

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO POR COAGULACIÓN PARA LAS
AGUAS RESIDUALES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CEMENTOS ARGOS
S.A. PLANTA RÍOCLARO, MUNICIPIO DE SONSÓN – ANTIOQUIA, PARA FINES DE
REÚSO.

EDWIN DAVID REYES CASTRO
MANUELA ISABEL CARVAJAL SUESCÚN

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS, PECUARIA Y DEL MEDIO AMBIENTE - ECAPMA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MEDELLÍN - 2016

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO POR COAGULACIÓN PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CEMENTOS ARGOS S.A. PLANTA RÍOCLARO, MUNICIPIO DE SONSÓN – ANTIOQUIA, PARA FINES DE REÚSO.

EDWIN DAVID REYES CASTRO
MANUELA ISABEL CARVAJAL SUESCÚN

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Asesor: JUAN DAVID CORREA ESTRADA
Ingeniero Ambiental. M.Sc Ingeniería Urbana

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS, PECUARIA Y DEL MEDIO AMBIENTE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MEDELLÍN – 2016

Tabla de Contenido

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3. JUSTIFICACIÓN	6
4. OBJETIVOS	8
4.1 GENERAL.....	8
4.2 ESPECÍFICOS.....	8
5. MARCO TEÓRICO.....	9
5.1 ASPECTO GENERAL.....	9
5.2 TIPOS Y TRATAMIENTOS DE LOS VERTIMIENTOS INDUSTRIALES, EN UNA CENTRAL TÉRMICA	11
5.2.1 Purga de torre de enfriamiento.	11
5.2.1.1 <i>Características de la purga de torre de enfriamiento.</i>	11
5.2.1.2 <i>Tratamiento para la purga de torre de enfriamiento.</i>	12
5.2.2 Purga de caldera.	13
5.2.2.1 <i>Características de la purga de caldera.</i>	13
5.2.2.2 <i>Tratamientos para la purga de caldera.</i>	14
5.2.3 Resinas de intercambio iónico: Regeneración de resinas aniónicas y catiónicas.....	15
5.2.3.1 <i>Características de las resinas de intercambio iónico.</i>	15
5.2.3.2 <i>Tratamiento para las resinas de intercambio iónico.</i>	15
5.2.4 Rechazo de ósmosis inversa.	17
5.2.4.1 <i>Características del rechazo de ósmosis inversa.</i>	17
5.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA Y NORMATIVIDAD	18
5.3.1 Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la central termoeléctrica.....	18
5.3.1.1 <i>Sólidos Suspendidos</i>	20
5.3.1.2 <i>Color</i>	20
5.3.1.3 <i>Conductividad</i>	20
5.3.1.4 <i>Temperatura</i>	21
5.3.1.5 <i>Potencial de hidrógeno – pH</i>	21
5.3.2 Normatividad.....	22
5.3.2.1 <i>Ley 373 de 1997</i>	22
5.3.2.2 <i>Decreto 3930 de 2010</i>	23
5.3.2.3 <i>Decreto 1900 de 2006</i>	23
5.3.2.4 <i>Resolución No. 0631 de 2015</i>	23
5.3.2.5 <i>Resolución 1207 de 2014</i>	23
5.3.2.6 <i>Resolución 1096 del 2000</i>	24

5.4 COAGULACIÓN	24
5.4.1 Coagulación de aguas.....	24
5.4.2 Propiedades de los coloides.....	26
5.4.2.1 <i>Propiedades cinéticas.</i>	26
5.4.2.2 <i>Propiedades ópticas.</i>	26
5.4.2.3 <i>Propiedades de superficie.</i>	26
5.4.2.4 <i>Propiedades electrocinéticas.</i>	27
5.4.3 Fuerzas que intervienen entre los coloides.....	27
5.4.3.1 <i>Coulómbicas.</i>	27
5.4.3.2 <i>Van der Waals.</i>	27
5.4.4 Fases de la coagulación.	29
5.4.5 Tipos y ayudantes de coagulación.....	30
5.4.5.1 <i>Tipos de coagulantes.</i>	30
5.4.5.2 <i>Auxiliares de coagulación.</i>	31
5.4.6 pH óptimo para la coagulación.....	32
5.4.7 Aspectos de la coagulación - floculación.....	33
5.4.7.1 <i>Modelo físico.</i>	34
5.4.7.2 <i>Modelo químico.</i>	35
5.4.8 Mecanismo de la coagulación.	36
5.5 FLOCULACIÓN	37
5.6 SEDIMENTACIÓN.....	38
5.7 ENSAYOS DE CONTROL PARA LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.....	38
5.7.1 Gradiente de velocidad.....	40
5.7.2 Gradientes de velocidad recomendados	42
5.8 CONSIDERACIONES ACERCA DEL ENSAYO DE JARRAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	44
6. METODOLOGÍA	45
6.1 FASE I - DIAGNÓSTICO.....	45
6.2 FASE II - EXPERIMENTAL.....	45
6.2.1 Variables, métodos de determinación y procedimientos.....	45
6.2.2 Materiales y Equipos	46
6.2.3 Muestreo	48
6.2.4 Preparación de las soluciones de coagulantes y ayudante de coagulación.....	48
6.2.5 Ensayos de jarras	49
6.2.6 Etapa pre-experimental.....	50
6.2.6.1 <i>Gradiente de velocidad</i>	51
6.2.6.2 <i>Análisis de resultados</i>	51
6.2.7 Etapa Experimental	51
6.2.7.1 <i>Análisis de resultados</i>	52
6.3 FASE III - RECOMENDACIÓN.....	52

7. ANÁLISIS RESULTADOS	54
7.1 FASE I – DIAGNÓSTICO	54
7.1.1 Identificación del proceso.....	54
7.1.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas, requeridas en el proceso de generación de energía termoeléctrica.	57
7.1.3 Características fisicoquímicas históricas del agua en el tanque de clarificada.	58
7.1.4 Balance másico cuantitativo del recurso hídrico, en el proceso de generación de energía.	59
7.1.5 Características fisicoquímicas de los efluentes que componen las aguas residuales industriales de la central térmica.....	62
7.1.6 Huella hídrica.	64
7.2 FASE EXPERIMENTAL	65
7.2.1 Etapa Pre-experimental	65
7.2.2 Etapa experimental	71
7.2.2.1 <i>Relación ΔpH vs coagulante.</i>	72
7.2.2.2 <i>Relación ΔSólidos suspendidos vs coagulante.</i>	74
7.2.2.3 <i>Relación Δ Color vs coagulante.</i>	76
7.2.2.4 <i>Relación ΔConductividad vs coagulante.</i>	77
7.2.2.5 <i>Relación Δ Cantidad de lodo vs coagulante.</i>	79
8. CONCLUSIONES	82
9. RECOMENDACIONES	84
LISTA DE REFERENCIAS	90
ANEXOS	99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1.</i> Tasas de sedimentación para algunas partículas.....	25
<i>Tabla 2.</i> Incremento del área superficial a medida que el tamaño de los coloides disminuye.....	26
<i>Tabla 3.</i> Características de agitadores.....	40
<i>Tabla 4.</i> Valores del gradiente de velocidad G, para el aparato generalmente usado en el laboratorio.....	43
<i>Tabla 5.</i> Valores de gradientes ensayados.	43
<i>Tabla 6.</i> Tiempos y gradientes óptimos para sulfato y policloruro de aluminio.....	44
<i>Tabla 7.</i> Variables, métodos de determinación y procedimientos.	46
<i>Tabla 8.</i> Materiales y equipos, empleados en los ensayos o test de jarra.	46
<i>Tabla 9.</i> Adición de dosis, según el estándar del ensayo.	49
<i>Tabla 10.</i> Estándares de los parámetros fisicoquímicos de agua en el ciclo de generación de energía.	57
<i>Tabla 11.</i> Variables reportadas a en tanque de agua clarificada.....	58
<i>Tabla 12.</i> Balance másico cuantitativo, del recurso hídrico en el proceso de generación de energía.....	59
<i>Tabla 13.</i> Balance másico cuantitativo de los vertimientos industriales, termoeléctrica de RíoClaro.	60
<i>Tabla 14.</i> Variables reportadas para la torre de enfriamiento.	63
<i>Tabla 15.</i> Variables reportadas para rechazo de ósmosis inversa.	63
<i>Tabla 16.</i> Variables reportadas para purga de caldera.	64
<i>Tabla 17.</i> Ensayos preliminares de tratabilidad de las aguas residuales industriales.....	66
<i>Tabla 18.</i> Gradiente de velocidad número uno.	66
<i>Tabla 19.</i> Gradiente de velocidad número dos.	67
<i>Tabla 20.</i> Análisis de varianza para ΔpH	72
<i>Tabla 21.</i> Suma de cuadrados tipo III.....	73
<i>Tabla 22.</i> Análisis de varianza para Δ Sólidos Suspendedos.	74
<i>Tabla 23.</i> Suma de cuadrados tipo III.	75
<i>Tabla 24.</i> Análisis de varianza para Δ Color.	76
<i>Tabla 25.</i> Suma de cuadrados tipo III.	76
<i>Tabla 26.</i> Análisis de varianza para Δ Conductividad.	78
<i>Tabla 27.</i> Suma de cuadrados tipo III.	78
<i>Tabla 28.</i> Análisis de varianza para Δ Cantidad de lodo.	79
<i>Tabla 29.</i> Suma de cuadrados tipo III.	80
<i>Tabla 30.</i> Análisis comparativo entre la calidad fisicoquímica de la purga de caldera vs el estándar de calidad en el tanque de agua cruda.	84
<i>Tabla 31.</i> Análisis comparativo entre la calidad de agua a la salida del sistema de clarificación propuesto vs el estándar de calidad en el tanque de agua cruda.....	85
<i>Tabla 32.</i> Análisis comparativo entre la calidad de agua a la salida del sistema de ósmosis propuesto vs el estándar de calidad en el tanque de agua clarificada.	86
<i>Tabla 33.</i> Balance másico cuantitativo de las proyecciones de recuperación de las aguas residuales de la central termoeléctrica de RíoClaro.....	88
<i>Tabla 34.</i> Tabla de resultados fase experimental.....	99

LISTA DE FIGURAS

Pág.

<i>Figura 1.</i> Torre de enfriamiento, Cementos Argos - planta RíoClaro.	12
<i>Figura 2.</i> Caldera, Cementos Argos - planta RíoClaro.	14
<i>Figura 3.</i> Resinas de intercambio iónico, Cementos Argos - planta RíoClaro.	16
<i>Figura 4.</i> Ósmosis inversa, Cementos Argos planta RíoClaro.	19
<i>Figura 5.</i> Coloide con carga neta negativa.	28
<i>Figura 6.</i> Modelo esquemático del proceso de coagulación.	30
<i>Figura 7.</i> Neutralización de cargas de los coloides con el sulfato de aluminio.	31
<i>Figura 8.</i> Proceso de formación de flóculos mediante coagulantes poliméricos.	33
<i>Figura 9.</i> Modelo físico de la coagulación.	34
<i>Figura 10.</i> Coagulación por neutralización de carga.	35
<i>Figura 11.</i> Aglomeración de partículas coloidales, empleando floculante.	37
<i>Figura 12.</i> Efecto de los parámetros relacionados por la Ley de Stokes sobre la velocidad de sedimentación.	38
<i>Figura 13.</i> Curva de calibración para jarras de 1 Litro.	41
<i>Figura 14.</i> Paleta tipo Phips & Bird.	42
<i>Figura 15.</i> Procedimiento para la realización de los ensayos de jarras.	50
<i>Figura 16.</i> Diagrama de flujo, del proceso de investigación.	53
<i>Figura 17.</i> Diagrama de la planta de tratamiento de aguas, Cementos Argos S.A.	54
<i>Figura 18.</i> Esquema del proceso de generación de energía, tren de generación de vapor.	56
<i>Figura 19.</i> Porcentajes de consumo de agua por proceso, en la central termoeléctrica.	60
<i>Figura 20.</i> Balance másico cuantitativo de consumo de agua por proceso.	61
<i>Figura 21.</i> Balance másico cuantitativo porcentual de los afluentes de los vertimientos.	62
<i>Figura 22.</i> Registro histórico de huella hídrica, para la generación de energía eléctrica de RíoClaro.	64
<i>Figura 23.</i> Registro del año 2015 de huella hídrica, para la generación de energía eléctrica de RíoClaro.	65
<i>Figura 24.</i> Sistema de neutralización, Central termoeléctrica de RíoClaro; Julio 20 de 2015.	68
<i>Figura 25.</i> Porcentajes de remoción de color y sólidos suspendidos en los ensayos preliminares para cada gradiente.	68
<i>Figura 26.</i> Dosis óptimas en los ensayos preliminares con el gradiente de velocidad 1.	69
<i>Figura 27.</i> Dosis óptimas en los ensayos preliminares con el gradiente de velocidad 2.	69
<i>Figura 28.</i> Ensayos de jarra preliminares; mayo 25 de 2015.	70
<i>Figura 29.</i> Ensayos preliminares de jarras; junio 07 de 2015.	70
<i>Figura 30.</i> Punto de muestreo para la realización de los ensayos de Jarras.	71
<i>Figura 31.</i> Ensayo de jarras con policloruro de aluminio; agosto 27 de 2015.	72
<i>Figura 32.</i> Relación ΔpH vs Coagulante.	73
<i>Figura 33.</i> Relación ΔSS vs Coagulante.	75
<i>Figura 34.</i> Relación $\Delta Color$ vs Coagulante.	77
<i>Figura 35.</i> Relación $\Delta Conductividad$ vs Coagulante.	79
<i>Figura 36.</i> Relación $\Delta Cantidad$ de lodo (mL) vs Coagulante.	80
<i>Figura 37.</i> Cantidad de lodos generados con PAC y sulfato de aluminio; julio 23 de 2015.	81

Figura 38. Sistema de tratamiento de aguas residuales industriales proyectado en la Central Termoeléctrica de RíoClaro, Sonsón – Antioquia..... 89

Figura 39. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera y el sistema de clarificación propuesto al tanque de agua cruda. 101

Figura 40. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera, clarificador y permeado del sistema de ósmosis inversa al tanque de agua clarificada. 102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Resultados fase experimental.	99
ANEXO B. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera y el sistema de clarificación propuesto al tanque de agua cruda.	101
ANEXO C. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera, clarificador y permeado del sistema de ósmosis inversa al tanque de agua clarificada.	102

Resumen

Se evalúa un sistema de tratamiento por coagulación, para cuatro tipos de efluentes: Purgas de torre de enfriamiento, purgas de caldera, resinas de intercambio iónico y rechazo de ósmosis inversa, que conforman los vertimientos industriales de la termoeléctrica RíoClaro, de Cementos Argos S.A. Mediante ensayos de jarras, teniendo como referente las variables de temperatura, pH, sólidos suspendidos, color y conductividad, las cuales son las principales condiciones que permiten definir la calidad del agua industrial en los ciclos de generación de energía.

De acuerdo a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, aplicando sulfato de aluminio tipo B, policloruro de aluminio y polímero aniónico, se presentan datos comparativos empleando el Método Lineal Generalizado, indicando resultados donde se lograron remover más del 90% en parámetros como sólidos suspendidos y color, siendo el policloruro de aluminio el más eficiente. Finalmente se concluye que las aguas residuales industriales, se pueden reutilizar en los procesos del ciclo de generación, con previo tratamiento de coagulación, floculación y sedimentación, pero siendo necesario un post tratamiento con intercambio catiónico para que sea factible en procesos como las torres enfriadoras.

Palabras Clave: Aguas residuales industriales, central termoeléctrica, coagulación, ensayo de jarras, reuso de agua.

Abstract

Evaluates a system of treatment by coagulation, for four types of effluent: purges of cooling tower, boiler blowdowns, resins ionic exchange and rejection of reverse osmosis comprising industrial dumping of the thermoelectric RioClaro, of Cementos Argos S.A. Using jar tests, taking as a reference the variables of temperature, pH, suspended solids, colour and conductivity, which are the main conditions that allow to define the water quality of the industrial power generation cycles.

According to laboratory results, applying aluminum sulfate type B, aluminum and anionic polymer polyvinyl chloride, are presented comparative data using generalized linear method, indicating results where were able to remove more than 90% in parameters such as colour and suspended solids, being the most efficient aluminium polyvinyl chloride. It is finally concluded that industrial wastewater can be reused in the processes of the cycle of generation, with previous treatment of coagulation, flocculation and sedimentation, but still needed a post treatment with exchange cation so feasible in processes such as cooling towers.

Key words: Water industrial waste, thermoelectric, coagulation, water reuse, jar test.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el tratamiento de aguas residuales de la industria tradicional y en especial, el de las centrales térmicas, es uno de los temas más importantes que relaciona al factor ambiental. Las aguas residuales son el efecto de la utilización del agua para múltiples fines, en donde ésta es la materia prima, que se aprovecha como recurso en la producción; cualquiera que sea su origen, estas aguas residuales representan impactos adversos para el medio ambiente, ya que modifican las particularidades del entorno natural donde se genera su vertimiento, entre los que se encuentran, la disminución del poder autodepurador de las fuentes receptoras, destrucción del ecosistema acuático, entre otros. La consideración de esta amenaza depende de las características del agua, es decir, de su composición y proporción. Todo ello ha forjado una angustia de gran repercusión dentro del escenario ambiental, social y económico (ABC, 2009).

