>

⁷⁴ TIENDA PISCINAS.NET. Productos exclusivos Zodiac Premium/995. Regulación automática de ph zodiac Expert. [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.tienda-piscinas.net/blog-productos-exclusivos-zodiac-premium/995-regulacion-automatica-de-ph-zodiac-ph-expert.html>

En el Cuadro 14 se encuentran las características técnicas de este tipo de filtro.

Cuadro 14. Características técnicas del filtro de carbón activado⁷⁵

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Composición	carbón activado
Altura	9 "3/4
Peso	350 g
Dimensiones	247 x 68 x 27mm (alto x largo x ancho)

Fuente. EL ALMACÉN DEL AGUA. Filtro carbón activo

4.1.3.4 Tanque de bomba dosificadora de coagulante. El material del tanque es plástico, fabricado con polietileno lineal 100% virgen, con espesor de 2.0 mm, el cual contiene el coagulante Sulfato de Aluminio, necesario para realizar el tratamiento del agua procedente de la ducha.⁷⁶

El volumen del tanque incorporado al dosificador debe permitir la disolución del coagulante, obteniendo así una solución con una concentración aproximada a la óptima determinada en el test de jarras⁷⁷.

4.1.3.5 Bomba dosificadora de coagulante. La dosificación de la sustancia química empleada como coagulante, se efectúa a través de una bomba dosificadora, capaz de liberar cantidades prefijadas de esta sustancia en una unidad de tiempo. La bomba dispone de controles que permiten fijar la cantidad que se debe suministrar dentro de los límites que caracterizan su capacidad⁷⁸.

Figura 41. Bomba dosificadora de coagulante



Fuente. ICPSUPPLIES.COM.⁷⁹

⁷⁵ EL ALMACÉN DEL AGUA. Filtro carbón activo. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.elalmacendelagua.es/filtro-carbon-activo>

⁷⁶ ABACOL. Tanques para almacenamiento de agua y productos químicos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.abacol.co/agua.html>

⁷⁷ BVSDE. Dosificación. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757-02d.pdf>

⁷⁸ Ibíd.

⁷⁹ ICPSUPPLIES.COM. Bombas dosificadoras. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.jcpsupplies.com/productos/bombas/bombas-dosificadoras/>

La bomba dosificadora empleada es de tipo diafragma compacta, de operación mecánica, velocidad rotativa fija y variación manual de carrera a través del ajuste en la biela. Diseñada para trabajo continuo en la dosificación de cloro, soda caustica [12.5%], coagulantes y aglomerantes químicos. Su referencia es C-614P de Cheem – Feed, y sus especificaciones son:

Caudal máx. @ P (Atm): 1 GPH (3.8 LPH)
 Caudal @ P (Máx.): 0.7 GPH (2.6 LPH)
 Presión máxima / P (Máx.): 125 PSI

Incluye válvula de inyección, válvula de pie, pesa cerámica, tornillos de montaje, manguera de succión PCV 3/8" (Transparente.) con una longitud de 1.5 m y una manguera de descarga PE 3/8" (Opaca) con una longitud de 1.5m. No incluye clavija eléctrica⁸⁰.

En el Cuadro 15 se presentan los materiales de la bomba dosificadora.

Cuadro 15. Materiales de la bomba dosificadora

MATERIALES	
Cabezal:	Kynar(PVDF)
Diafragma:	Recubrimiento Teflón
Válvulas Cheque:	Cerámica
Cartuchos:	Kynar(PVDF)
Válvula de Pie:	Kynar(PVDF)/Polipropileno/Cerámica/Vitón
Válvula de Inyección:	Polipropileno/Cerámica/Vitón

Fuente. JCP SUPPLIES LTDA

En el Cuadro 16 se encuentran las características de la bomba dosificadora.

Cuadro 16. Características de la bomba dosificadora

CARACTERÍSTICAS	
Longitud Stroke:	4% – 100% (Manual)
Altura de Succión máx.:	3 mca
Máxima Viscosidad:	1.000 cPs
Temp. Ambiente:	-10°C a 43°C
Temp. Fluido máx.:	54°C
Voltaje:	115VAC (0.74A max)
Peso:	3.6 kg
Encerramiento:	NEMA Tipo 1 IP20

Fuente. JCP SUPPLIES LTDA

⁸⁰ JCP SUPPLIES LTDA. Bombas dosificadoras de agua. www.jcpsupplies.com › Productos › Bombas. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.jcpsupplies.com/productos/bombas/bombas-dosificadoras/>

4.2 RESUMEN DE ACCESORIOS

En el Cuadro 17 se presentan los demás accesorios del prototipo.