El incremento de la actividad industrial, ha hecho que la contaminación de las aguas aumente, no solo en dimensión, sino en variedad. Por lo tanto, es importante efectuar tratamientos a los efluentes, buscando métodos que permitan obtener fuentes hídricas de condiciones óptimas y a costos favorables de tratamiento, para alcanzar los límites propuestos por las legislaciones o exigencias del reuso (ídem).

A continuación, se presenta un proyecto de investigación, el cual pretende realizar una contribución intelectual y práctica al sistema de tratamiento de agua residual industrial, para la Termoeléctrica de RíoClaro - Antioquia, de Cementos Argos S.A. donde se permita la reutilización del mismo, mediante una alternativa que apunte a mejorar su eficiencia.

Los procedimientos principales que contienen los diferentes sistemas de tratamiento son muy diversos, sin embargo, se evaluará un sistema de tratamiento por coagulación - floculación, siendo éste uno de los procesos fisicoquímicos más empleados en el tratamiento de agua y que establece en gran parte, las condiciones de operación. A partir de la selección de dos tipos de coagulantes, el sulfato de aluminio tipo B como producto convencional y el policloruro de aluminio (PAC) como coagulante alternativo, adicionando un polímero aniónico como ayudante de floculación, se determinó cuál era el más eficiente para remover sólidos suspendidos y color, además del comportamiento del pH y conductividad.

En la primera parte de la investigación, se expone el aspecto general de la termoeléctrica de RíoClaro: Tipos y tratamientos de los vertidos industriales, como lo es: purga de la torre de enfriamiento, purga de caldera, efluentes de la regeneración del intercambiador iónico (lecho mixto de resinas aniónicas y catiónicas) y el rechazo de ósmosis inversa; normatividad, parámetros fisicoquímicos de calidad del agua y del agua residual, ensayos para el control del proceso de coagulación – floculación; consideraciones acerca del ensayo de jarras, en el tratamiento de aguas residuales.

En la segunda parte, se presenta el análisis de los datos recolectados, durante el trabajo de campo, dando lugar a una metodología, la cual se divide en tres fases: Fase 1, la cual consiste en un diagnóstico e identificación de proceso de generación de energía, con el objetivo de reconocer los puntos donde se utiliza el agua, los estándares, procedimientos, cantidades y las características fisicoquímicas de cada uno de los efluentes que integran las aguas residuales de la central termoeléctrica, para que de este modo se proporcionen las bases suficientes en la realización de las siguientes fases. La Fase 2 experimental, teniendo

en cuenta las características iniciales y finales de cada parámetro, realizando ensayos de jarras a nivel de laboratorio y analizando los resultados con el Método Lineal Generalizado. Y por último, la Fase 3, donde se dan las recomendaciones, de acuerdo a los resultados obtenidos.

Posterior a esta etapa, queda a disposición de la gerencia de la organización su análisis, para destinar recursos e iniciar la fase de ejecución.

Es importante considerar, que la estrategia está orientada principalmente, a la prevención de los impactos generados por la disposición de las aguas residuales industriales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las principales fuentes para abastecer la demanda de energía eléctrica en Colombia, se desarrolla a través de combustibles fósiles como el carbón, gas natural o petróleo, tanto para el sistema de interconexión nacional – SIN, como para las industrias. Es por ello que Cementos Argos dentro de su proceso productivo cuenta con plantas de generación, las cuales tienen como objetivo garantizar el suministro de energía eléctrica en la fabricación del cemento, con estándares de confiabilidad, eficiencia y continuidad.

En tal sentido, la planta RíoClaro ubicada en el municipio de Sonsón – Antioquia, propiedad de Cementos Argos S.A., cuenta con una central térmica que opera bajo un ciclo termodinámico convencional, cuya potencia nominal es de 17 Megavatios por Hora – MWH.

Según afirma Prieto (2009), cuando se habla de una termoeléctrica, se está haciendo referencia a una instalación empleada para la generación de energía eléctrica, a partir de energía térmica (liberada en forma de calor). En el caso de la planta RíoClaro, se emplea el carbón como combustible para una caldera acuotubular con parrilla viajera; allí ocurre la combustión del carbón, la cual es una reacción exotérmica y le transfiere calor por radiación al agua contenida en el interior de los tubos, hasta alcanzar su temperatura de saturación, siendo este el punto de cambio de fase a vapor; posteriormente se le sigue transfiriendo calor hasta alcanzar su punto de sobrecalentamiento, siendo ésta la condición para llevarlo a la turbina y transformar esa energía potencial en energía mecánica, para que al final se obtenga la energía eléctrica, a través del generador de corriente alterna.

En este tipo de plantas de generación de energía, uno de los componentes esenciales para obtener la energía térmica, es el agua; es por ello que allí se cuenta con un sistema para su tratamiento cuyo fin, es el de modificarle las características fisicoquímicas y bacteriológicas, como condición para poder utilizar este recurso en el proceso y de este modo garantizar la vida útil y eficiencia operativa de los equipos auxiliares de proceso.

Durante el tratamiento del agua y su paso por los diferentes procesos del ciclo termodinámico, se generan efluentes procedentes de la regeneración del intercambiador iónico, purga de la caldera, purga del sistema de enfriamiento y del rechazo de la ósmosis inversa; los cuales se homogenizan en un tanque y constituyen los vertimientos industriales de la central térmica; lo que implica lo siguiente:

Según afirma el SIAME (2005), estos vertimientos incrementan la carga de sedimentos sobre los cuerpos de agua donde son descargadas, ya que el alto contenido de sólidos suspendidos totales, sales disueltas y altas temperaturas, son parámetros característicos de este tipo de efluentes, los cuales pueden favorecer los procesos de eutrofización, generando cambios radicales para la fauna, flora y todo el ecosistema acuático; el efecto de la carga térmica es un aspecto que toma mucha más importancia cuando se trata de un sistema de enfriamiento con circulación abierta, como en el caso de la planta de RíoClaro, ya que si el cuerpo receptor del efluente no ofrece un caudal de atenuación adecuado, acelera los procesos metabólicos de los organismos acuáticos y reduce los niveles de oxígeno disuelto, que de acuerdo con Sierra (2011), los efectos pueden notarse en el aumento de las tasas de mortalidad y migración hacia ambientes más favorables. Además se espera que el efecto negativo más importante, se presente en el área local inmediata y el de la

contaminación térmica varía a lo largo de un gradiente longitudinal, en función del caudal de vertimiento y el del receptor.

La contaminación química es otra de las problemáticas que generan estos vertimientos, ya que la purga de caldera y demás efluentes de la planta de tratamiento de aguas, están constituidos por elementos metálicos, sales ácidas y básicas que se agregan de acuerdo a los tratamientos preventivos y correctivos del proceso; que según el SIAME (2005), afirma que estas sustancias afectan las comunidades acuáticas, restringen los usos del recurso hídrico y pueden presentar efectos adversos sobre la salud de la población.

Otro factor a considerar y que se torna como una problemática para la central térmica, es que la subregión del Magdalena Medio no ha sido ajena a las consecuencias del cambio climático, con fenómenos meteorológicos que impactan con severidad a los diferentes ecosistemas; uno de ellos ocurre en las temporadas de verano, en donde su impacto directo se presenta con la disminución de los niveles de las fuentes de agua, afectando la disponibilidad del recurso para el proceso de generación y se vuelve en una condición que implica disminuir la generación de energía, con repercusiones económicas para la industria.

De acuerdo a lo anterior, existe la necesidad de buscar estrategias que busquen optimizar los procesos, con alternativas que apunten a mejorar su eficiencia, las cuales estén alineadas con la política de sostenibilidad de la compañía, que establece como eje estratégico de desarrollo, su compromiso con el cuidado del ambiente, integrados con los aspectos económicos y socio-culturales (SIAME, 2005).

Es por estos factores y consideraciones, que se presenta la siguiente pregunta:

¿Las aguas residuales industriales de la central termoeléctrica de RíoClaro, se pueden reutilizar en diferentes procesos del ciclo de generación, con previo tratamiento de coagulación, floculación y sedimentación?

3. JUSTIFICACIÓN

Uno de los principales retos para el presente siglo XXI, es que todos los países deben desarrollar estrategias que estén enmarcadas bajo los estándares de sostenibilidad ambiental, económica y sociocultural para las diversas actividades de origen antrópico. Si bien, es una realidad que las termoeléctricas son una de las actividades que comprometen los recursos naturales no renovables y renovables, también es claro que estas industrias, son básicamente un respaldo del sistema de generación de energía y es por esto, que cada vez se debe adquirir un mayor compromiso, con el manejo ambiental de sus impactos negativos, direccionándolos en el marco de la sostenibilidad (Calderón, Corredor, García, & Miguel, 2013).

Es por ello que con el desarrollo del presente trabajo, se logrará evaluar un sistema de tratamiento de aguas residuales de la central termoeléctrica RíoClaro, perteneciente a la compañía Cementos Argos S.A., mediante técnicas de coagulación y sedimentación, esto con el fin de determinar su eficiencia de remoción y secuencialmente desarrollar una propuesta que permita reutilizar estos vertimientos en el proceso de generación de energía y disminuir la huella hídrica; además de mitigar los impactos ambientales que se generan estos vertimientos; cuyo lineamiento es que la propuesta este acorde a los principios del uso racional y eficiente del agua; aspecto que está contemplado por la ley 373 de 1997 y obliga a las organizaciones a la continua gestión del recurso por su uso; pero más allá de dar un cumplimiento a un acto normativo, también es importante considerar que al interior de la organización, sería el significado de una estrategia de innovación, que estaría bajo los principios de producción más limpia y desarrollo sostenible, de ahí que se contemplan múltiples beneficios en diferentes aspectos, que se consideran a partir de:

Dimensión económica: Al recuperar o hacer reuso de los vertimientos industriales, se prevé un impacto directo, en el ahorro de energía por bombeo desde la captación hasta la planta de tratamiento de agua; que según los reportes diarios de consumo este sistema requiere aproximadamente 5 MWH/día para satisfacer la demanda del proceso; pero desarrollando una estrategia que permita reutilizar los vertimientos industriales, se disminuirá el indicador de consumo de energía por captación, el cual se traduce en un ahorro económico para el proceso y a su vez con esta misma alternativa de eficiencia, se mitigarían los impactos generados por la disponibilidad del recurso para la generación de energía, en las temporadas de sequía en la zona, que como se planteó anteriormente, compromete la potencia nominal de la planta, hasta el punto de que puede limitar la producción de cemento, además de inflar los costos.

Otro aspecto a considerar es que ante la Corporación Autónoma Regional, se presentarían los resultados del trabajo de investigación y posterior desarrollo de la alternativa, lo que implica una reducción en la tasa retributiva que debe pagar el proceso por la captación y vertimientos industriales, generando así un ahorro adicional y que sumados con el ahorro energético, aumento de la eficiencia y disponibilidad del recurso en épocas de sequía; constituyen la importancia económica del actual estudio de investigación y a su vez la inversión inicial para el desarrollo de la propuesta.

Dimensión ambiental: Partiendo de la visión y la política de sostenibilidad en la que se direcciona la compañía Cementos Argos S.A., en donde se compromete a prevenir, mitigar, minimizar o compensar los impactos ambientales negativos que se generan con el desarrollo de sus actividades; el cual es ratificado en la edición número 77 del periódico Luz Verde, (abril de 2015), en donde establece que “*comprometidos*

con la medición y reducción del consumo de agua SUIZAGUA COLOMBIA II” y “coherentes con nuestra Política Ambiental, nos hemos trazado la meta de reducir al 2025 el consumo de agua por tonelada de cemento en un 30% y en un 20% el consumo de agua por metro cúbico (m³) de concreto”, para el caso específico de la termoeléctrica de RíoClaro, genera energía eléctrica para el proceso de fabricación de cemento, es decir, hace parte del indicador de consumo de agua por tonelada de cemento, por lo cual también presenta la directriz de evaluar sus procesos para desarrollar alternativas que permitan disminuir la huella hídrica, aspecto que se lograría aumentando la eficiencia del recurso, con estrategias de reúso o tratabilidad que permitan reutilizarla en el proceso productivo, siendo el punto de partida para esto, los resultados de este trabajo de investigación, que a su vez se convierte en una herramienta de gestión ambiental empresarial, con beneficios ambientales adicionales como el garantizar que el proceso no exceda la concesión de agua autorizada por la autoridad ambiental, así mismo como el cumplimiento de los lineamientos normativos de ahorro y uso eficiente del agua, permitiendo direccionar la central térmica de RíoClaro, como una industria pionera de uso racional del agua en la región.

Otro aspecto del cual se soporta la importancia ambiental de este estudio, es que el ecosistema se ve impactado negativamente por la captación y posterior disposición de los vertimientos industriales, pero con los resultados de este estudio representaría una propuesta que esté direccionada a prevenir y mitigar los impactos negativos generados por “*shock termal*”, carga de sedimentos, contaminación química, cambios en la concentración de oxígeno disuelto, lo que genera según Prieto, (2011) redistribución de los organismos en el hábitat local, cambios en la especiación química de las sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en el agua, hasta el punto de afectar la salud de la población.

Dimensión social: Este estudio presenta un impacto positivo sobre la comunidad, ya que con la identificación de alternativas eficientes sobre el recurso hídrico, se prevé una conservación o racionalidad sobre este y demás recursos naturales de la zona de influencia de la planta, conservando los ecosistemas y a su vez este se ve reflejado, en la calidad de vida de todos los habitantes de la zona.

De acuerdo al anterior contexto, se puede concluir, que con los resultados de este trabajo, se generan diversos impactos positivos ambientales, económicos y sociales; los cuales justifican su importancia, además de ser una iniciativa que está acorde con los lineamientos de la política de sostenibilidad como eje estratégico de la empresa Cementos Argos S.A. así mismo, aportar elementos para reúso o reutilización de residuos líquidos industriales, como un activo monetario y que se traduce en políticas del recurso hídrico.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento para las aguas residuales industriales de la central termoeléctrica de Cementos Argos S.A. Planta RíoClaro, municipio de Sonsón – Antioquia, mediante la técnica de coagulación – floculación, con el fin de reutilizarla en el proceso de generación de energía.

4.2 ESPECÍFICOS

Realizar un diagnóstico de los efluentes de la central termoeléctrica, a fin de establecer sus características fisicoquímicas y un balance másico del recurso en el proceso.

Evaluar de forma experimental, la eficiencia de un sistema de coagulación - floculación, mediante ensayos de test de jarras, con el fin de modificar sus características fisicoquímicas y poder reutilizarla en el proceso de generación de energía.

Establecer una pre-propuesta de tratamiento para las aguas residuales industriales de la termoeléctrica RíoClaro, que permitan reutilizarlas en el proceso de generación de energía y disminuir la huella hídrica.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ASPECTO GENERAL

Actualmente, se ve como el cambio climático y las diversas problemáticas ambientales se hacen evidentes ante la humanidad con mayor intensidad; es por ello que a nivel mundial se han estado desarrollando convenios, acuerdos y políticas que están orientadas hacia un desarrollo sostenible; uno de los principales temas que hacen parte de esta agenda, corresponden y están centradas hacia el uso eficiente y ahorro del recurso hídrico.

Es previsible que en el futuro, aumente la competencia por el recurso, no solo entre sectores de utilización, sino también entre las regiones que disponen del recurso. El cambio climático no va a ayudar a mejorar la situación ya crítica, razón por la cual una política de agua debe estar basados en principios de eficiencia, promoviendo menos utilización y/o consumo de agua y mejor rendimiento en todos los usos (Laurent & Garrido, 2010).

En el caso específico de Colombia, el congreso de la república emitió la ley 373 de 1997, a través de la cual se establece el “Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua”, éste es entendido como un conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico; esto como parte de la estrategia o política que está direccionada al aseguramiento de una suficiente cantidad y calidad de agua en el país, que a su vez permita avanzar en la sostenibilidad del recurso hídrico.

De acuerdo con Pardo Martínez (2012), el uso eficaz del agua significa utilizar tecnologías y prácticas mejoradas que suministran igual o mejor servicio con menos cantidad de agua; estas categorías se pueden clasificar de la siguiente forma:

- ☞ Reducción de pérdidas (verificando escapes en tuberías o mangueras).
- ☞ Reducción del uso global del agua (sistemas cerrados en los procesos de agua cuando no se utilice).
- ☞ Aplicar prácticas para reutilizar el agua (re-uso de aguas de lavado).

En tal sentido y siendo coherente con lo anteriormente expuesto, Bravo (2011), plantea que la reutilización del agua en las industrias es una opción que toma valor, ya que la disponibilidad del agua es sencillamente una condición para operar.

Una etapa importante de alto consumo de agua en muchas industrias de procesos químicos, (CPI) es en las calderas. Como tal, una opción muy atractiva en zonas de estrés hídrico, puede ser la reutilización del agua que es purgada de los sistemas de refrigeración o torres de enfriamiento como *Make-Up* (o renovación) en las calderas de alta y baja presión (ídem).

Las purgas de agua en la torre de refrigeración a menudo son descargadas en el sistema de alcantarillado sanitario, sin embargo, para las centrales eléctricas, refinerías de petróleo, plantas petroquímicas y

químicas, así como las plantas de síntesis de gas natural, esta purga de agua es reconocida como la mejor fuente disponible para su reutilización debido a la gran columna que ésta dispone y las variadas opciones tecnológicas de tratamiento (reacondicionamiento) que han madurado y demostrado que son capaces de alcanzar la calidad de agua adecuada (ídem).

Purga como *make-up* de caldera: En la actualidad, la mayoría de las nuevas centrales de generación de energía a base de combustibles fósiles y también en algunas existentes, ya emplean la reutilización de aguas residuales. Existen principalmente tres tipos de sistemas de reutilización: Ablandamiento químico, ósmosis inversa de alta eficiencia y ultrafiltración combinada con la ósmosis inversa (Pardo Matínez, 2012).

Así mismo, Hernández (2007), plantea que las principales acciones para el uso eficiente del agua en las industrias, se basa en la recirculación en los procesos de producción, reúso y la reducción del consumo interno, estando acorde a los lineamientos y políticas de producción más limpia; lo que genera múltiples beneficios, ahorros económicos y de recursos, se reducen los niveles de contaminación de las fuentes hídricas más allá de los estándares normativos, todas estas son estrategias direccionadas a la conservación del agua y la energía.

La aplicación de la producción más limpia para utilizar el agua de forma más eficiente, genera los siguientes beneficios:

- ☞ Reducir la demanda de agua de forma más rápida, económica y fácil con respecto a programas focalizados en la oferta.
- ☞ En tratamiento de agua y vertimientos, reduce los costos y aplaza la construcción o expansión de nuevas plantas de tratamiento.
- ☞ Reduce los impactos ambientales debido a una menor generación de vertimientos a las aguas superficiales y subterráneas.
- ☞ Mantenimiento sostenido de la calidad del agua, por reducción de la contaminación de las aguas subterráneas y se evita el uso de otras fuentes de agua de menor calidad (Pardo Matínez, 2012).

Se ha demostrado, que la reutilización industrial se puede contemplar como un elemento básico en la gestión integrada de los recursos hídricos y puede contribuir de forma notable, dentro de las políticas de conservación de los recursos, cualitativa y cuantitativamente. La reutilización libera recurso de fuentes convencionales subterráneas y/o superficiales, además de aportar una mejora considerable en la calidad de los efluentes abocados, puesto que la tendencia en la depuración industrial va hacia tratamientos tecnológicos avanzados, con el fin de obtener agua susceptible y apta para ser reutilizada (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2010).

En diversos momentos, el retorno de aguas residuales industriales, enfatizan el contenido de dilución y autodepuración de las cuencas y caudales aceptantes, lo que acarrea a un deterioro continuo de la calidad de los mismos e impide la reutilización posterior del agua. A veces las industrias no emiten vertidos de forma continua, si no únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas de año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial; también son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día (Fernández E. , 2010).

5.2 TIPOS Y TRATAMIENTOS DE LOS VERTIMIENTOS INDUSTRIALES, EN UNA CENTRAL TÉRMICA

Las centrales térmicas generan vertimientos líquidos, en función de la configuración del sistema de producción que emplean para obtener energía eléctrica; algunos constituyentes que intervienen en la variedad de las aguas residuales industriales son: Los equipos utilizados en el proceso, materias primas o insumos, características fisicoquímicas y microbiológicas, así mismo como el manejo de las descargas de aguas residuales (ENDESAEDUCA, 2014).

Además, es indispensable recurrir a procedimientos de tratamiento para las aguas residuales y así modificar la concentración de la carga contaminante. El propósito de la variedad de técnicas de tratamiento para el reúso del agua actualmente practicadas, han sido transformarlas de un residuo que pueda evacuarse sin inconveniente y que se puedan tratar por medio de tecnologías o alternativas de bajo, medio y alto perfil, además según el nivel de descontaminación conseguido, se puede pensar en la reutilización de éste elemento, para la utilización de un nuevo ciclo u otra aplicación diferente a la previa (OOCITIES).

De acuerdo a los procesos que se dan al uso de agua en termoeléctricas, puede clasificarse en: a) evaporación y purga del sistema de enfriamiento, b) purga de caldera, c) regeneración del intercambio iónico, d) rechazo de ósmosis inversa, e) desaireación del agua de alimentación.

Por otra parte, la naturaleza de las aguas residuales industriales, se consideran con diversos controles fisicoquímicos y biológicos. Los parámetros de análisis más comunes para este tipo de aguas son: Determinación de pH, conductividad, temperatura, color, contenido de sólidos suspendidos, entre otros (Superintendencia del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 2014).

5.2.1 Purga de torre de enfriamiento.

5.2.1.1 Características de la purga de torre de enfriamiento.

En la industria química hay muchos casos de operaciones unitarias en los que se descarga agua caliente (condensadores o de otros aparatos), donde el valor de esta agua es tal que es más económico enfriarla y volver a utilizarla antes que descargarla como inútil (...). Este enfriamiento se efectúa poniendo en contacto el agua con aire sin saturar en condiciones tales que el aire se humidifica y el agua se enfría aproximadamente a la temperatura del termómetro de bulbo húmedo. Este método se utiliza únicamente en el caso en que la temperatura del termómetro húmedo para el aire es más baja que la temperatura que se quiere que alcance el agua que sale (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, pág. 4).

En este proceso, ocurren cambios y alteraciones en las características del agua. La evaporación que ocurre cuando el agua se emplea en estos procesos, concentra las sales disueltas en el agua, alcanzan su punto de saturación y se separan del líquido, formando cristales; algunos de ellos difíciles de remover y que dañan los equipos: Formación de depósitos e incrustación, corrosión, obstrucción de los sistemas de distribución, crecimiento de organismos y por supuesto, un incremento en los costos de mantenimiento y operación. (Cortina Domínguez & Márquez Ortiz , 2008).



Figura 1. Torre de enfriamiento, Cementos Argos - planta RíoClaro.
Fuente: Autores.

5.2.1.2 Tratamiento para la purga de torre de enfriamiento.

Un estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), afirma que la electrocoagulación (EC), es un proceso eficiente para el acondicionamiento de agua en torres de enfriamiento, especialmente para zonas con alto contenido de sílice y otros contaminantes; para su acondicionamiento y reutilización se hace uso de procedimientos de coagulación químicos tradicionales; como es el caso de la Central Termoeléctrica (CT) de Salamanca, donde en promedio se llega a los 80 mg/l de este contaminante.

En el estudio se utilizó un reactor de EC abierto, flujo ascendente y electrodos de aluminio, instalado en una planta piloto móvil que incluye una unidad de clarificación y filtración. Mediante pruebas con agua de alimentación de la torre de enfriamiento, se validó la metodología y se obtuvieron datos que permitieron realizar el diseño ejecutivo de la planta de tratamiento del agua de repuesto de dicha central.

Se diseñaron reactores de EC modulares de 5 L/s para tratar un caudal global de 160 L/s y acoplarlos a la planta de tratamiento lateral en la CT. Con el tipo de sistema propuesto se redujo la concentración de sílice hasta 40 mg/L, concentración suficiente para operar las torres a cuatro ciclos de concentración, con un costo aproximado de \$7.78/m³ (pesos mexicanos).

Dicha tecnología puede ser aplicada a otros sistemas con problemas de calidad de agua similares y así asegurar el agua para riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras, de manera sustentable (IMTA, s.f.).

En México se desarrolló un estudio por Blass Amador & Panamá Tirado (2007), sobre la aplicación de electrocoagulación, para eliminación de silicio en agua de enfriamiento, siendo esta como una tecnología

alternativa de tratamiento que además elimina otros contaminantes provenientes de la purga de la torre de enfriamiento de una central termoeléctrica y su acondicionamiento para su reutilización, haciendo uso de procedimientos de coagulación químicos tradicionales.

Los resultados mostraron que la eliminación de silicio en agua proveniente de purga de torres de enfriamiento se puede lograr sin la adición extra de algún reactivo químico bajo las condiciones probadas a dosis altas de hierro (57 mg/L) a una temperatura de 27 ± 1 °C y a un flujo de 0.043 L/s. Bajo estas condiciones, se obtuvieron porcentajes promedio de remoción de silicio de 54%. Sin embargo, debe de considerarse que fue necesario generar una mayor cantidad de hierro lo que podría repercutir en los costos asociados con el consumo de energía. A una dosis de 30 mg/L de hierro, con la sola adición de un poli electrolito catiónico que ayuda al proceso de floculación, se obtuvo un porcentaje promedio de eliminación de silicio del 42%. Con esta dosis se considera que los resultados son satisfactorios como para reciclar el agua en la torre de enfriamiento. Al elevar el pH del efluente del reactor –para evitar la pasivación de los electrodos utilizando hidróxido de calcio, se obtuvieron porcentajes de remoción promedio del 50% aunque la adición de hidróxido de calcio significaría un aumento en la producción de lodos y en los costos. En la evaluación final, se logró también la disminución de la concentración de magnesio. No se detectó presencia de hierro ni exceso de calcio (Blass Amador & Panamá Tirado, 2007).

5.2.2 Purga de caldera.

5.2.2.1 Características de la purga de caldera.

El producto de la purga de caldera contiene impurezas de considerable concentración que se extrae del sistema circulatorio de las calderas a fin de mantener el control de concentración. Esta agua de purga contiene generalmente otros agentes, tales como materiales antiespumantes o algún tipo de agente orgánico con gran contenido en fósforo. Las impurezas en el agua de alimentación, se concentran en la caldera. Prácticamente todas las aguas de alimentación a las calderas contienen sólidos disueltos procedentes de la propia agua y de los productos químicos para su tratamiento (Nemerow & Dasgupta, 1998).

Entre más y más agua se evapora en la caldera, se añade más líquido para reemplazarla; como resultado de esto, la cantidad de sólidos disueltos al interior de la caldera aumenta gradualmente (...). Las burbujas de vapor que suben no se separan fácilmente de la superficie; en vez de esto, se forman grandes burbujas que, cuando revientan, arrastran con ellas hacia el espacio de vapor, algo de la película (polución) con que se formó la burbuja. Esta condición se denomina comúnmente “acarreo”. La mayor parte de esta precipitación tiene lugar donde el agua de la caldera está más caliente, es decir, donde el agua está en contacto con las zonas de mayor transferencia de calor (COMISIÓN NACIONAL PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA, 2009, pág. 5).

En funcionamiento normal, muchas calderas se purgan diariamente, o por lo menos una vez a la semana, para eliminar los lodos precipitados. Este proceso constituye una parte importante de los residuos de la central térmica (Nemerow & Dasgupta, 1998, pág. 629).



Figura 2. Caldera, Cementos Argos - planta RíoClaro.
Fuente: Autores.

5.2.2.2 Tratamientos para la purga de caldera.

Cardozo, Sánchez & D'Armas (2011), establecieron un tratamiento de agua, para la generación de vapor con un sistema de suavizado y dosificación de productos químicos (anti-corrosivo y anti-incrustante). Se realizó el seguimiento de parámetros fisicoquímicos, tales como pH, conductividad, turbidez, hierro, sílice, CO₂ libre, sulfito y fosfato, de las aguas del sistema de generación de vapor en una industria automotriz.

La investigación arrojó que el químico ensayado, logró mantener los parámetros conductividad <200 μ S/cm, sólidos totales <150 mg/L, alcalinidad > 50 mg/L y sílice >4 mg/L, en valores dentro de los intervalos recomendados para calderas de baja presión, lo cual favorece la operación económica y eficiente del sistema de generación de vapor.

El análisis de las aguas del sistema de generación de vapor, estuvo comprendido por la puesta en operación y estudio del sistema de suavizado del agua de alimentación a las calderas, una evaluación preliminar de las aguas previo a la implementación de los tratamientos, la aplicación y determinación de la efectividad del tratamiento interno y finalmente, la determinación de la eficiencia de las calderas (Cardozo, Sánchez, & D'Armas, 2011)

5.2.3 Resinas de intercambio iónico: Regeneración de resinas aniónicas y catiónicas.

5.2.3.1 Características de las resinas de intercambio iónico.

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Por sus propiedades como disolvente y su utilización en diversos procesos industriales, el agua normalmente tiene muchas impurezas y contaminantes. Las sales metálicas se disuelven en el agua separándose en iones, cuya presencia puede ser indeseable para algunos usos del agua. Las resinas de intercambio iónico poseen un radical fijo y un ión móvil o ión de sustitución. El ión móvil es el ión que es intercambiado por iones que desean eliminarse de la solución y este intercambio sólo funciona entre iones de igual carga eléctrica: cationes por cationes y aniones por aniones (INQUINAT S.A., 2008).

Las resinas tienen como objetivo intercambiar los iones indeseables que están presentes en el agua por iones deseables que están presentes en la resina. Una vez realizado el intercambio y por agotamiento en la resina de los iones deseables, se procede a realizar el proceso de regeneración con una solución concentrada de iones deseables para que estos se queden en la resina y reiniciar el ciclo (Lago, Fernández, & Díaz, 2005).

La tasa de intercambio iónico o cinética de las reacciones es gobernada por varios factores. La solución que está siendo tratada tiene un efecto; las concentraciones más altas de solución pueden acelerar la velocidad de la reacción. El tamaño de los iones que están siendo intercambiados también influye en la velocidad cinética y depende un tanto del tamaño de los poros en la estructura de la resina. La resina tiene una mayor afinidad hacia los iones de mayor valencia, por lo que la predominancia de iones de alta valencia, puede causar una mayor tasa de reacción (Ávila, 1999).

Otros elementos que influyen, incluyen la temperatura, la forma iónica de los sitios de intercambio, y la fortaleza de los sitios de intercambio; una mayor temperatura, puede acelerar las reacciones químicas. La reacción de intercambio es un proceso de difusión, por lo que la tasa de difusión en el sitio de intercambio iónico tiene algún efecto. Además, la fortaleza del sitio de intercambio, ya sea fuerte o débilmente ácido o básico, afecta la tasa de reacción (ídem).

Entre los tipos de resinas de intercambio iónico, se encuentran: Resinas catiónicas de ácido fuerte, resinas catiónicas de ácido débil, resinas aniónicas de base fuerte y resinas aniónicas de base débil. Las resinas de intercambio iónico descritas, pueden tener diversos usos comerciales e industriales, incluyendo la suavización, desalcalinización, desmineralización, eliminación de nitratos, polución de condensado, control de contaminación y muchos otros (ídem).

5.2.3.2 Tratamiento para las resinas de intercambio iónico.

En las plantas desmineralizadoras del centro refinador Paraguaná – AMUAY (Venezuela), se estudió el reúso de agua de proceso a través de la minimización de los desechos de las regeneraciones de las resinas de las plantas desmineralizadoras. En la primera etapa del estudio, se evaluó el proceso actual de regeneración para conocer cuáles eran los efluentes correspondientes a los pasos recuperables sin requerir

de tratamiento, hallándose que pueden ser recuperados completamente dos pasos en los intercambiadores catiónicos, así como dos en los intercambiadores aniónicos. La mejor opción de las alternativas estudiadas para destinar estos efluentes son los tanques de agua recuperada existentes en cada planta, para luego ser suministrados a las plantas de ablandamiento en caliente. El reúso del agua de estos pasos podría implicar un ahorro de 41,7 MMBs al año. En el caso de los pasos que no pudieron ser recuperados, se determinó que la ósmosis inversa es la mejor opción tecnológica evaluada. En conclusión, las alternativas recomendadas para la recuperación de agua permiten minimizar los desechos de las regeneraciones en un 70%, es decir, que ahora serán desechados 125 GPM de los 420 GPM originales (Lago, Fernández, & Díaz, 2005).



Figura 3. Resinas de intercambio iónico, Cementos Argos - planta RíoClaro
Fuente: Autores.

5.2.4 Rechazo de ósmosis inversa.

5.2.4.1 Características del rechazo de ósmosis inversa.

La ósmosis es un fenómeno natural en el cual el agua pasa a través de una membrana semi-permeable, desde una solución menos concentrada a una solución más concentrada. (...) La ósmosis inversa es un proceso en el cual se fuerza al agua a pasar a través de una membrana semi-permeable, desde una solución más concentrada en sales disueltas u otros contaminantes a una solución menos concentrada, mediante la aplicación de presión (AUXIAQUA, 2011).

Este proceso es capaz de eliminar más del 95% de los compuestos orgánicos; más del 90% de sales disueltas como el sodio, calcio, carbonatos, arsénico, bicarbonatos, magnesio, aluminio, fosfatos, flúor, cianuro, sulfatos, cobre, níquel, zinc, plata bario, radio (EDOSPINA S.A., 2008).

Se denomina membrana semipermeable a la que contiene poros al igual que cualquier filtro, de tamaño molecular. El tamaño de los poros es tan minúsculo que deja pasar las moléculas pequeñas pero no las grandes (normalmente del tamaño de micras). Por ejemplo, deja pasar las moléculas de agua que son pequeñas, pero no las de azúcar, que son más grandes (Del Toro, 2014).

La membrana de poliamida es bastante útil para separar la sal del agua, no son afectadas por las bacterias, pero puede ser destruida por el cloro, por eso es la importancia de que el agua de entrada debe ser pretratada para remover este componente; en este sentido el carbón activado puede ser efectivo para remover el cloro; mientras que la inyección de bisulfito de sodio puede ser utilizado para remover agentes oxidantes. La membrana de poliamida es un compuesto de película delgada (una delgada capa de membrana sintética unida a una capa de soporte). Los compuestos de la película delgada ofrecen un mayor grado de flujo, selectividad y estabilidad química que los encontrados normalmente en membranas de polímeros (EDOSPINA S.A., 2008).