Cuadro 17. Resumen de accesorios

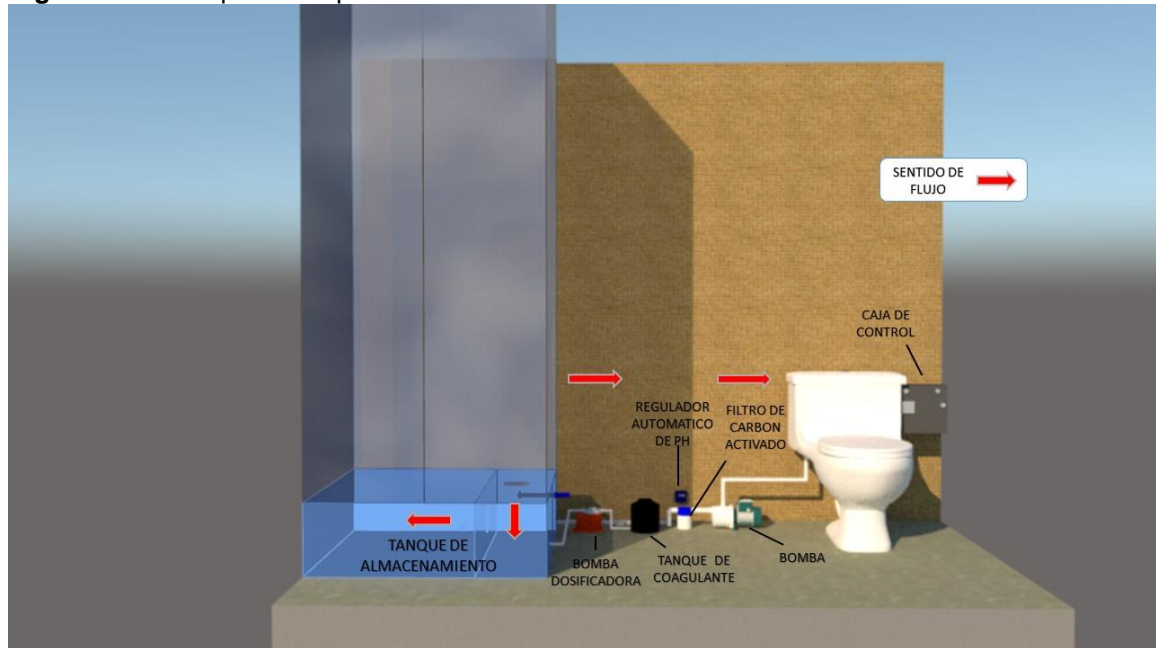
Accesorio Tubería	Número de Accesorios
Entrada de tubería	1
Codo suave 90°	10
Uniones roscadas	8
Válvula de retención	1
Filtro	1
Reducciones	2
Electroválvula	1

Fuente. DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A. y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A.

4.3 PROTOTIPO MODIFICADO

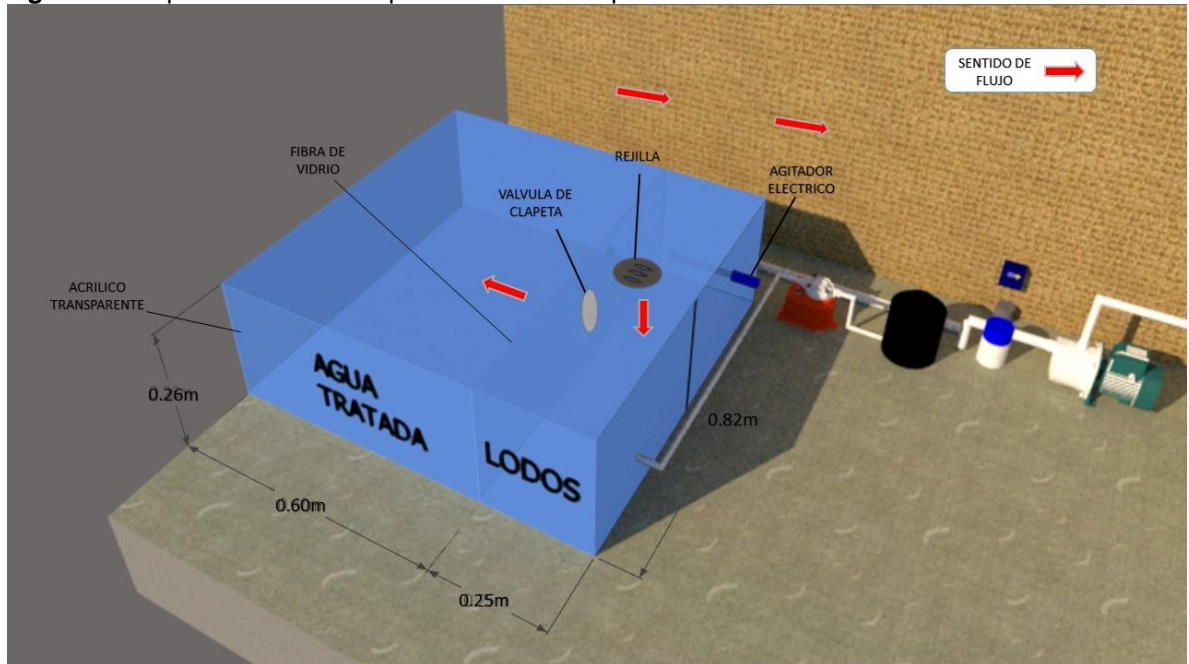
Se conserva el principio básico del prototipo, ajustando algunos aspectos como lo es el tratamiento químico, la ubicación del tanque de almacenamiento por encima del nivel del piso, la modificación de las medidas del mismo y la reubicación de la caja de control. Incluye filtro de carbón activado, bomba de agua, regulador de pH, tanque de coagulante y bomba dosificadora.