El permeado es el agua extraída por filtración mediante las membranas; el flujo del producto es proporcional a la presión neta de operación disponible, que es la diferencia entre la presión aplicada al agua de alimentación y la presión osmótica media en la superficie de la membrana, el permeado es el afluente del intercambiador iónico (ídem).

El rechazo es el agua que no pasa por la membrana corre del otro lado limpiando y trayendo consigo los sólidos inorgánicos o impurezas que no pasan por la membrana. El balance de flujos de la unidad es el siguiente: Se tiene una entrada (alimentación del filtro) y tiene dos salidas: Permeado que corresponde al 70-75% y un rechazo 30-25 % (ídem).

5.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA Y NORMATIVIDAD

5.3.1 Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la central termoeléctrica.

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua que pueden ser de origen natural o antropogénicas, las cuales definen su composición física y química. Dentro de este tipo de parámetros se encuentran aquellos relacionados con la calidad, cuya importancia en una planta de generación eléctrica, según RENOVETEC (s.f.), es preservar la integridad de los materiales constituyentes de los diversos circuitos para mantener la operación de los sistemas de la planta en el nivel óptimo de disponibilidad, seguridad, fiabilidad, economía y eficiencia durante la vida útil de la instalación.

Hablar de control de calidad fisicoquímica y microbiológica de una termoeléctrica, se hace referencia a la química del agua, la cual se encuentra agrupada por el agua de refrigeración (si la planta se refrigera con agua, ya sea ciclo abierto o semiabierto) y el agua de caldera; fundamentalmente la acción del agua sobre los distintos sistemas, tiene dos efectos perjudiciales: corrosión y formación de depósitos (incrustación).

Para el caso específico de RíoClaro, el sistema de enfriamiento corresponde a sistema semiabierto, que de acuerdo con lo que afirma RENOVETEC (s.f.), se llaman semiabierto porque la entrada de agua de reposición es casi constante. Parte del agua de circulación se pierde por evaporación, y como consecuencia, el agua se va concentrando en sales disueltas y sólidos en suspensión.

Las sales cálcicas y magnésicas pueden alcanzar su límite de solubilidad, depositándose, por tanto, a lo largo del circuito y provocando incrustaciones. Hay que recordar que estas sales disminuyen su solubilidad con la temperatura, al contrario que casi todas las demás, y también la disminuyen con el pH. Las incrustaciones tienen efectos muy perjudiciales, como descensos en los coeficientes de transmisión de calor y de las secciones reales de paso de los tubos, provocando corrosiones, deformaciones por falta de refrigeración de tubos y roturas de los mismos (ídem).

Como tratamiento preventivo, se agregan al sistema biosidas, bio dispersantes y anti incrustantes; más sin embargo, es necesaria la realización de la purga, la cual es definida por SPX Cooling Technologies (2009), como la eliminación continua de una parte del agua del sistema de circulación. La cual se usa para evitar incrustaciones por la concentración de sólidos disueltos se concentren en un punto donde puedan formar incrustaciones.

De igual manera como el sistema es semiabierto, implica el ingreso de masas de aire, las cuales generalmente mantienen partículas dispersas que se transportan desde una cantera en explotación y de la manipulación, transporte y almacenamiento de las materia prima (carbón); es por ello que a través de esta purga se presenta altas concentraciones de sólidos disueltos (conductividad) sólidos suspendidos, color y pH.

De acuerdo con lo que plantea la UNIÓN FENOSA INGENIERÍA S.A. (2000), para el tratamiento químico preventivo del agua en las calderas, se utilizan productos químicos secuestrantes de oxígeno (sulfitos, hidrazina, hidroquinona, etc.), dispersantes, anti-incrustantes, protectores y neutralizantes para las líneas de retorno de condensado, los cuales son tratamientos a base de fosfatos, compuestos volátiles como la aminas,

los cuales son elementos que se disuelven en el agua aumentando la concentración de sólidos dentro de la caldera, es por ello la necesidad de realizar purga (para desconcentrar el ciclo), la cual presenta como característica, un pH básico, con diferentes compuestos químicos que se ven reflejados en la conductividad de la misma.

Según afirma EDOSPINA S.A. (2008), en la planta de tratamiento, el rechazo de ósmosis inversa presenta como principal característica, que este es un flujo concentrado de iones que no logran pasar a través de la membrana semipermeable y de igual manera, como la regeneración del lecho mixto se realiza con hidróxido de sodio al 50% y ácido clorhídrico al 33%, son compuestos que tienen un causa directa en el incremento del contenido de sólidos disueltos y del pH ácido o básico de este efluente.



Figura 4. Ósmosis inversa, Cementos Argos planta RíoClaro.
Fuente: Autores.

De acuerdo con las anteriores consideraciones, a continuación se definen los parámetros fisicoquímicos que permiten determinar la calidad y composición del residual, de la termoelectrónica de RíoClaro.

5.3.1.1 Sólidos Suspendidos

Son partículas sólidas pequeñas (menos de 0.01 mm y mayores de 0.01 mm), inmersas en un fluido en flujo turbulento que actúa sobre una partícula con fuerzas en direcciones aleatorias, que contrarrestan la fuerza de gravedad, impidiendo así que el sólido se deposite en el fondo. Los factores que influyen para que una partícula no decante en el fondo son: Tamaño, densidad, forma de la partícula y la velocidad del agua (García, 2013).

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST), se consideran como la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0.45 μm y hace referencia a las partículas que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. La unidad de medida es en mg/L (COMUNIDAD ANDINA, 2005).

5.3.1.2 Color

Esta característica puede estar ligada a la turbiedad o presentarse independientemente responsable del color. Aún no es posible establecer las estructuras químicas fundamentales de las especies responsables del color. Esta característica del agua se atribuye comúnmente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, etcétera. Se considera que el color natural del agua, excluyendo el que resulta de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas: la extracción acuosa de sustancias de origen vegetal; la descomposición de la materia; la materia orgánica del suelo; la presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos; y una combinación de los procesos descritos (ídem).

En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados. Hay dos tipos de color: El verdadero, producido por sustancias disueltas y que es el parámetro considerado en la norma y el aparente, provocado por el color verdadero más el efecto de los sólidos en suspensión (ídem).

La unidad de color es el color producido por un mg/L de platino, en forma de ion cloroplatinado (Romero Rojas, 2009). Esto consiste en que “se compara la coloración del agua con una serie de patrones de color, que por unidad de medida simulan 1 ppm de platino como PtCl_6^{2-} y 0,5 ppm de cobalto como Co^{+2} , en un tubo de 165 mm de altura de capa” (Calderón F. , s.f.).

5.3.1.3 Conductividad

Es la medida de la capacidad del agua, para conducir la electricidad; varía directamente con la calidad de sólidos disueltos, principalmente por las sales minerales, por lo que se considera una medida indirecta de éstos, que es muy útil en campo por su rapidez y sencillez (UNITEK, s.f.).

Según afirma Romero (2009), la forma más usual de medir la conductividad en aguas es mediante instrumentos comerciales de lectura directa en $\mu\text{ohm/cm}$ a 25 °C, con un error de más o menos el 1%. La

conductividad leída es igual a la conductividad eléctrica de la muestra medida, entre caras opuestas de un cubo de 1 cm, como se demuestra a continuación:

La resistencia específica de un conductor es en función de sus dimensiones y puede expresarse como:

$$C = \frac{RA}{L}$$

Donde:

C = Resistencia específica, ohmio por cm.

R= Resistencia, ohmio.

A = Área de sección transversal del conductor, cm²

L= Longitud del conductor.

La conductividad específica de un conductor es igual al inverso de su resistencia específica, es decir, la conductancia de un conductor de 1 cm de longitud y una sección transversal de 1 cm², es numéricamente igual a la conductividad (ídem).

Así mismo afirma Lenntech (s.f.) , que la unidad de medida de la conductividad es en Siemens (S); la cual se mide en el agua se mide dentro de una cierta distancia de modo que la entrada es en S/cm, mho/cm; un mho = 1 Siemens.

La experiencia indica que el producto del valor de la conductividad en $\mu\text{ohm/cm}$ por un factor que oscila entre 0,55 y 0,7 es igual al contenido de sólidos disueltos, en mg/L; dicho factor depende de los iones en solución en el agua y la temperatura; en general es alto, mayor de 0,7, en aguas salinas o de calderas, y bajo, menos de 0,55, en aguas con alcalinidad cáustica o acidez mineral (Romero Rojas, 2009).

5.3.1.4 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influyen en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración. Usualmente la temperatura de las aguas residuales es mayor que la del agua de suministro, por la adición de calor que ejercen los usos domésticos e industriales (Cánepa, Maldonado, & Barrenechea, 2004).

5.3.1.5 Potencial de hidrógeno – pH

De acuerdo con Ariza (2010), en el agua las concentraciones [H⁺] y [OH⁻] son muy pequeñas, inclusive en las soluciones ácidas o básicas muy diluidas. Por esta razón se introdujo el concepto de pH para expresar en números mayores dichas concentraciones. El potencial de hidrógeno, o pH, se define como:

$$pH = -\log[H^+] \text{ o también } pH = \log\left[\frac{1}{H^+}\right]$$

$$[H^+] = 1/10^{pH}$$

También se define el potencial de iones de hidroxilos como pOH:

$$pOH = -\log[OH]$$

Entre el pH y el pOH existe la relación:

$$pH + pOH = 14$$

De igual manera Cánepa, Maldonado, Barrenechea (2004), definen el pH como “*el logaritmo negativo en base 10 de la concentración del ión H_3O^+* ”. *La escala de pH va del 0 al 14 (muy ácido a alcalino), el valor de 7 representa la neutralidad*”

Los análisis de laboratorio deben hacerse de acuerdo con la normatividad vigente y en su ausencia con los métodos estándar (Normas Icontec, Normas ASTM, *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* de la APHA, AWWA y WPCF, 1995). (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

5.3.2 Normatividad.

Dentro de la normatividad vigente que aplica al proceso industrial de generación de energía termoeléctrica y que a su vez proporciona bases técnicas para este trabajo de investigación, se tienen:

5.3.2.1 Ley 373 de 1997

“Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua”

Artículo 4. Reducción de pérdidas. Dentro del programa de uso eficiente y ahorro del agua, la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, fijará metas anuales, para reducir las pérdidas en cada sistema de acueducto.

Artículo 5. Reúso obligatorio del agua. Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental (CONGRESO DE COLOMBIA, 1997).

5.3.2.2 Decreto 3930 de 2010

“Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados” (MAVDT, 2010).

5.3.2.3 Decreto 1900 de 2006

Por medio del cual se reglamentan las tasas por utilización de aguas (MAVDT, 2006).

5.3.2.4 Resolución No. 0631 de 2015

“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”

Artículo 3. *Del cumplimiento de la norma de vertimientos cuando la captación y la descarga se realicen en el mismo cuerpo de agua.* Cuando la captación de agua y la descarga de las aguas residuales se realicen en el mismo cuerpo de agua superficial, se procederá a realizar la sustracción del valor de la carga entre las mismas cantidades máxicas (Kg) de los metales y metaloides y de los elementos, sustancias o parámetros considerados para la Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.

Artículo 8. *Parámetros fisicoquímicos y sus valores 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.*

Artículo 15. *Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ArnD para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los Capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.*

Actividad: Generación de energía eléctrica; incluye: Producción de energía eléctrica por procesos térmicos y Cogeneración, que consiste en el proceso de producción, combinada de energía eléctrica y energía térmica (MINAMBIENTE, 2015).

5.3.2.5 Resolución 1207 de 2014

“Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”

Artículo 10. *De la prevención.* Para la obtención de la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas, el Usuario Receptor de acuerdo con el artículo 62 del Decreto 1541 de 1978, deberá presentar para evaluación de la autoridad ambiental competente, un documento en el que se definan las medidas y actividades a ser desarrolladas para prevenir el deterioro del recurso hídrico y de los demás recursos relacionados.

Artículo 11. *Del monitoreo y seguimiento.* El Usuario Receptor deberá presentar para su aprobación ante la Autoridad Ambiental Competente y de forma simultánea con la solicitud para la obtención o modificación de la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas, la Licencia Ambiental o el Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas, un plan de monitoreo del agua residual tratada, a ser desarrollado durante la vigencia de la autorización ambiental (MADS, 2014).

5.3.2.6 Resolución 1096 del 2000

"Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS"

Artículo 150. *Parámetros mínimos de calidad del agua que deben medirse.* Para la caracterización de aguas residuales debe procederse para cada descarga importante, a realizar por lo menos cinco jornadas de medición y muestreo horario de 24 horas de duración, con determinaciones de caudal y temperatura en el campo. Las campañas deben efectuarse en días diferentes.

Artículo 152. *Estudios de tratabilidad y/o toxicidad.* Se deben hacer un estudio de tratabilidad de las aguas residuales para los niveles de complejidad medio, medio alto y alto. El estudio de tratabilidad debe identificar la(s) tecnología(s) de tratamiento de mayor probabilidad de eficiencia en el tratamiento de: SS, DQO, DBO, pH, grasas y/o aceites, definidos en la normatividad de vertimientos del Decreto 1594 de 184 de MinSalud (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

5.4 COAGULACIÓN

5.4.1 Coagulación de aguas.

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0,01 mm) no se sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores a 0,01 mm) son generalmente sedimentables.

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no se sedimentan sino después de períodos razonables, y su efecto global se traduce en el color aparente y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos (Romero Rojas, 2009, pág. 239).

La coagulación química puede definirse como un proceso unitario, utilizado para causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua; es el proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas mayores de buena sedimentación (ídem).

Tabla 1. Tasas de sedimentación para algunas partículas.

Diámetro de la partícula mm.	Partícula representativa	Tiempo requerido para una profundidad de asentamiento de 0,3 m
<i>sedimentables</i>		
10	Grava	0,3 s.
1	Arena Gruesa	3 s.
0,1	Arena Fina	38 s
0,01	Limo	33 min.
<i>no sedimentables</i>		
0,001	Bacterias	55 horas
0,0001	Color	230 días.
0,00001	Coloides	6,3 años
0,000001	Coloides	63 años.

Fuente: (Romero Rojas, 2009, pág. 239)

El proceso de coagulación según Pérez, J. (s.f.), se usa para la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, remoción de color aparente y verdadero, eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos, remoción de algas y eliminación de sustancias que producen mal olor y sabor... “*En la coagulación interesa es la dispersión coloidal del sólido en el líquido, que es la que forma buena parte de la turbiedad y el color*”. Con base en su tamaño, los coloides han sido definidos como partículas cuyo diámetro varía entre 1 y 100 nm.

Dos propiedades únicas están asociadas a los coloides: movimiento browniano y área superficial extremadamente grande. Estas dos propiedades les permiten desafiar la ley de la gravedad y por tanto, impiden su remoción por acción simple. Debido a su inmensa área superficial, los coloides adsorben iones en cantidades desiguales, originando a la formación de una carga eléctrica que contribuye a su estabilidad. El resultado de la formación de esa carga eléctrica y el movimiento browniano es una colisión constante entre partículas. La tasa de coagulación puede tomarse entonces como una medida de la cantidad de partículas que se adhieren, durante la coagulación, en un periodo determinado (Romero Rojas, 2009).

5.4.2 Propiedades de los coloides.

5.4.2.1 Propiedades cinéticas.

- a) Movimiento Browniano: Las partículas coloidales no pueden sedimentarse aunque sean más densas que el agua, debido al movimiento constante y desordenado.
- b) Difusión: Movimiento incesante de las partículas coloidales que hace que se difundan en el agua, esto es, que se distribuyan uniformemente. La Vel. difusión < Vel. Mov. Browniano.
- c) Presión Osmótica: Debido al movimiento Browniano. Si la concentración de partículas no es uniforme, hay flujo de partículas de zonas de alta concentración a zonas de baja concentración (Pérez J. , pág. 38).

5.4.2.2 Propiedades ópticas.

- a) Diseminación de la luz: Un rayo de luz es diseminado al pasar a través de una suspensión coloidal. La diseminación hace aparecer a la solución como turbia. Es por esto, que la turbiedad es una forma de medir la concentración de partículas coloidales en el agua (Pérez J. , pág. 39).
- b) Opalescencia: Los colores primarios son incoloros, sin embargo, las suspensiones coloidales aparecen coloreadas. Esto se debe a la diseminación de la luz y a la absorción preferencial por parte del coloide de una cierta longitud de onda. Como la coloración es proporcional al número de coloides se utiliza el color como otra manera de medir la concentración de partículas coloidales (Pérez J. , pág. 39).

5.4.2.3 Propiedades de superficie.

De acuerdo con Pérez, J. (s.f.), cuando la materia se subdivide hasta el tamaño coloidal, se produce un gran incremento del área superficial. Esta enorme área tiene tendencia a la adsorción, esto hace que los coloides tengan la propiedad de absorber iones y moléculas (Adsorción: Acumulación de lo adsorbido sobre la superficie del adsorbente, absorción: Difusión de los absorbido dentro del adsorbente).

Tabla 2. Incremento del área superficial a medida que el tamaño de los coloides disminuye.

Largo de un lado	Cantidad de cubos	Superficie total
1 cm	1	6 cm ²
.	.	.
.	.	.
10 - 6 mm	10 21	6000 m ²

Fuente: (Pérez J. A., s.f., pág. 39)

5.4.2.4 *Propiedades electrocinéticas.*

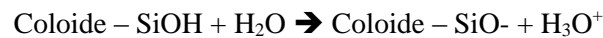
Según afirma Pérez, J. (s.f.), se ha observado que las partículas de una dispersión coloidal se mueven de un polo de determinado signo a otro. Esto implica que los coloides poseen una carga electrostática.

La carga es debida a:

- a) Reemplazo Isomórfico: la retícula del cristal de las arcillas puede tener imperfecciones, lo que permite el reemplazo de un átomo de mayor valencia por otro de menos valencia o viceversa, con lo cual el coloide adquiere carga eléctrica.

Ejemplo: SiO₄: Si el silicio +4 es reemplazado por un Aluminio Al⁺³ = Cristal cargado negativamente.

- b) Ionización: Muchos coloides adsorben grupos químicos con carboxidos, hidróxidos, los cuales se ionizan en el agua dando origen a carga eléctrica. Por ejemplo:



- c) Adsorción Preferencial: Los coloides también pueden cargarse por adsorción preferencial de iones de superficie. Esto es debido a las fuerzas electrostáticas o eléctricas, o a fuerzas químicas.

5.4.3 **Fuerzas que intervienen entre los coloides.**

Dos fuerzas deben ser consideradas:

5.4.3.1 *Coulómbicas.*

La naturaleza de las partículas coloidales es muy similar y por este motivo, la carga adquirida por ellas en cualquiera de las causas anteriormente vistas, es primordialmente del mismo signo creando fuerzas repulsivas, que implican que dichas partículas se junten. Se desarrollan cuando las partículas se acercan entre sí. Decece con el cuadrado de la distancia (Pérez J. A., s.f., pág. 41).

$$F = \frac{q_1 q_2}{El^2}$$

Donde:

E= constante de eléctrica (E= 1 en el vacío)

L= Distancia entre partículas

qi= Carga de la partícula i

5.4.3.2 *Van der Waals.*

Son fuerzas de estabilización molecular; forma un enlace químico no covalente en el que participan dos tipos de fuerzas o interacciones y que dependen exclusivamente, del tamaño y forma de la molécula,

pudiendo ser: Fuerzas de atracción y las fuerzas de repulsión, entre las capas electrónicas de 2 átomos contiguos (EcuRed, s.f.).

Todas las fuerzas de Van der Waals son cohesivas y varían con respecto a la distancia como $1/r^6$. Las fuerzas de Van der Waals son consideradas como la explicación molecular para las energías cohesivas de los líquidos y son semejantes en magnitud a las entalpías de vaporización de muchos líquidos, su valor aproximado es de $-41.84 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Vásquez, 2003).

Las clases de enlace de Van der Waals, pueden ser de: Orientación (interacción dipolo permanente – dipolo permanente), inducción (interacción dipolo permanente – dipolo inducido) y de dispersión (dipolo instantáneo – dipolo instantáneo (EcuRed, s.f.).

El grado de estabilidad de una partícula es determinado por un valor llamado **potencial zeta**, el cual está relacionado con la carga de la partícula y la distancia a través de la cual la carga es efectiva.

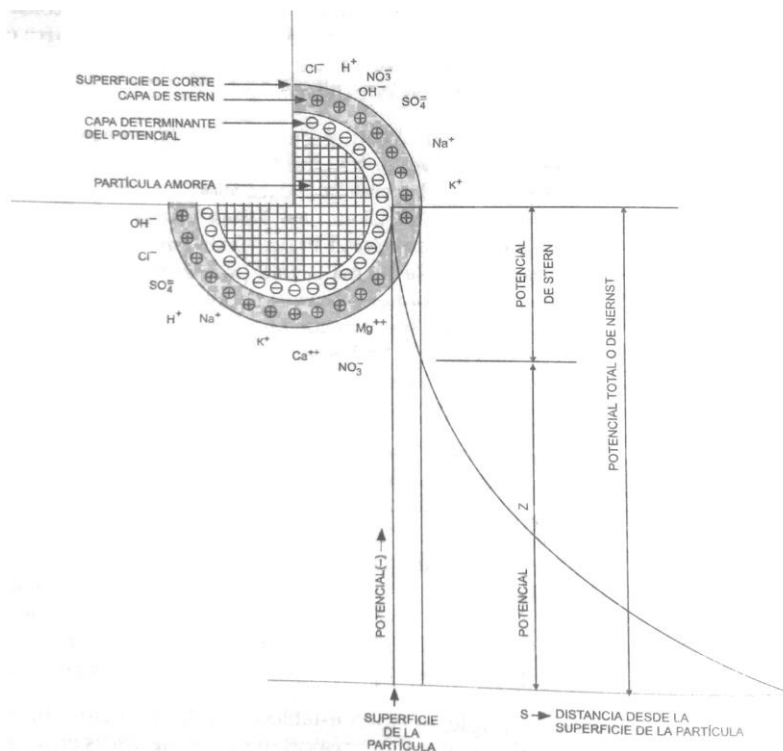


Figura 5. Coloide con carga neta negativa.
Fuente: Romero Rojas, 2009.

El potencial zeta se refiere al contorno entre el solvente adherido a la partícula en su movimiento y el solvente que puede moverse con respecto a la partícula. Dicho contorno o plano de corte es esencialmente la separación entre el agua de hidratación y el agua libre. En otras palabras, el potencial zeta es la medida, en milivoltios, del potencial eléctrico entre la capa fija y la capa exterior de iones de carga contraria que rodean el coloide (Romero Rojas, 2009, pág. 237).

La estabilidad de los coloides depende de la resultante de las fuerzas de atracción y repulsión que actúan sobre ellos. Las fuerzas de atracción, llamadas fuerzas de Van der Waals, son causadas por la interacción de dipolos de las partículas, ya sean permanentes o inducidas. La fuerza de repulsión, o sea la estabilidad del coloide en sistemas coloides hidrofóbicos, aquellos que repelen en el agua, caso más común para el tratamiento de aguas para consumo, se debe al potencial zeta; por tanto, para lograr la aglomeración de las partículas se debe reducir la fuerza de repulsión, de tal manera que las fuerzas de atracción prevalezcan y se logre la colisión de partículas para formar agrupaciones que se puedan remover fácilmente por gravedad (Romero Rojas, 2009, pág. 237).

La disminución de la estabilidad de las partículas, es decir, la reducción de las fuerzas de repulsión o del potencial zeta, se logra básicamente por los siguientes mecanismos:

- ☞ Ajustando el pH al punto isoeléctrico, esto es, al pH para el cual la carga neta de la partícula se anula y el potencial zeta se hace cero.
- ☞ Añadiendo iones de carga eléctrica contraria a la de los coloides que hay que remover, lo cual produce un doble efecto: primero, disminución de carga eléctrica neta del coloide con respecto al resto de la solución y segundo, aumento de la concentración de iones en la solución, reduciendo la distancia a través de la cual la carga es efectiva.

Mientras mayor sea la valencia del ion que se añade, mayor será su poder de coagulación. Esto se establece con la ley de Schulze-Hardy: *“La precipitación de un coloide es efectuada por aquel ion de electrolito añadido que tenga carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales, y el efecto de dicho ion se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de cargas que posea”* (Romero Rojas, 2009, pág. 238).

5.4.4 Fases de la coagulación.

Desde un punto de vista esquemático, se puede considerar que la coagulación se desarrolla en cinco fases consecutivas o simultáneas que explican reacciones físicas y químicas, de la siguiente forma:

Primera fase: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión;

Segunda fase: Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan;

Tercera fase: Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides;

Cuarta fase: Adsorción mutua entre coloides; y

Quinta fase: Acción de barrido (Pérez J. A., s.f.).

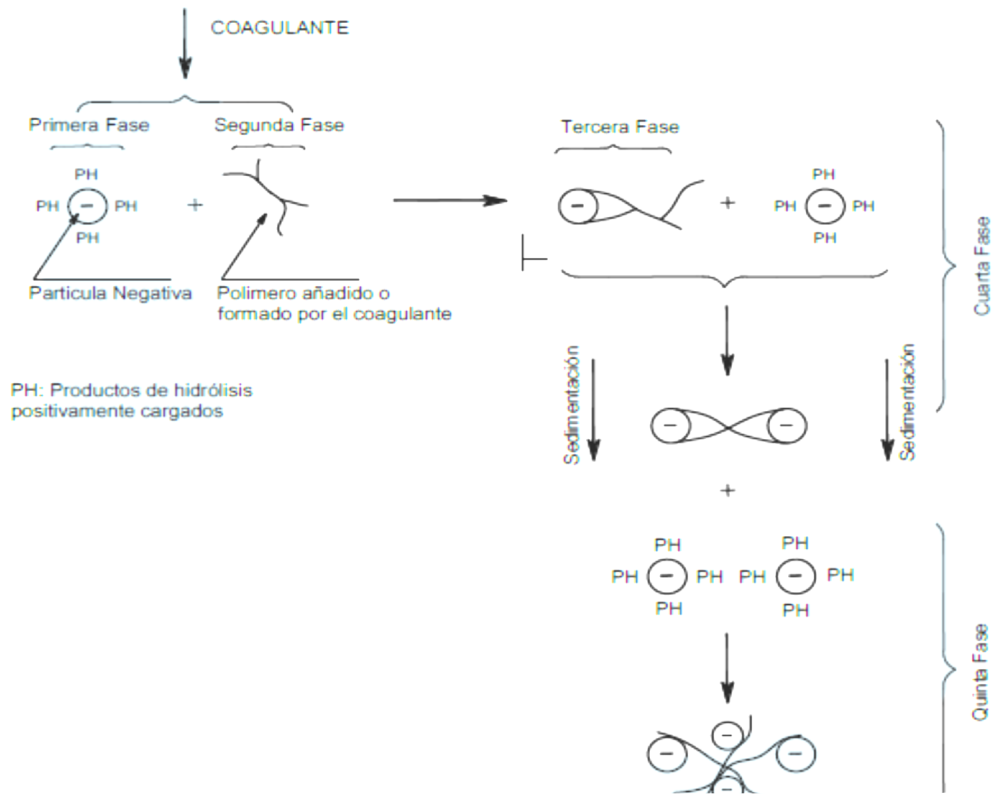


Figura 6. Modelo esquemático del proceso de coagulación.
Fuente: Módulo Diseño de Plantas Potabilizadoras, UNAD.

5.4.5 Tipos y ayudantes de coagulación.

5.4.5.1 Tipos de coagulantes.

En general, se puede decir que coagulantes son aquellos compuestos de hierro o aluminio capaces de formar *floc* y que pueden efectuar coagulación al ser añadidos al agua. Por otra parte, ayudas de coagulación son sustancias que producen poco o ningún *floc* al ser usadas solas, pero que mejoran los resultados obtenidos con simples coagulantes (Romero Rojas, 2009, pág. 239).

Los coagulantes más empleados son el sulfato de aluminio, el sulfato ferroso y la cal, el cloruro férrico, el sulfato férrico, el aluminato de sodio, el cloruro polialumínico, el cloruro poliférrico y la cal. Entre las ayudas de coagulación se incluyen el cloruro de magnesio, el aluminato de sodio, la sílice activada, el almidón y gran número de polielectrolitos de masa molecular alta (Romero Rojas, 2009, pág. 239).

Sulfato de Aluminio (alumbre)

El sulfato de aluminio es el coagulante estándar en tratamiento de aguas. El producto comercial, tiene usualmente la fórmula $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$, con masa molecular de 600 (...). Cuando se añaden soluciones

de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en Al^{+++} y SO_4^- . El Al^{+++} puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal.

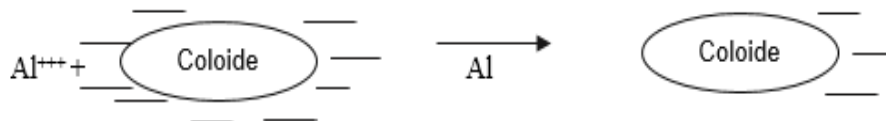
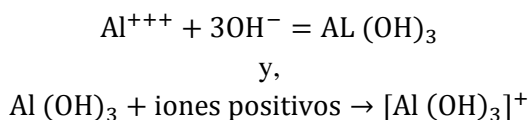


Figura 7. Neutralización de cargas de los coloides con el sulfato de aluminio.

Fuente: Romero Rojas, 2009.

Reduciendo así el potencial zeta a un valor en que la unión de las partículas puede ocurrir. El Al^{+++} puede combinarse también con los OH^- del agua para formar hidróxido de aluminio (Pérez G. , 2015).



Policloruro de Aluminio

Coagulante inorgánico a base de sales de aluminio polimerizadas, es ampliamente utilizado en un sinnúmero de procesos industriales; es utilizado principalmente para remover color y materia coloidal en sistemas acuosos. El producto comercial, tiene usualmente la fórmula $Al_2(OH)_3Cl$. Las propiedades físicas y químicas del policloruro de aluminio, pueden variar significativamente; este producto se encuentra en solución acuosa, cuyo rango de color varía desde incoloro a ámbar y de apariencia clara a turbia (...). El policloruro de aluminio desestabiliza los microorganismos y las partículas coloidales, permitiendo que estas se junten entre sí, formando coágulos que posteriormente se aglomeran conformando flóculos de mayor tamaño enviándolos hacia el fondo del tanque por efecto de la gravedad. Su formación depende de una gran variedad de condiciones como el pH, tipo de mezcla, el periodo de sedimentación y la circulación del lodo, entre otras (Cinética Química S.A de C.V, s.f.).

5.4.5.2 Auxiliares de coagulación.

Las ayudas de coagulación son generalmente sustancias químicas agregadas para optimizar el espesamiento, formar un floc más fuerte y más sedimentable, superar las caídas de temperatura que retardan la formación de mismo, reducir la cantidad de coagulante requerido y disminuir la cantidad de lodo producido. Los Polielectrolitos, son compuestos orgánicos sintéticos que tiene la habilidad de causar la agregación de suelos y sólidos, finamente divididos, en suspensiones acuosas (...). La dosis y tipo de electrolito deben determinarse para cada agua mediante ensayos de coagulación. Los polielectrolitos se clasifican como catiónicos, aniónicos y no iónicos. Los catiónicos son polímeros que al disolverse producen iones de carga positiva, por lo que se usan bastante en las aguas naturales y pueden utilizarse también como

coagulantes primarios o acompañados de alumbre o sulfato férrico. Los polielectrolitos aniónicos son polímeros que al disolverse producen iones de carga negativa y por lo tanto se usan para remover sólidos de carga positiva, generalmente acompañados de alumbre o un coagulante de hierro (Romero Rojas, 2009, pág. 247).

Los polielectrolitos no iónicos al disolverse producen iones tanto positivos como negativos y pueden usarse como coagulante o ayuda de coagulación, aunque se utilizan dosis más grandes que las de los otros dos tipos. La dosis normales de polímeros catiónicos y aniónicos son de 0,1 a 1 mg/L; para polímeros no iónicos, de 1 a 10 mg/L (ídem).

Los coagulantes poliméricos se caracterizan por poseer un gran tamaño molecular y cargas eléctricas a lo largo de una cadena molecular de átomos de carbono. Experimentalmente se ha demostrado que los polímeros catiónicos y aniónicas son efectivos para coagular coloides negativos gracias a enlaces químicos existentes entre el polímero y el coloide. La cola del polímero absorbido se adhiere a los lugares vacíos de otras partículas, formando un puente químico y permitiendo la formación del *floc*. Si la cola del polímero absorbido no encuentra lugares vacíos de otra partícula puede doblarse y adherirse a otros sitios del coloide original, reestabilizando el coloide (ídem).

Polímero aniónico.

Es un polielectrólito sintético derivado de los hidrocarburos; el polímero está conformado por grandes moléculas compuestas por una cadena de unidades monoméricas, que interactúan con sólidos y coloides para favorecer la separación sólido – líquidos en el tratamiento primario de las aguas residuales. Su presentación comercial suele ser: sólidos (granulado en polvo), líquido en emulsión o líquido en solución (EMCALI, 2014).

En la *Figura 8* se pueden observar el proceso de formación de flóculos mediante coagulantes poliméricos, según Romero, R. (2009).

5.4.6 pH óptimo para la coagulación.

El valor del pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso de coagulación; el pH afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y el aluminio, así como el tiempo requerido para la formación de *floc* y la carga sobre las partículas coloidales. El pH óptimo para la remoción de coloides negativos varía según la naturaleza del agua, pero usualmente cae entre pH 5,0 y 6,5. En el caso de los coagulantes de aluminio, la solubilidad mínima del precipitado de hidróxido de aluminio a 25 °C ocurre a un pH de 6,3 y para el hidróxido férrico, a 25 °C, ocurre a un pH de 8,0. Además hay que tener en cuenta que el pH para solubilidad mínima aumenta al disminuir la temperatura; por ejemplo, a 4 °C el pH para solubilidad mínima del hidróxido de aluminio es de 6,8 (Romero Rojas, 2009, pág. 248).