Figura 42. Prototipo con implementaciones



El tratamiento químico se lleva a cabo en el tanque de almacenamiento, el cual cuenta con dos compartimientos, uno de recolección y estabilización y el otro de suministro de agua, conectados entre sí a través de una válvula de clapeta. La coagulación ocurre con ayuda del agitador eléctrico. La sección de recolección y estabilización es llamada también “lodos” y el área de suministro de agua, se denomina “agua tratada”. Tal como se muestra en la Figura 22.

Figura 43. Implementaciones específicas en el tanque de almacenamiento



5. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO EN UN CASO DE ESTUDIO ESTRATO 1-3

Teniendo en cuenta las mejoras propuestas a implementar en el prototipo, dentro de las cuales está el insumo coagulante y el corrector de pH, siendo el Sulfato de Aluminio la mejor alternativa, con una dosis óptima de 200mg/L.

5.1 COSTOS

5.1.1 Costos de los equipos. Se hace necesario conocer el valor de los equipos y elementos constitutivos del prototipo reciclador de aguas domésticas.

En la Tabla 5 se indica el costo de los equipos e instrumentos necesarios para la construcción del prototipo modificado, no se tiene en cuenta el costo de instalación.

Tabla 53. Costo de los equipos e instrumentos

DESCRIPCIÓN	VALOR
Fibra de Vidrio	100.000
Acrílico Transparente	80.000
Válvula de retención tipo clapeta oscilante	75.000
Tubería PVC 6 m y accesorios	25.000
Agitador Eléctrico	250.000
Filtro de carbón activado	150.000
Tanque de bomba dosificadora 10L	15.000
Regulador Automático de pH	800.000
Bomba dosificadora de coagulante	1.000.000
Cofre con Medidas Aproximadas de 100 x 100 x 200 mm	35.000
Selector de Muletilla Seguridad	19.000
Piloto de Señalización Tipo Led 110 V AC	28.000
Breaker de Protección 1x5mm	14.000
Bornera de Conexión para 10A, 10 salidas	24.000
1 Metro de Cable 12 AWG para Conexión de Control	30.000
1 Metro de Manguera Transparente Refuerzo Anillo Agua 1/2 "	104.000
Acople de 1/2 "x 1/2 " en Nylon para Conexiones	40.000
Abrazadera 1/2 "Inox	40.000
Kit de Montaje Tablero de Control	185.000
1 Metro de Manguera Transparente Refuerzo Anillo Agua 3/8 "	104.000
Bomba eléctrica de 1/4 de HP a 110 V AC	289.000
Sensor de Nivel para Tanque 1/4 - NC	405.000
Válvula Selenoide CNX 110 V AC 2/2	370.000
TOTAL	(COP) 4.182.000

5.1.2 Costos de mantenimiento. El valor estimado para los costos de mantenimiento es 5% anual del valor de la inversión. Debido a la incertidumbre en las fallas que se pueden presentar.

5.1.3 Costos de insumos. Los insumos son el Sulfato de Aluminio como coagulante y el hidróxido de potasio como corrector de pH.

En la Tabla 6 se describe el valor del Sulfato de Aluminio de acuerdo a la dosis óptima (200mg/L) en el test de jarras y el volumen del tanque de almacenamiento (371.89L).

Tabla 6. Masa de coagulante por unidad de volumen

Mg de Coagulante	Volumen de Agua
200mg	1L
74.396mg	371.89L

Entonces la cantidad en gramos mensual de coagulante es de 74.396g y anual de 892.752 g. En la Tabla 7 se encuentra el valor de los insumos de acuerdo a la masa especificada.

Tabla 74. Valor de reactivo por unidad de masa

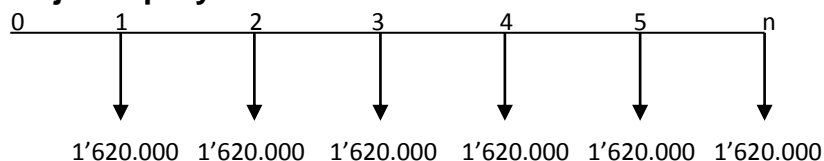
Reactivo	Valor
Sulfato de Aluminio (1Kg)	\$ 6.000
Hidróxido de Potasio (1Kg)	\$ 22.000
Sulfato de Aluminio (892.75 g)	\$ 20.000
Hidróxido de Potasio (892.75g)	\$ 5.000

Siendo el total de los insumos (\$25.000), la suma del Sulfato de Aluminio e Hidróxido de Potasio, para 892.75g.

5.2 COMPARACIÓN DE FLUJOS DE CAJA E INDICADORES FINANCIEROS

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se debe determinar el flujo de caja sin proyecto y con proyecto para un periodo de 15 años, que es el tiempo estimado de créditos hipotecarios y se asume este mismo tiempo para que una vivienda sea habitada por la misma familia. Después obtener un flujo de caja diferencial entre los flujos de caja anteriormente nombrados, y de esta manera calcular y analizar los indicadores financieros, para posteriormente determinar el periodo de recuperación de la inversión.