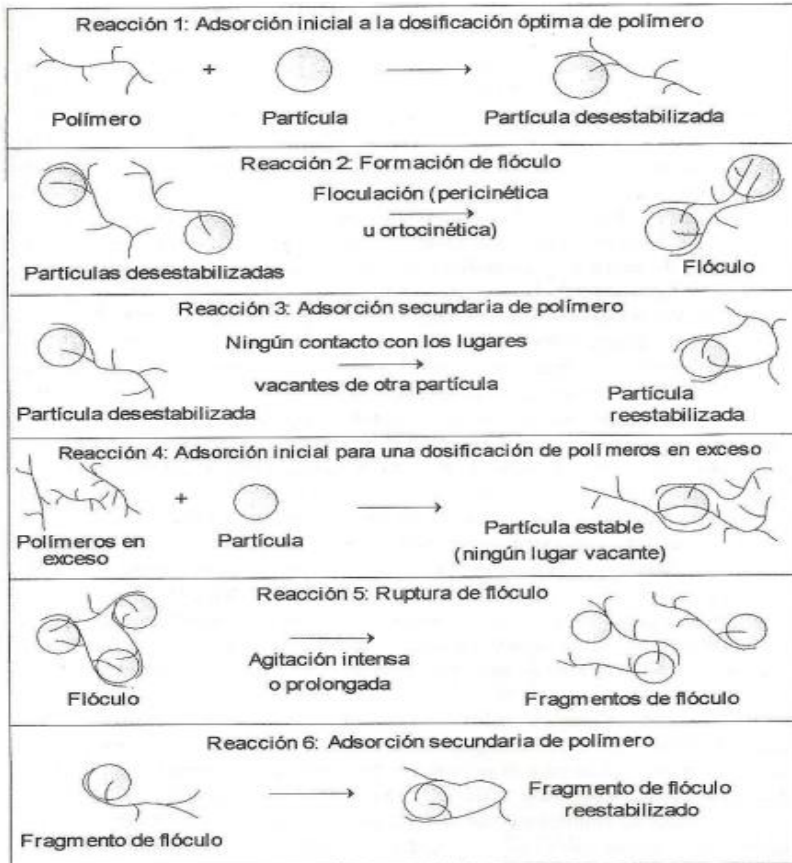


Figura 8. Proceso de formación de flóculos mediante coagulantes poliméricos.
Fuente: Romero Rojas, 2009.

5.4.7 Aspectos de la coagulación - floculación.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en el proceso de coagulación - floculación: La desestabilización de las partículas coloidales o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas, el transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, estableciendo puentes entre sí para formar una malla tridimensional de coágulos porosos. El primer aspecto se conoce con el nombre de coagulación, el segundo aspecto como floculación; la coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: El de adsorción, desestabilización basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua (ACODAL, 1992).

5.4.7.1 Modelo físico.

Explica la coagulación del agua teniendo en cuenta las fuerzas electrostáticas presentes en las partículas coloidales, las cuales se consideran rodeadas por una doble capa que interactúa con la fase acuosa y los otros coloides.

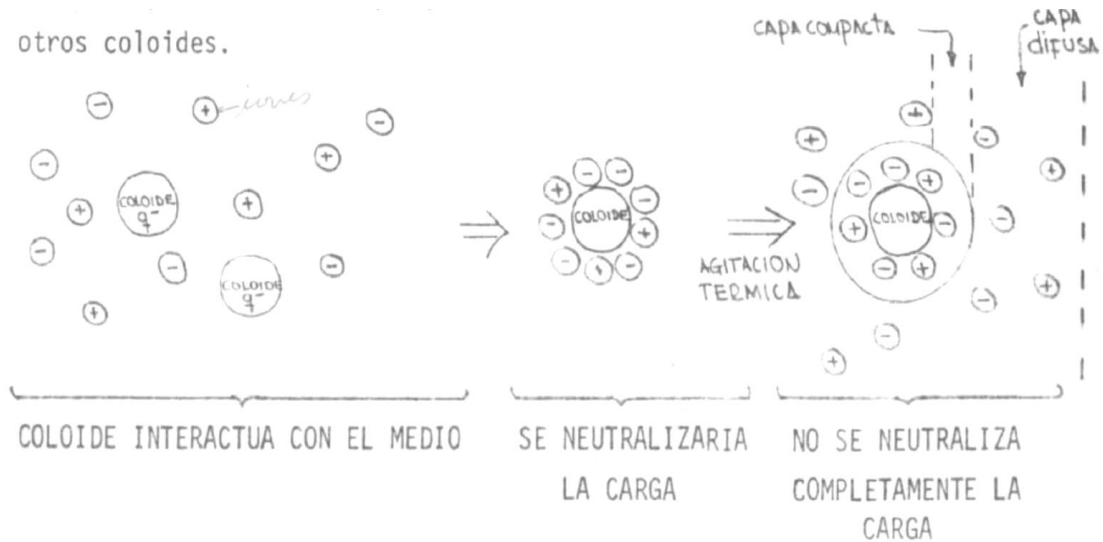


Figura 9. Modelo físico de la coagulación.

Fuente: Pérez J. (s.f.).

Capa Compacta: Se adhiere al coloide y transita con él por el fluido. Está en equilibrio dinámico con la capa difusa (Pérez J. s.f. pág. 43).

Capa Difusa: Empieza donde termina la capa adherida y termina en el punto hasta donde influye la carga del coloide (ídem).

Cualquier material insoluble en agua, que forme con ella una dispersión de partículas coloidales, se carga positiva o negativamente ya que absorbe iones de signo contrario, con lo cual forma una capa compacta pero sin neutralizar totalmente la carga electrostática del coloide y una capa difusa de espesor δ , adquiriendo así un potencial eléctrico (ídem).

Coagulación por neutralización de carga: La neutralización de la carga se puede hacer por:

- Cambio en la concentración de los iones responsables del potencial.

Los contraiones incorporados desplazan de la capa difusa a los iones responsables del potencial, se neutraliza la carga.

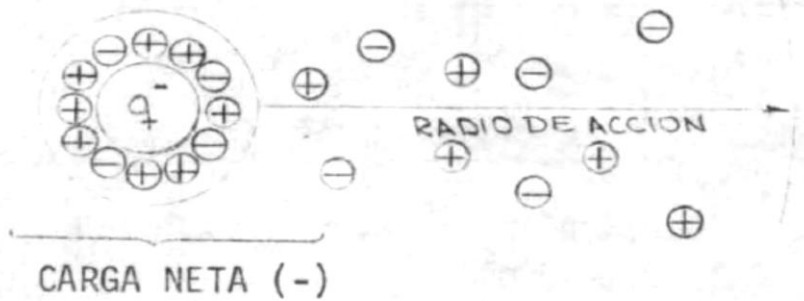


Figura 10. Coagulación por neutralización de carga.

Fuente: Pérez, J. (s.f.).

- b. Adsorción de iones de carga opuesta a la de los iones responsables del potencial y que reemplacen a éstos en la capa compacta. Se neutraliza la carga.
- b) Coagulación por comprensión de la Doble Capa: Aumentando la concentración del coagulante o electrolito (iones y moléculas en solución) se incorporan contra iones, lo cual represa la capa difusa porque disminuye la distancia hasta la cual es efectiva la carga del coloide, con lo cual baja el potencial Z (Pérez J. A., s.f., pág. 43).

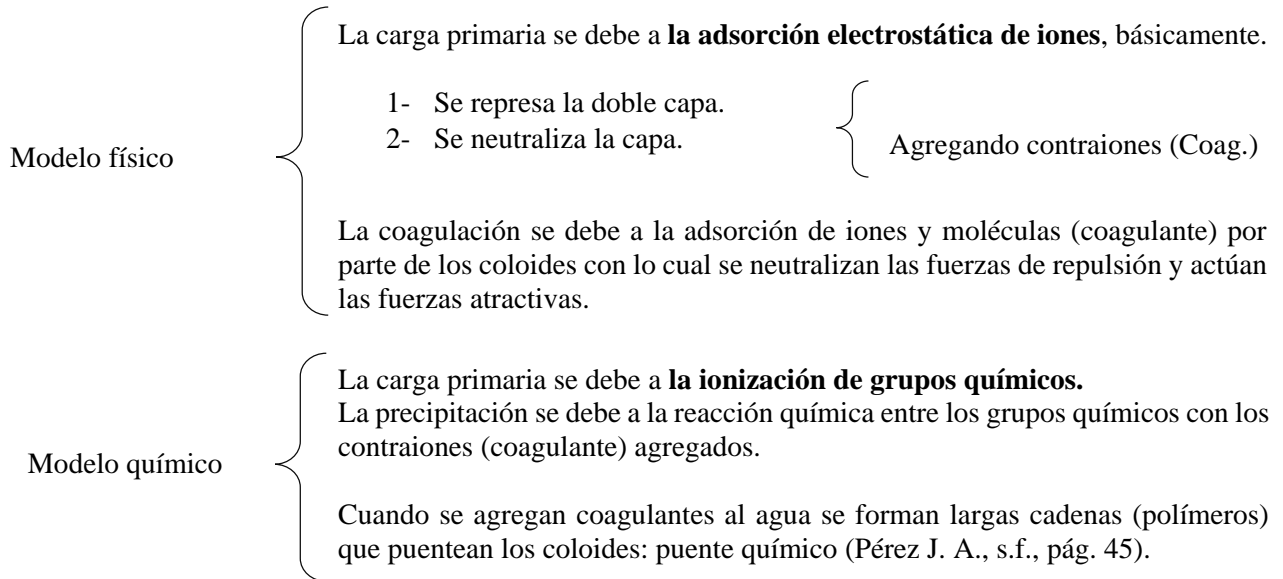
La disminución de la doble capa es más importante que la neutralización de la carga.

5.4.7.2 Modelo químico.

El modelo químico complementa la explicación que da el modelo físico sobre la coagulación. Se considera que la carga primaria de las partículas coloidales se debe a la ionización de los grupos químicos adsorbidos sobre su superficie y que la unión y precipitación de los coloides se debe a la reacción química entre los grupos químicos y los contra iones metálicos polivalentes agregados con el electrolito coagulante (Pérez J. A., s.f., pág. 45).

La desestabilización se interpreta más bien como una interacción química y no como adsorción de contra iones o interacción física. La desestabilización de los coloides que se produce por polímeros, no puede explicarse por el modelo de doble capa. Se propuso entonces la teoría del puente químico: Cuando se le agregan los coagulantes al agua, la molécula del polímero queda adherida a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejando extendida en el agua el resto de la cadena a la que pueden pegarse otros coloides. Se establece así el “puente químico” entre dos o más iones. Hay un incremento de tamaño y se produce la precipitación (ídem).

Resumiendo lo anterior:



5.4.8 Mecanismo de la coagulación.

Se denomina así a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas que correspondan al mecanismo de coagulación predominante (...). Se sabe que la desestabilización de las partículas se lleva a cabo principalmente mediante dos mecanismos: Adsorción o neutralización de las cargas y barrido. Investigaciones realizadas han demostrado que las condiciones de la mezcla rápida son importantes para optimizar el primer mecanismo, mientras que para la coagulación de barrido son indiferentes (CEPIS/OPS, 2004).

Según el Ministerio de Desarrollo Económico (2000), el mecanismo de coagulación con el que se requiere trabajar, está en función de las características del agua cruda, que complementa el planteamiento de CEPIS/OPS (2004), en donde establece:

Entre los posibles mecanismos se encuentran:

- ☞ Adsorción y neutralización de carga. Se basa en la acción de la energía electroquímica sobre los coloides, al existir una acción electrostática entre el coagulante y las partículas en suspensión.
- ☞ Barrido. Se presenta cuando se adicionan cantidades elevadas de sales metálicas como el aluminio y el hierro, que exceden el límite de solubilidad del compuesto en el agua. Esto ocasiona la precipitación rápida del hidróxido metálico, como $Al_2(OH)_3$ o $Fe(OH)_3$, que forma una masa esponjosa. Las partículas coloidales son removidas al quedar atrapadas en el precipitado.
- ☞ Puente químico. Se presenta cuando las cadenas poliméricas del coagulante se entrelazan con las partículas coloidales y se unen entre sí.
- ☞ Una mezcla de los mecanismos anteriores (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

En la coagulación por adsorción, las reacciones que preceden a la neutralización de la carga con aluminio, son extremadamente rápidas y ocurren en milésimas de segundos cuando no hay formación de polímeros

hidrolíticos de Al (III), y en un segundo cuando éstos se forman. En cambio, la formación del precipitado de hidróxido de aluminio antes de la coagulación de barrido es lenta y se produce en un rango de 1 a 7 segundos (CEPIS/OPS, 2004).

Debido a la naturaleza de las reacciones involucradas en cada uno de estos modelos de coagulación, se deduce que para que ocurra la neutralización de la carga, es imperativo que los coagulantes sean difundidos en las masas de agua, tan rápido como sea posible (menos de 0.1 seg.), para que los productos que se desarrollan entre 0.01 y 1 segundo, produzcan la desestabilización del coloide. Por el contrario, para la coagulación de barrido, la formación del hidróxido se produce en un rango de 1 a 7 segundos, por lo que es evidente que no es de crucial importancia disponer de tiempos de dispersión muy cortos, o de altas intensidades de mezcla (ídem).

5.5 FLOCULACIÓN

La floculación se define como una lenta agitación en el agua, para permitir el crecimiento de floc. Este crecimiento es inducido por el contacto de partículas de diámetro mayor de una micra, el contacto de partículas se crea por el gradiente de velocidad de la masa líquida.

Los dos objetivos que se persiguen con la floculación son: Reunir los microflóculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua y compactar el floc (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación – filtración) (Arboleda, 2000).

En la floculación según Pérez, J. (s.f.) deben distinguirse dos tipos:

- a) Floculación ortocinética: Es realizada por la energía comunicada al agua por fuerzas externas como por ejemplo paletas giratorias o estructuras hidráulicas (canal con escalas), causando el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta considerablemente la posibilidad de colisión.
- b) Floculación pericinética: Es promovida internamente en el líquido debido al movimiento Browniano y a que los coloides al sedimentarse tienden a aglomerarse. Dicha sedimentación se realiza poco tiempo después de desestabilizadas las partículas. Este proceso es extremadamente lento, por esto, no es de interés práctico en el tratamiento de agua (Arboleda, 2000).

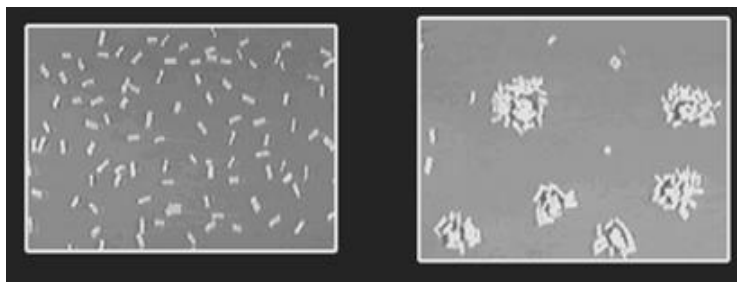


Figura 11. Aglomeración de partículas coloidales, empleando floculante.

Fuente: Universidad de Salamanca, (s.f.).

5.6 SEDIMENTACIÓN

Se entiende por sedimentación, la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La remoción de partículas en suspensión en el agua, puede conseguirse por sedimentación o filtración, de allí ambos procesos se consideren como complementarios (CEPIS/OPS, 2004).

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada (ídem).

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así, que se puede referir a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida (ídem).

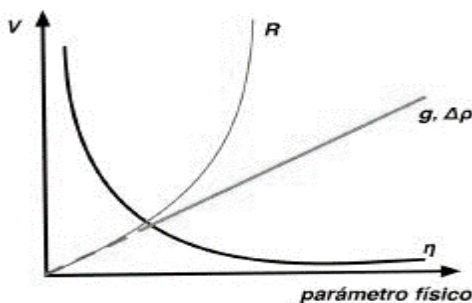


Figura 12. Efecto de los parámetros relacionados por la Ley de Stokes sobre la velocidad de sedimentación.

Fuente: Delgado y otros, 2013.

5.7 ENSAYOS DE CONTROL PARA LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.

Para la selección de los procesos de tratamientos previos o paralelos al diseño de una planta, deben realizarse ensayos en el laboratorio siendo obligatorio entre estos, el test de Jarras; y posteriormente, si se justifica, realizar ensayos en planta piloto para determinar el tratamiento al que debe ser sometida el agua. Para los niveles bajo y medio de complejidad no se recomienda la realización de los ensayos de planta piloto, a menos que se estudie un nuevo proceso o variables desconocidas que no pueden ser analizadas en el laboratorio. La prueba de jarras es obligatoria para cualquier nivel de complejidad, no solamente para los

estudios de tratabilidad en el proceso de diseño, sino también diariamente, durante la operación de la planta, y cada vez que se presenten cambios en la calidad del agua (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Los ensayos de laboratorio y planta piloto deben emplearse para determinar:

- ☞ El grado de comportamiento de ciertos procesos de tratamiento.
- ☞ Los criterios básicos de diseño para la planta a escala real (dosificaciones de los productos químicos, necesidad de mezcla y floculación, velocidad de filtración, tiempos de contacto, entre otros aspectos) (ídem).

Estos ensayos deben realizarse con todas las muestras tomadas por lo menos un ciclo hidrológico anual, con el fin de analizar todas las posibles calidades de agua cruda que se puedan presentar; es decir, cambios en la turbiedad, color o demanda de cloro, temperatura, pH, alcalinidad, contenido de algas, hierro y manganeso, cambios en el sabor y olor, entre otros (ídem).