5.2.1 Flujo de caja sin proyecto.



Valor aproximado de la factura del agua: \$1'620.000 anual (\$135.000 mensual), siendo 312m³ (\$5.192/m³) el volumen promedio de consumo del recurso hídrico anualmente (26 m³ mensualmente).

El valor anual del consumo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Valor Anual de Consumo} = \text{Consumo en m}^3 * \text{Costo del m}^3 * 12 \text{ meses}$$

$$\text{Valor Anual de Consumo} = 26\text{m}^3 * \$5.192/\text{m}^3 * 12 \text{ meses}$$

$$\text{Valor Anual de Consumo} = 1'620.000$$

-Valor Presente Neto (VPN):

$$VPN = -C \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right)$$

Donde:

C: Costo anual en la factura del agua

i: Tasa de interés

n: Tiempo en meses

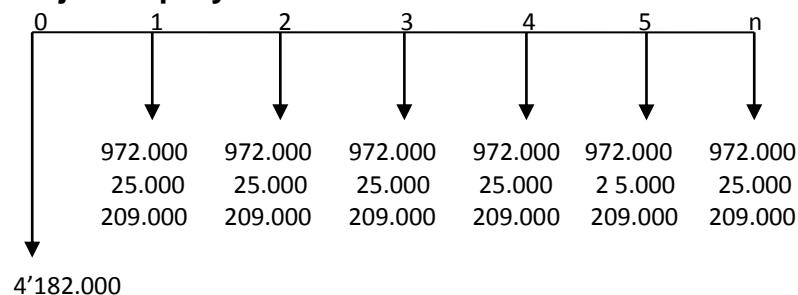
Al reemplazar los valores del flujo de caja en la ecuación anterior:

$$VPN = -135.000 \left[\frac{(1 + 0.03)^{180} - 1}{0.03(1 + 0.03)^{180}} \right]$$

$$VPN = -4'478.000$$

Sin proyecto, no existen ingresos, únicamente egresos, por esta razón el valor presente neto es menor a 0.

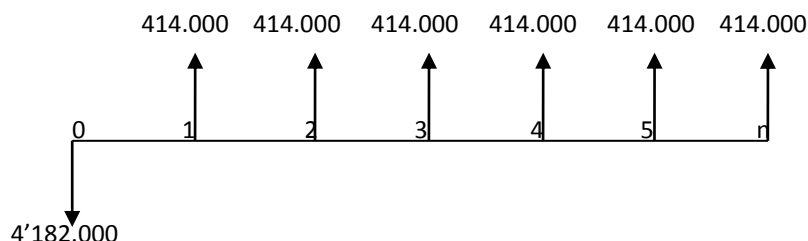
5.2.2 Flujo de caja con proyecto.



Inversión: \$4'182.000

Valor aproximado de la factura del agua teniendo en cuenta el 40%⁸¹, de ahorro anual con el prototipo: \$972.000 (\$81.000 mensuales).
 Costo de Insumos: 25.000 Anualmente. (\$2.100 mensuales).
 Mantenimiento anual (5% de la inversión): \$209.000 (\$17.400 mensuales).

5.2.3 Flujo diferencial. La diferencia entre los anteriores flujos de caja, se toma como ingresos para el flujo de caja con proyecto.



Inversión: \$4'182.000

Ingresos en términos de ahorro anual: \$414.000 (\$34.500 mensual).

En la Tabla 8, se observan los valores finales de los diferentes flujos.

Tabla 85. Flujo de caja diferencial

AÑO	0	1	2	3	4	5
Flujo sin proyecto		1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000
Flujo de caja con proyecto	4.182.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000
Flujo de caja diferencial	-4.182.000	414.000	414.000	414.000	414.000	414.000
AÑO	0	6	7	8	9	10
Flujo sin proyecto		1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000
Flujo de caja con proyecto	4.182.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000
Flujo de caja diferencial	-4.182.000	414.000	414.000	414.000	414.000	414.000
AÑO	0	11	12	13	14	15
Flujo sin proyecto		1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000
Flujo de caja con proyecto	4.182.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000	1.206.000
Flujo de caja diferencial	-4.182.000	414.000	414.000	414.000	414.000	414.000

A continuación se calculan los indicadores financieros, valor presente neto (VPN), tasa interés de retorno (TIR) y relación beneficio costo (B/C):

⁸¹ *Ibíd.*, p. 78

-Valor Presente Neto (VPN):

$$VPN = -I_0 + B \left(\frac{(1 + TIO)^n - 1}{TIO(1 + TIO)^n} \right)$$

Donde:

*I*₀: Inversión del proyecto

B: Ingreso en términos de ahorro mensual

TIO: Tasa de interés de oportunidad, porcentaje correspondiente al depósito de término fijo (DTF)⁸².

n: Tiempo en meses

Reemplazando los valores para el flujo de caja con proyecto:

$$VPN = -4'182.000 + 34.500 \left(\frac{(1 + 0.0491)^{180} - 1}{0.0491(1 + 0.0491)^{180}} \right)$$

$$VPN = 141.000$$

El valor presente neto es positivo, lo cual indica que el proyecto es viable.