Estas pruebas consisten en simular en vasos de precipitado o jarras, el proceso de coagulación floculación que se producirá en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento. Este procedimiento debe realizarse de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903, su objetivo básico es la determinación de los coagulantes y auxiliares de coagulación (metálicos o prepolimerizados), sus dosis óptimas, secuencia de adición de los mismos para una turbiedad, un color, un pH, una temperatura, una alcalinidad y una dureza dados. Estas pruebas deben repetirse no menos de 10 veces para distintas condiciones del agua cruda (ídem).

La dosis optima según Recalde (2010), se define como el procedimiento de la prueba de jarras, consta de la determinación de dosis óptima de coagulante, el cual se refiere a la concentración en donde hay un eficaz proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Las partículas se aglutinan en pequeñas masas, llamadas flocs, tal que su peso específico supera a la del agua y precipitación

La prueba de jarras ha constituido uno de los principales instrumentos de trabajo en las plantas de tratamiento de aguas en todo el mundo; la cual se ejecuta básicamente colocando en seis vasos de precipitado o frascos de boca ancha de 1 a 3 L, en acrílico transparente, como las recomendadas por Hudson (Castrillón & Giraldo, 2012).

Allí se adiciona la muestra de agua, agregándole diversas dosis de coagulantes a cada uno mientras se agita fuertemente la muestra y luego suspendiendo la agitación violenta y dejando por 10 - 30 minutos, una agitación lenta, durante la cual se observa el aspecto y tamaño del floc formado en cada caso. Este ensayo intenta simular las condiciones en las cuales coagula el agua en la planta de tratamiento (CEPIS, 1973).

El proceso de coagulación – floculación a través del test de jarras, permite aglutinar las partículas en pequeñas masas con pesos específicos superior al del agua llamadas floc. Dicho proceso se usa para:

- ☞ Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- ☞ Remoción de color verdadero y aparente.
- ☞ Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados por coagulación.

- ☞ Destrucción de algas y plancton en general.
- ☞ Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos, entre otros (Salazar, 2012).

Los parámetros operacionales del proceso del test de jarras, son la intensidad de agitación que se impartirá al agua para dispersar al coagulante, el cual se evalúa mediante el gradiente de velocidad y el tiempo durante el cual debe aplicarse esta agitación al agua. La magnitud de estos parámetros dependerá del tipo de coagulación que se va a llevar a cabo: Coagulación por adsorción o coagulación por barrido (Vargas, Capítulo 5. Mezcla rápida, 2004).

5.7.1 Gradiente de velocidad.

La variable que más importancia tiene en la floculación ortocinética, según Vargas (2004), es el parámetro del gradiente de velocidad, el cual caracteriza directamente la velocidad de aglomeración de las partículas, convirtiéndose este un factor de proporcionalidad.

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores (Vargas, Capítulo 6. Floculación, 2004).

En el ensayo de jarras, según afirma Vargas (2013), esta intensidad de agitación se realiza mediante paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas. En la *Tabla 3*, se detallan las características de las paletas o agitadores.

Tabla 3. Características de agitadores.

Tipo de paleta	Número de paleta	Diámetro (D-cm)	Área proyectada (a-cm)	Observaciones
Plana-1	2	7 y 6	17,5	a
Plana-2	2	7,2	28,8	b
Plana-3	2	7,2	18,4	c
Hélice	3	5,0	4,50	d
Doblada	2	5,0	2,80	

a) Utilizada en el modelo Phipps y Bird. b) Tipo impulsor marino, c) Utilizada por Florida 1-Environmental specialities, d) Utilizada por Florida 2-Environmental specialities.

Fuente: Vargas, 2013.

La intensidad de agitación es importante sólo cuando el mecanismo predominante es el de adsorción o neutralización de carga. Cuando el mecanismo predominante es el barrido, este parámetro es indiferente,

debiendo limitarse a producir una distribución homogénea del coagulante en la masa de agua. En los casos en que el mecanismo predominante sea el de adsorción, los gradientes de velocidad (G) recomendados varían entre 700 a 1000 s^{-1} y de 3000 a 5000 s^{-1} para coagulantes inorgánicos, dependiendo del tipo de mezclador (CEPIS/OPS, 2004).

Las curvas de calibración establecidas por Camp en 1970, relacionan el gradiente G , la temperatura y revoluciones por minuto de un aparato patrón Phips & Bird para jarras de 2 litros, con y sin deflectores. La finalidad de los deflectores es reducir la velocidad de rotación del agua durante el período de floculación y de esta forma, producir gradientes de velocidad de mayor intensidad en la mezcla rápida o en la floculación (ENOHSA, 2013, pág. 53).

ENOHSA (2013, 56) también menciona que la velocidad de rotación es igual para todas las paletas. Así mismo, entre los diversos aparatos existentes, se debe dar preferencia a aquéllos que responden al modelo “Phips & Bird” con la paleta indicada en la *Figura 14*; así mismo también existen diversas curvas confiables de calibración de gradientes, debidamente comprobadas por diversos investigadores. En las estaciones de tratamiento se encuentran con más frecuencia, aparatos con jarras de 1 litro; es por eso de interés, la curva de calibración obtenida por Bhole (1970), presentada en la *Figura 13* que corresponde a la ecuación:

$$G = 0,25 (r.p.m)^{1,25}$$

$$r.p.m = 3,0 G^{0,8}$$

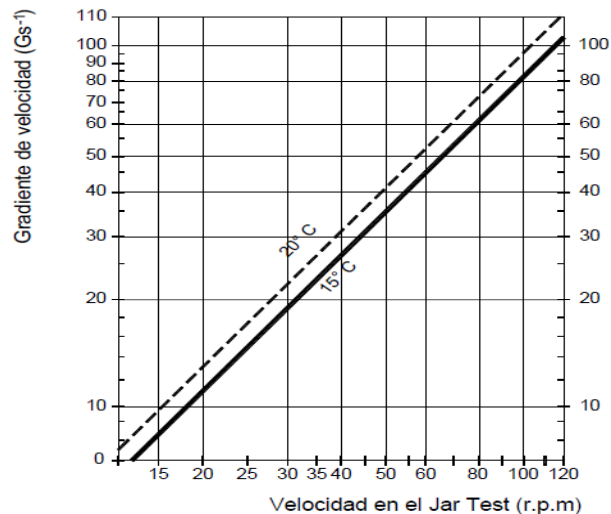


Figura 13. Curva de calibración para jarras de 1 Litro.
Fuente: ENOHSA, 2013.

Por ejemplo, determinar la velocidad de rotación del aparato para tener un gradiente de 45 s^{-1} : $r.p.m. = 3,0$
 $(45)^{0,8} = 63$

Como se puede apreciar, es recomendable realizar ensayos preferiblemente en aparatos tipo Phips & Bird, con la paleta normalizada de las medidas de la *Figura 14*, para la cual se tiene una correlación confiable entre la velocidad de rotación y el gradiente resultante.

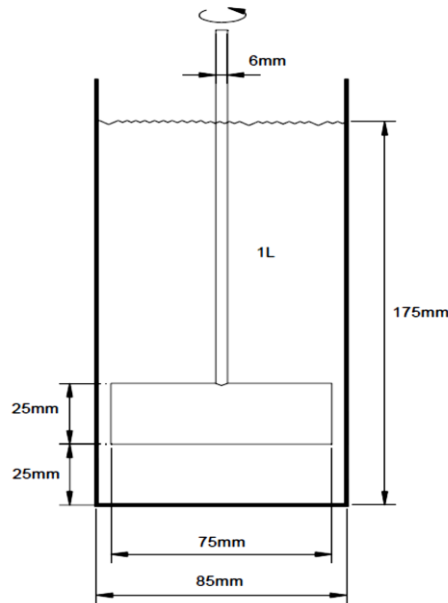


Figura 14. Paleta tipo Phips & Bird.
Fuente: ENOHSA, 2013.

5.7.2 Gradientes de velocidad recomendados

De acuerdo con Romero, R. (2009), los valores de gradiente de velocidad, para los aparatos generalmente usados en los laboratorios se presentan en la *Tabla 4*, los cuales corresponden a los valores experimentales del libro de Hudson, según Camp.

Cañas (2005), realizó un estudio a escala de laboratorio, el cual presentaba como objetivo, establecer la viabilidad del cambio del sulfato de aluminio como coagulante primario en la planta “La Flora” del acueducto metropolitano de Bucaramanga por el policloruro de aluminio y evaluar el comportamiento de estos dos coagulantes en el proceso de potabilización del agua.

De acuerdo a Cañas (2005), en la *Tabla 5* se muestran los resultados de la determinación del tiempo y gradiente óptimo de floculación. Para este ensayo se analizaron 4 muestras de agua, con diferentes valores de turbiedad y color.

El gradiente de velocidad correspondiente a 55 rpm deterioró los floc formados, por lo tanto, produce los valores de turbiedad residual más altos, mientras que el gradiente con el cual en todos los casos se produce el menor valor residual, es el correspondiente a una velocidad de entre 20 y 30 rpm, pero el valor 20 rpm no se adoptó como el óptimo en ningún caso, ya que con esta velocidad de rotación, los flocs formados se

sedimentaron durante el periodo de floculación, lo cual, de ocurrir en la planta, podría resultar en la ruptura de las paletas de agitación. Por lo tanto, en la *Tabla 6*, se halló un promedio para determinar el tiempo y gradiente óptimo para cada coagulante.

Tabla 4. Valores del gradiente de velocidad G, para el aparato generalmente usado en el laboratorio.

Valor de G, s ⁻¹ T=10°C			
RPM	Volúmenes de jarra cilíndrica		
	2 L*	1 L+	0,5 L+
30	14	20	28
40	20	28	40
50	24	35	50
55	30	42	60
60	35	50	70
70	40	57	80
80	50	71	100
90	60	85	120
100	70	99	140

Valores del gradiente de velocidad, G,

Para aparato de mezcla de laboratorio Phipps and bird

*Valores experimentales de la figura 3,2 del libro de Hudson, según Camp.

+Valores calculados por la fórmula $G_1 = G \sqrt{\frac{v}{v_1}}$

Fuente: Romero, J. (2009).

Tabla 5. Valores de gradientes ensayados.

Velocidad de agitación (rpm)	Gradiente (S ⁻¹)
20	14
25	18,5
30	23,5
40	33
55	50

Fuente: Cañas, 2005.

Los resultados obtenidos, demostraron que el policloruro de aluminio trabaja mejor que el sulfato de aluminio en el proceso de coagulación – floculación, y presenta algunas otras ventajas adicionales sobre el sulfato de aluminio; a partir de estos resultados se comprobó la factibilidad de la implementación del PAC en la planta La Flora desde el punto de vista técnico, ambiental y económico (Cañas, 2005).

Tabla 6. Tiempos y gradientes óptimos para sulfato y policloruro de aluminio.

Coagulante	Tiempo óptimo (min)	Gradiente óptimo
Sulfato de aluminio	29	30 rpm ($23,5 S^{-1}$)
PAC- férrico	24	30 rpm ($23,5 S^{-1}$)
PAC - PQP	24	28 rpm ($21,5 S^{-1}$)
Quiprahc - Q4c	25	29 rpm ($22,5 S^{-1}$)

Fuente: Cañas, 2005.

5.8 CONSIDERACIONES ACERCA DEL ENSAYO DE JARRAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

Un ensayo de jarras diseñado con objetivos claros, y llevado a cabo según el método científico puede ahorrar a la empresa miles de dólares anuales. Dentro del marco del tratamiento de agua residual industrial el ensayo de jarras constituye una de las herramientas más útiles a considerar concernientes a: diseño inicial y rediseños, inclusión de operaciones o procesos unitarios, mejoras en la eficiencia de productos químicos de todo tipo y control de dosis, entre otros.

Primero, al incluir una operación o proceso unitario en la PTAR ya existente, y tomando como muestra representativa el efluente del proceso u operación inmediatamente anterior, se puede determinar, basados en los aspectos discutidos en el punto anterior, la viabilidad de la misma y predecir su relación coste/beneficio/riesgo.

Adicionalmente, el ensayo de jarras permite establecer condiciones ideales que permitan el óptimo funcionamiento de productos químicos tales como: coagulantes, floculantes, antiespumantes, controladores de olores, cal, soda, ácidos, etc. Estas condiciones son: grado y punto de agitación para la correcta dispersión de los productos y evitar problemas como rompimiento de floc, dosificación mayor o menor a la recomendada. Otras condiciones que se permiten optimizar mediante el ensayo de jarras son: sistema de mezcla (estática o dinámica), tiempos de retención para lograr la reacción, sistemas de preparación idóneos al químico seleccionado. El funcionamiento ineficiente de un producto químico en particular, genera más dosis, y esto resta eficiencia al tratamiento en términos económicos.

En conclusión, un buen ensayo de jarras, que tenga en cuenta: selección de una muestra compuesta representativa del afluente a analizar, objetivos claros, consideraciones al ejecutar el ensayo como: tiempos de reacción y retención, grados de agitación, concentración de los productos a analizar, y un análisis de laboratorio para establecer objetivamente, luego del ensayo, la eficiencia de la variable a estudiar (SST, DQO, DBO, pH, turbiedad, etc.), y que simule de la mejor manera las condiciones existentes, puede generar grandes ahorros en: dimensionamiento de las instalaciones, coste energético, dosis de químicos, y maximiza el aprovechamiento de todos los equipos de la PTAR (SERQUIMSA, 2015).

6. METODOLOGÍA

Este proyecto tiene un enfoque cuantitativo, en donde para dar cumplimiento a su objetivo general, se ha establecido un diseño experimental basado en la realización de ensayos de jarras, los cuales permiten representar a escala de laboratorio la coagulación, floculación y sedimentación; esto con la finalidad de evaluar la eficiencia de remoción, para cada uno de los parámetros que caracterizan fisicoquímicamente las aguas residuales industriales de la central térmica de RíoClaro; para esto se establece la siguiente metodología, la cual se desarrolla en tres fases.

6.1 FASE I - DIAGNÓSTICO.

Consiste en realizar una identificación de proceso de generación de energía, con el objetivo de reconocer las entradas y salidas del agua en cada uno de los subsistemas; así mismo como los estándares, procedimientos, cantidades y las características fisicoquímicas de cada uno de los efluentes que integran las aguas residuales de la central termoeléctrica, para que de este modo se proporcionen las bases suficientes en la realización de las fases posteriores; además estos son aspectos fundamentales para la realización de una auditoría del recurso hídrico y secuencialmente un balance másico cuantitativo, tomando como referencia los registros históricos de consumo de agua, en cada uno de los sistemas involucrados dentro del ciclo de generación de energía; esto permite establecer los indicadores de la huella hídrica, proyección de los porcentajes de ahorro, recuperación y/o reutilización.

6.2 FASE II - EXPERIMENTAL.

El desarrollo de esta fase se compone de dos etapas, la primera pre-experimental y la segunda experimental.

6.2.1 Variables, métodos de determinación y procedimientos.

Las variables definidas para este trabajo de investigación, son parámetros fisicoquímicos que permiten cuantificar el contenido de sólidos disueltos, suspendidos y coloidales del agua, en relación con el objetivo general; además de considerar el acceso y la disponibilidad de los materiales y equipos requeridos para la realización de los procedimientos analíticos, de acuerdo a los estándares internacionales y nacionales por los entes competentes en el tema, como lo son la EPA, la ISO, el ICONTEC, el IDEAM, entre otros; los cuales se basan principalmente en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* y otros métodos aprobados nacional e internacionalmente.

Las variables definidas son el color, sólidos suspendidos, pH y conductividad, los cuales son medidos antes y después de cada ensayo; es por ello que la *Tabla 7* se establecen los métodos de determinación de cada parámetro y la norma sobre el cual está basado el procedimiento analítico.

6.2.2 Materiales y Equipos



Para el desarrollo de las dos etapas, se identifican los materiales y equipos necesarios para la realización de los ensayos de jarras, los cuales se presentan en la *Tabla 8*.

Tabla 7. Variables, métodos de determinación y procedimientos.



Parámetro	Equipo y unidades	Método de determinación	Procedimiento basado en
Color Aparente	Espectrofotómetro	Fotométrico	Norma Técnica Colombiana - NTC 5844.
Sólidos Suspendidos	Espectrofotómetro	Fotométrico	Método 2540 del Standard Methods
Conductividad	Conductímetro	Conductimétrico	Norma Técnica Colombiana - NTC 4531
pH	pHmetro	Electrométrico	Norma Técnica Colombiana - NTC 3651.

Fuente: Autores.

Tabla 8. Materiales y equipos, empleados en los ensayos o test de jarra.

Material o Equipo	Descripción	Registro fotográfico
Test de Jarras	Floculador de 4 puestos, con indicación digital de RPM, Transiluminador luz fluorescente (1 lámpara de 30 w), rango de agitación: 20 a 1000 rpm, aspás en acero inoxidable.	
Espectrofotómetro	HACH DR 2700, modo operativo: Transmitancia (%), absorbancia y concentración, rango de longitud de onda: 340 - 900 nm.	