-Tasa Interna de Retorno (TIR): Tasa de interés cuando el VPN es igual a cero.

$$0 = -I_0 + B \left(\frac{(1 + TIO)^n - 1}{TIO(1 + TIO)^n} \right)$$

$$0 = -4'182.000 + 34.500 \left(\frac{(1 + 0.0491)^{180} - 1}{0.0491(1 + 0.0491)^{180}} \right)$$

$$TIR = 0.054$$

La tasa interna de retorno (TIR) al ser mayor a cero, como también mayor a la tasa de interés de oportunidad (TIO) indica que el proyecto es viable, pues es posible recuperar la inversión del prototipo durante 10 años, debido a que el rendimiento es mayor al que se requiere como mínimo.

⁸² BANCO DE LA REPÚBLICA. Tasas de captaciones semanales y mensuales. Depósito a término fijo. [En línea], [consultado el 11 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.banrep.gov.co/es/df>

-Relación Beneficio/ Costo (B/C):

$$\frac{B}{c} = \frac{\text{VPN de ahorros}}{\text{VPN de ingresos}}$$

Al reemplazar en la ecuación:

$$\frac{B}{c} = \frac{4'323.000}{4'142.000}$$

$$\frac{B}{c} = 1.0438$$

La relación beneficio/costo es mayor a uno, es decir que los ingresos en términos de ahorro son mayores que los costos del prototipo.

Para determinar el periodo de recuperación se utiliza la siguiente expresión:

$$PR = a + \left(\frac{b - c}{d}\right)$$

Donde:

a: Periodo antes que se recupere la inversión

b: Inversión

c: Suma de flujos antes que se recupere la inversión

d: Flujo neto donde se recupera la inversión

$$PR = 10 + \left(\frac{4'182.000 - 4'140.000}{4'140.000}\right)$$

$$PR = 10.0101 \text{ años}$$

$$0.0101 \text{ años} * 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} * 30 \frac{\text{dias}}{\text{mes}} = 3 \text{ días}$$

El periodo de recuperación de la inversión es de 10 años y 3 días.

5.3 ANÁLISIS DE LOS INDICADORES FINANCIEROS

A partir de la evaluación de los indicadores financieros para el proyecto con las mejoras implementadas, se determina que es viable, debido a que el valor presente neto y la tasa de interés retorno son mayores a cero (0), para el caso de TIR que es menor a TIO, también indica que el rendimiento es mayor al que se requiere como mínimo. El indicador de costo beneficio es mayor a uno (1), lo cual

indica que los costos son superiores al valor presente de los ingresos, es decir que el proyecto es rentable y la inversión es posible recuperarla en diez (10) años y tres (3) días, teniendo en cuenta que el tiempo estimado de habitación de una vivienda por parte de una familia es de 15 años.

El proyecto va enfocado a viviendas de interés social estrato 1-3, con posibles incentivos y financiación por parte del gobierno para lograr llevarlo a cabo, debido a que tiene un valor agregado por su alto impacto ambiental en beneficio de la comunidad.

6. CONCLUSIONES

- Se determinó que los parámetros de Demanda Química de Oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales de acuerdo a la caracterización del agua residual doméstica procedente de la ducha incumplían con la Resolución 1207 de 2014 y con la Resolución 631 de 2015.
- Se observó el deterioro de la carcasa y la presencia de corrosión por tensión y oxígeno en el impulsor de la bomba, también se identificaron falencias en la estética y el funcionamiento del equipo, siendo necesaria la modificación de las dimensiones del tanque de almacenamiento, la adecuación del mismo para la implementación del tratamiento químico, y la inclusión de diferentes equipos e instrumentos para la correcta operación del equipo en un apartamento de estrato 1 a 3.
- Se determinó el tratamiento químico a implementar en el prototipo, el cual consta de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, por lo cual, se seleccionaron las alternativas de coagulantes, por medio de la realización de una matriz de selección, obteniendo como alternativas coagulantes el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico.
- Se determinó que el coagulante más apropiado una vez realizado el desarrollo experimental, empleando el test de jarras con cada uno de los coagulantes seleccionados para reducir los parámetros de DQO, DBO₅ y SST es el sulfato de aluminio con una dosis óptima de 200mg/L reporta la mayor disminución de los parámetros evaluados, cumpliendo con la normatividad.
- Se analizaron los indicadores financieros, realizando el flujo de caja sin proyecto, el flujo de caja con el ahorro del 40% del proyecto, los costos de mantenimiento y los insumos y el flujo de caja con proyecto, donde los ingresos corresponden a la diferencia de los dos flujos anteriores. Teniendo como resultado que el proyecto es viable financieramente, es decir que la inversión puede ser recuperada en el transcurso de 10 años, teniendo en cuenta que 15 años es el tiempo estimado de la habitación de una vivienda por parte de una familia promedio.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar mantenimiento a los equipos y elementos constituyentes del sistema anualmente, con el fin de retardar el desgaste.
- Cambiar el impulsor de la bomba cada 2 años, para evitar ruptura o daño general de la bomba de agua.
- Revisar constantemente el nivel de los lodos en el compartimiento de recolección y estabilización del tanque de almacenamiento y efectuar el retiro de de los mismos cuando estos alcancen su máximo nivel.
- Implementar el prototipo reciclador de aguas domésticas con financiación por parte del gobierno, en viviendas de interés social, teniendo en cuenta el valor ambiental agregado, al reducir el consumo del recurso hídrico.
- La viabilidad financiera puede ser mejorada utilizando otros materiales y/o masificando el prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

ABACOL. Tanques para almacenamiento de agua y productos químicos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.abacol.co/agua.html>

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Consulta de Normas. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.alcaldia bogota.gov.co/sisjur/normas/ Norma1. jsp?i=53667>

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Juan Manuel. Estructuras metálicas y materiales compuestos. Inspector en pruebas no destructivas, conferencista y columnista en pinturas y corrosión. 1990, p. 34-36. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: www.inpralatina.com › Control de Corrosión.

AULA VIRTUAL. Caracterización de las aguas residuales. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/Demos/Simulacion/modulos/ Curso/uni_03/ U3C3S5.htm#Anchor6

BANCO DE LA REPÚBLICA. Tasas de captaciones semanales y mensuales. Depósito a término fijo. [En línea], [consultado el 11 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.banrep.gov.co/es/df>

BROWN, Teodoro. Química central. pág. 621. . [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <https://es.slideshare.net/ Diegol FV/quimica-la-cienciacentral>

BVSDE. Dosificación. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757-02d.pdf>

CATALÁN. Tratado del agua: control de la contaminación y depuración. Tema 14: Floculación y Coagulación. 2005, p. 107. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: [ocw.bib.upct.es/ mod/resource/ view.php?id=5698&redirect=1](http://ocw.bib.upct.es/mod/resource/view.php?id=5698&redirect=1)

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL AGUA. CIDTA. Gestión y tecnología del agua. España; Universidad de Salamanca. 2014.

CINÉTICA QUÍMICA. Policloruro de aluminio. [En línea], [consultado el 12 de noviembre de 2017]. Disponible en Internet: <http://policloruro de aluminio. com/>

CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 373 de 1997. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf

DÍAZ GÓMEZ, Diego A.; PÉREZ ORJUELA, Fabián A- y RODRÍGUEZ NIETO, Wilber A. Diseño, implementación y evaluación de prototipo para un sistema de reutilización de aguas grises que reduzca el consumo de agua potable en una vivienda unifamiliar. Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores, Proyecto de grado, facultad de Ingeniería Química.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. diagnostico ambiental del manejo de vertimientos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf.

DIGESA-MINSALUD. Parámetros organolépticos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf

ECOFLAP. Clapeta anti retorno para redes domésticas. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.cagcanalizaciones.com/ecoflap-brida-clapeta-anti-retorno-para-redes-domesticas>

EL ALMACÉN DEL AGUA. Filtro carbón activo. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.elalmacendelagua.es/filtro-carbon-activo>

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Metalografía: preparación de probetas y observación al microscopio. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Química Inorgánica Experimental Práctica No. 7, Determinación de DQO, OD y método de jarras. Bogotá: Uniamérica, programa de Ingeniería de Química.

GINES, Oruno. Agitadores eléctricos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.ginesortuno-sl.es/agitadores-electricos.html>

GLYNN Henry y HEINKE, Gary W. Libro de Ingeniería ambiental. Contaminación y tratamiento de aguas residuales. p. 98. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.u-cursos.cl/usuario/.../mi_blog/r/ingenieria-ambiental_glynn.pdf

HIDRITEC. Parámetros de caracterización del agua. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.hidritec.com/hidritec/parametros-de-caracterizacion-del-agua>

ICPSUPPLIES.COM. Bombas dosificadoras. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.jcpsupplies.com/productos/bombas/bombas-dosificadoras/>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto., 1998.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto , 1998.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónica. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM-. Demanda química del Oxígeno. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.ideam.gov.co/documents>

JCP SUPPLIES LTDA. Bombas dosificadoras de agua. www.jcpsupplies.com › Productos › Bombas. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.jcpsupplies.com/productos/bombas/bombas-dosificadoras/>

LÓPEZ RINCÓN, Jackson y VERGARA BAUTISTA, Nayibe. Elaboración de una guía ambiental para la reutilización de aguas grises y aprovechamiento de las aguas lluvias en edificaciones. Santander: Universidad Industrial de Santander, facultad de Ingeniería Físicoquímicas

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.. Resolución 631 de 2015. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambientes_0631_205.htm

INDICADORES AMBIENTALES ECONÓMICOS. La contabilidad nacional verde en Colombia y su contribución con el desarrollo de indicadores ambientales económicos. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MMA-0034/MMA-0034-CAPITULO5.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207 de 2014. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet:

http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.. Resolución 631 de 2015. [En línea], [consultado el 23 de febrero de 2017]. Disponible en Internet: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambientes_0631_2015.htm

MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL. Población y principales indicadores demográficos de Colombia. [En línea], [consultado el 23 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: https://www.imebu.gov.co/web2/documentos/observatorio/demografia/indicadores_demograficos_2020.pdf

MORENO, Claudio. Valoración cuantitativa de la reducción en la demanda de agua potable para descarga de aguas residuales en sanitarios mediante la implementación de medidas y tecnologías de utilización de aguas grises. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/profile/Claudio_Alberto_Moreno/publication/271195063

PUCP. Metalografía: Ensayos metalográficos conocimiento de materiales. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: icp.pucp.edu.pe/formacion-continua/analisis-metalografico/

RESTREPO, Alberto. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Medellín: Universidad Nacional, 2009-206 p.

SCIELO COLOMBIA. Polielectrolitos sintéticos. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=_OGMwaGkgQC&printsec=frontcover&source=gbs_r&cad=0

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE –SENA- Unidad 3: potabilización del agua. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://es.scribd.com/doc/305534568/Guia-de-Aprendizaje-Unidad-3>

TIENDA PISCINAS.NET. Productos exclusivos Zodiac Premium/995. Regulación automática de ph zodiac Expert. [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.tienda-piscinas.net/blog-productos-exclusivos-zodiac-premium/995-regulacion-automatica-de-ph-zodiac-ph-expert.html>

TIMSA. Coagulación – floculación agua. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.timsa.com/coagulacion-floculacion-agua/>

PÉREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante -sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP. [En línea], [consultado el 12 de noviembre de 2018]. Disponible en Internet: repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6371/.../6112811-2017-2-IQ.pdf

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. –uclm- Tema 5. Coagulación-Floculación. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf
Tema 5. Coagulación-Floculación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ensayos estructurales: metalografía y microscopía. Ciencia y Tecnología de los Materiales. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: www.academia.edu/8476186/Ensayo_de_metalografia

UN PERIÓDICO. Crean dispositivo para ahorrar agua en el hogar. 2013. [En línea], [consultado el 2 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/crean-dispositivo-paraahorrar-agua-en-el-hogar.html>

VILA CASADO, Gustavo. Corrosión. Electroquímica – mecanismos y métodos de control. Bogotá: Universidad Nacional, unidad de publicaciones. Facultad de Ingeniería, 1990, p. 3

ANEXO A

EQUIPOS

Microscopio Metalográfico

Se diferencia del microscopio biológico en que la muestra del microscopio metalúrgico es más iluminada, debido a que una muestra metalográfica es opaca a la luz, esta debe ser iluminada por la luz reflejada.

En la figura 23 se observa cómo un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejado, a través de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Parte de la luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplifica al traspasar el sistema inferior de los lentes, el objetivo y recorre hasta arriba por medio del reflector de vidrio plano, nuevamente se amplifica el sistema superior de lentes, es decir el ocular. Cada objetivo tiene un aumento específico. La amplificación inicial del objetivo y del ocular está grabado por lo general en la base de la lente. Al combinar el objetivo, el ocular y la longitud adecuada de tubo, la amplificación total es igual al producto de las amplificaciones del objetivo y del ocular, por ejemplo, si se tiene un objetivo de 60 x y un ocular de 10x se obtiene un aumento de 600x.

El microscopio metalográfico está compuesto básicamente por el objetivo, el ocular y el iluminador, siendo el más crítico el objetivo, debido a la influencia que tiene en la calidad de la imagen⁸³.

Figura 44. Microscopio Metalográfico

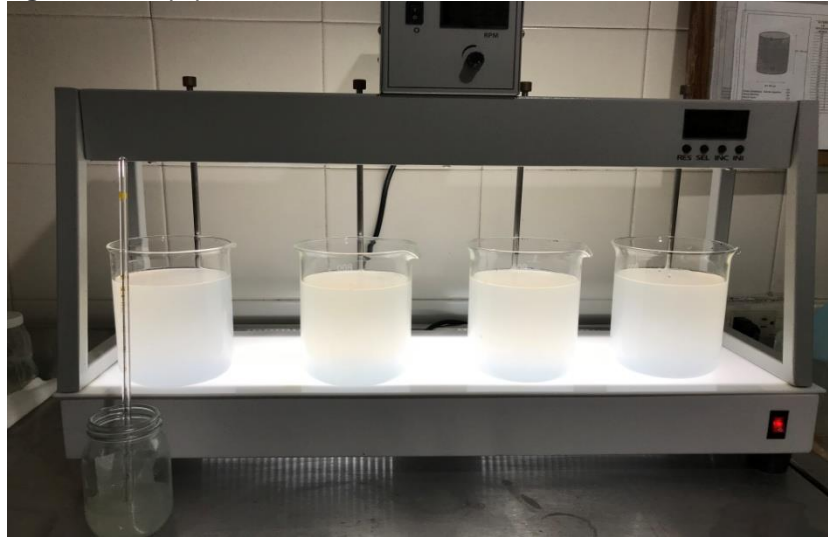


⁸³ ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Op. Cit. p. 35

Equipo de test de jarras

Es un floculador digital con capacidad para cuatro jarras. Consta de un agitador de múltiples paletas, con velocidad de rotación variable y alta precisión, las cuales actúan de manera simultánea, manteniendo las mismas condiciones sobre las cuatro jarras. También cuenta con un transiluminador, que cubre todo el equipo, el cual permite visualizar mejor el proceso de coagulación.

Figura 45. Equipo de Test de Jarras



ANEXO B

RESULTADOS DE TRATABILIDAD EN EL TEST DE JARRAS: COAGULACIÓN CON SULFATO DE ALUMINIO

Tabla 9. Dosificaciones para el Sulfato de Aluminio

REACTIVOS	IDENTIFICACIÓN DEL RECIPIENTE			
	1 mg/L	2 mg/L	3 mg/L	4 mg/L
1. SULFATO DE ALUMINIO - LÍQUIDO (17%)	50	100	150	200

Tabla 6. Resultados de los parámetros con el sulfato de aluminio

PARÁMETROS	CRUDA	RECIPIENTE N°				
		Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	
pH	Unidad	6.32	4.92	4.22	3.91	4.09
DQO	mg/L	754.7	365.2	170.4	163.5	118.3
DBO	mg/L	339.6	-----	-----	-----	45.9
SST	mg/L	<2.0	-----	-----	-----	3.0

Tabla 7. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el sulfato de aluminio

PARÁMETRO	Unidades	RECIPIENTE			
		1	2	3	4
Velocidad de mezcla rápida	rpm	175	175	175	175
Tiempo de mezcla rápida	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla intermedia	rpm	85	85	85	85
Tiempo de mezcla intermedia	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla lenta	rpm	10	10	10	10
Tiempo de mezcla lenta	min	1	1	1	1
Tiempo de formación primer FLOC	s	NA	NA	NA	NA
Tiempo de sedimentación	min	20	20	20	20
TEMPERATURA °C		19	19	19	19

Tabla 12. Análisis de control para la réplica con sulfato de aluminio

PARÁMETROS	UNIDADES	CRUDA	SULFATO DE ALUMINIO (200 ppm)
pH	Unidad	6.32	4.35
DQO	mg/L	754.7	114.7
DBO	mg/L	339.6	48.4
SST	mg/L	<2.0	3.3

ANEXO C

RESULTADOS DE TRATABILIDAD EN EL TEST DE JARRAS: COAGULACIÓN CON POLICLORURO DE ALUMINIO

Tabla 8. Dosificaciones para el policloruro de aluminio

REACTIVOS	IDENTIFICACIÓN DEL RECIPIENTE			
	1	2	3	4
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1. POLICLORURO DE ALUMINIO - LÍQUIDO (17%)	50	100	150	200

Tabla 14. Resultados de los parámetros con el policloruro de aluminio

PARÁMETROS		CRUDA	RECIPIENTE N°			
			Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
pH	Unidad	6,32	4.63	4.66	4.57	4.57
DQO	mg/L	754,7	146.1	250.4	410.4	379.6
DBO	mg/L	339,6	140.6	-----	-----	-----
SST	mg/L	<2,0	36	-----	-----	-----

Tabla 15. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el policloruro de aluminio

PARÁMETRO	Unidades	RECIPIENTE			
		1	2	3	4
Velocidad de mezcla rápida	rpm	175	175	175	175
Tiempo de mezcla rápida	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla intermedia	rpm	85	85	85	85
Tiempo de mezcla intermedia	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla lenta	rpm	10	10	10	10
Tiempo de mezcla lenta	min	1	1	1	1
Tiempo de formación primer FLOC	s	NA	NA	NA	NA
Tiempo de asentamiento	min	15	15	15	15
TEMPERATURA °C		19	19	19	19

ANEXO D

RESULTADOS DE TRATABILIDAD EN EL TEST DE JARRAS: COAGULACIÓN CON CLORURO FÉRRICO

Tabla 16. Dosificaciones para el cloruro férrico

REACTIVOS	IDENTIFICACIÓN DEL RECIPIENTE			
	1	2	3	4
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1. CLORURO FÉRRICO - LÍQUIDO (40%)	50	100	150	200

Tabla 9. Resultados de los parámetros con el cloruro férrico

PARÁMETROS		CRUDA	RECIPIENTE N°			
			Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
pH	Unidad	6,32	3.24	2.96	2.81	2.63
DQO	mg/L	754,7	97.38	107.8	90.4	86.6
DBO	mg/L	339,6	92.12	-----	-----	-----
SST	mg/L	<2,0	1.68	-----	-----	-----

Tabla 10. Parámetros requeridos para el Test de jarras con el Cloruro Férrico

PARÁMETRO	Unidades	RECIPIENTE			
		1	2	3	4
Velocidad de mezcla rápida	rpm	175	175	175	175
Tiempo de mezcla rápida	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla intermedia	rpm	85	85	85	85
Tiempo de mezcla intermedia	min	1	1	1	1
Velocidad de mezcla lenta	rpm	10	10	10	10
Tiempo de mezcla lenta	min	1	1	1	1
Tiempo de formación primer FLOC	s	NA	NA	NA	NA
Tiempo de sedimentación	min	10	10	10	10
TEMPERATURA °C		19	19	19	19