Material o Equipo	Descripción	Registro fotográfico
pH-metro	HACH HQ 11 d	
Conductímetro	HACH HQ14d	
Vasos de precipitados	Tres vasos de vidrio redondos, con una capacidad de 1000 mL cada uno.	
Gotero	Gotero de plástico de 1 mL.	
Frasco lavador	Frasco lavador de plástico, con una capacidad de 1000 mL.	
Pipetas volumétricas	Material de vidrio, con capacidades de 1 y 2 mL.	
Celdas	Celdas de vidrio, de pulgada cuadrada.	

Material o Equipo	Descripción	Registro fotográfico
Baldes de aforo volumétrico	Capacidad de 5 L.	
Tipos de coagulantes:	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ ☞ Policloruro de Aluminio (PAC). ☞ NALCO 8557 ☞ NALCO 8187 ☞ Auxiliar de coagulación: Polímero aniónico NALCLEAR 8173. 	

Fuente: Autores.

6.2.3 Muestreo

Los muestreos de las aguas residuales industriales en la central termoeléctrica, se realizarán durante un periodo de cuatro meses, tomando aleatoriamente 40 muestras puntuales (una por día) de forma no consecutiva; además como la planta opera continuamente (teóricamente a la misma productividad), la hora del muestreo se elegirá al azar, de este modo se garantiza una mayor representatividad y reproducibilidad, lo que por ende le da confiabilidad a los resultados; esto aplica en el desarrollo de las dos etapas (pre-experimental y experimental); por otro lado el punto de muestreo, corresponde a la descarga o vertimiento de las aguas residuales del sistema de tratamiento final que realiza el proceso; ya que esta es la calidad de agua sobre los cuales se han planteado los objetivos de este trabajo de investigación.

Para la toma de muestras se tiene como referencia los lineamientos establecidos, por la norma técnica colombiana NTC – ISO 5667 – 1; NTC – ISO 5667 – 2; NTC – ISO 5667 – 3, las cuales establecen los principios generales que se deben aplicar en el diseño de programas de muestreo para los propósitos del control de la calidad, la caracterización de la calidad, y la identificación de las fuentes de contaminación del agua, incluyendo los sedimentos y lodos.

6.2.4 Preparación de las soluciones de coagulantes y ayudante de coagulación.

Para este procedimiento, inicialmente se tiene como referencia la información suministrada por el certificado de calidad del producto suministrado por el fabricante y de acuerdo con este, se preparan soluciones al 1% o 10.000 partes por millón (ppm), mediante la siguiente fórmula:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

En donde:

C_1 = Concentración inicial
 V_1 = Cantidad a tomar del producto

C_2 : Concentración final
 V_2 : Cantidad a preparar.

Para la adición de las dosis de coagulante para los ensayos de jarras, tanto en la fase pre-experimental como en la experimental, en la *Tabla 9* se establecen las cantidades que deben ser agregadas a partir de soluciones con concentración del 1%.

Tabla 9. Adición de dosis, según el estándar del ensayo.

Dosis	Cantidad	Dosis	Cantidad	Dosis	Cantidad
Ppm	mL	ppm	mL	ppm	mL
5	0,45	23	2,07	41	3,69
6	0,54	24	2,16	42	3,78
7	0,63	25	2,25	43	3,87
8	0,72	26	2,34	44	3,96
9	0,81	27	2,43	45	4,05
10	0,9	28	2,52	46	4,14
11	0,99	29	2,61	47	4,23
12	1,08	30	2,7	48	4,32
13	1,17	31	2,79	49	4,41
14	1,26	32	2,88	50	4,5
15	1,35	33	2,97	51	4,59
16	1,44	34	3,06	52	4,68
17	1,53	35	3,15	53	4,77
18	1,62	36	3,24	54	4,86
19	1,71	37	3,33	55	4,95
20	1,8	38	3,42	56	5,04
21	1,89	39	3,51	57	5,13
22	1,98	40	3,6	60	5,4

Fuente: Autores.

6.2.5 Ensayos de jarras

Para la realización de los ensayos de Jarras, se tiene como referente la Norma Técnica Colombiana – NTC 3903 de 1996, la cual establece un procedimiento general para la evaluación de un tratamiento encaminado a reducir el material disuelto, en suspensión, coloidal y no sedimentable del agua mediante coagulación-floculación química, seguida por sedimentación mediante la gravedad. La norma suministra una evaluación

sistemática de las variables que se encuentran normalmente en el proceso de coagulación - floculación y a través de esta, se establece el procedimiento general de la *Figura 15*, para la realización de los diferentes ensayos de jarras en las etapas pre-experimental y experimental, teniendo en cuenta las variaciones en el gradiente de velocidad en la primera etapa y en la segunda, estos valores serán fijos como resultado de la fase pre-experimental.

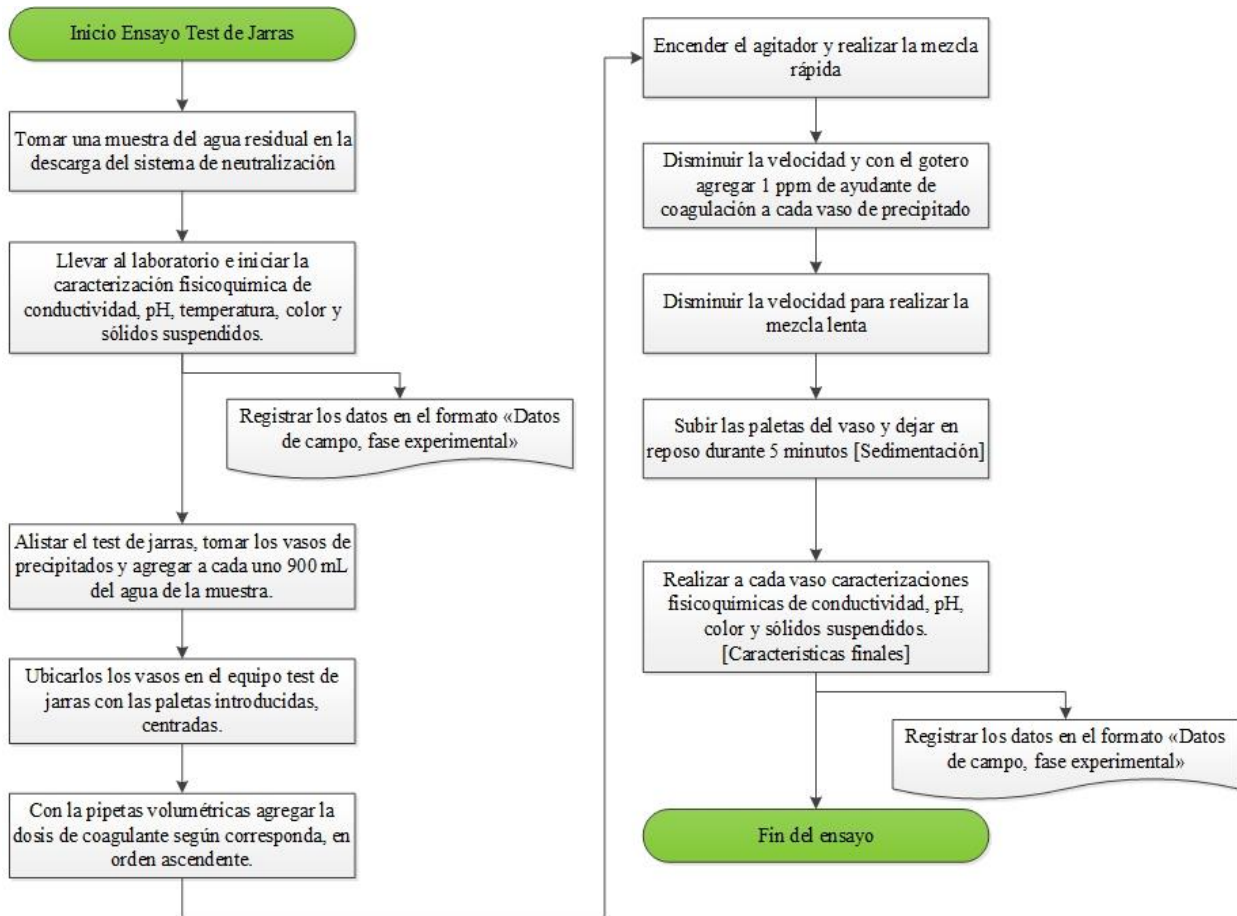


Figura 15. Procedimiento para la realización de los ensayos de jarras
Fuente: Autores.

6.2.6 Etapa pre-experimental

Esta etapa tiene como finalidad, elegir los dos coagulantes con mayores porcentajes de remoción de sólidos y volumen de lodo producido, según las variables definidas para este proyecto de investigación y la estandarización del gradiente de velocidad; para ello inicialmente se debe realizar una caracterización fisicoquímica preliminar de las aguas residuales, durante un periodo de dos meses, tomando aleatoriamente 20 muestras puntuales (una por día) de forma no consecutiva; además como la planta opera continuamente (teóricamente a la misma productividad) la hora del muestreo se elegirá al azar, en la mañana, tarde y noche;

con el objetivo de proporcionar las bases para probar diferentes gradientes de velocidad y dosis de coagulantes, de acuerdo a los lineamientos definidos en el marco teórico; además cada ensayo se debe replicar con cuatro tipos de coagulantes diferentes, empleando un mismo ayudante de coagulación, en donde el criterio de selección de estos, es que sean de bajo costo, con disponibilidad y accesibilidad para las industrias de la economía Colombiana.

6.2.6.1 *Gradiente de velocidad*

Para determinar los gradientes de velocidad, se toman como referencia la curva de calibración obtenida por Bhole (1970), la cual está calibrada para jarras cilíndricas de 1 litro y emplea las siguientes fórmulas:

$$G = 0,25 (r.p.m)^{1,25}$$

$$r.p.m = 3,0 G^{0,8}$$

Desde un punto de vista general, la suma de condiciones como el gradiente de velocidad, tipos de coagulantes y orden de adición, lo que se logra con esto, es determinar una dosis óptima de coagulantes; es por ello que durante cada ensayo se deben evaluar los resultados de seis jarras, es decir, seis dosis diferentes por cada tipo de coagulante, asignado un rango de dosificación en orden ascendente y en el caso de ser necesario de que la dosis óptima quede en los extremos, se deben ajustar más jarras por encima o por debajo.

6.2.6.2 *Análisis de resultados*

Para el análisis de los resultados de la fase pre-experimental, se hará uso de procedimientos estadísticos descriptivos, con el fin de ordenar, clasificar y presentar los resultados de una manera comprensible a través de cuadros estadísticos y diagramas gráficos elaborados, los cuales permiten comparar el tipo de coagulante, dosis, gradientes de velocidad con respecto a la eficiencia de remoción, para cada una de las variables definidas dentro del proyecto de investigación.

6.2.7 *Etapa Experimental*

La etapa experimental se desarrolla con dos tipos de coagulantes y un ayudante de coagulación, realizando muestreos durante 20 días no consecutivos, distribuidos aleatoriamente por un periodo de 60 días, en la mañana, tarde y noche, de este modo se cumple con los lineamientos establecidos por el RAS 2000, en cuanto a la reproducibilidad de los ensayos de jarras para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas.

6.2.7.1 Análisis de resultados

Para el análisis los resultados de las variables obtenidas en la fase experimental, se emplearán los métodos lineales generalizados que según afirma IBM (s.f.), “un modelo lineal generalizado amplía el modelo lineal general, de manera que la variable dependiente está relacionada linealmente con los factores y las covariables mediante una determinada función de enlace”. Este método surge por la necesidad de expresar en forma cuantitativa, relaciones entre un conjunto de variables, en la que una de ellas se denomina variable respuesta o variable dependiente Y y las restantes son llamadas covariables, variables explicativas, o variables independientes X , y los factores pueden ser: Cuantitativos o categóricos, cruzados o anidados y fijos o aleatorios. Los modelos lineales generalizados son, por tanto, una extensión de los modelos lineales que permiten utilizar distribuciones no normales de los errores (binomiales, Poisson, gama, etc.) y varianzas no constantes. En particular, permite modelar experimentos en presencia de observaciones correlacionadas (González & Karin, 2001).

Para ello se empleará el software STATGRAPHICS, el cual es una aplicación que combina más de 230 procedimientos analíticos, con gráficos interactivos, proporcionando un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada uno de las fases del proyecto; pero que para el caso específico se analizarán patrones o relaciones entre las variables y los tipos de coagulantes.

6.3 FASE III - RECOMENDACIÓN.

Para realizar esta fase, se realiza un comparativo entre los estándares de calidad de agua requeridas en cada subproceso, con los resultados y análisis de los ensayos de jarras, cruzándolos con los datos del balance hídrico, la legislación ambiental que aplica al proceso, los aspectos económicos, los beneficios ambientales y sociales, a fin de determinar la factibilidad de recuperación del agua en el proceso, buscando que su desarrollo esté en el marco de los pilares de la sustentabilidad; además con estándares de eficiencia, eficacia, flexibilidad y accesibilidad para el central termoeléctrica.

En la *Figura 16* se puede reconocer el procedimiento general que se empleará para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual resume los aspectos descritos anteriormente y permite obtener una visión íntegra de todo el diseño metodológico.

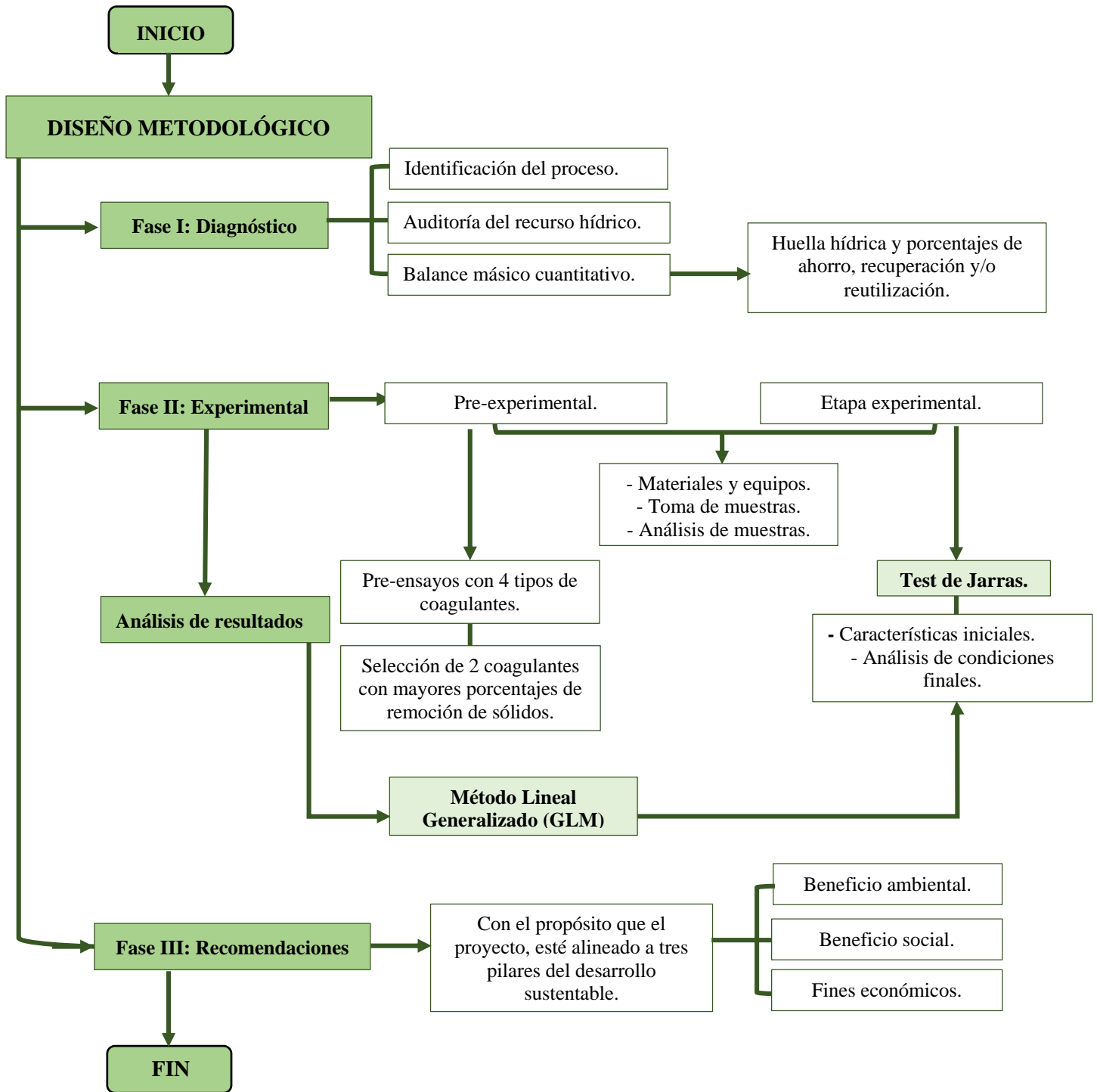


Figura 16. Diagrama de flujo, del proceso de investigación.
Fuente: Autores.

7. ANÁLISIS RESULTADOS

7.1 FASE I – DIAGNÓSTICO

7.1.1 Identificación del proceso.

Cuando se habla de una planta de generación de energía termoeléctrica a base de carbón, normalmente se pueden asociar tres subprocesos principales como lo es: La planta de tratamiento de aguas, el tren de generación de vapor y la casa de máquinas; es por ello que en la planta RíoClaro presenta estos subprocesos y se pueden reconocer a través de la *Figura 17* y la *Figura 18*.

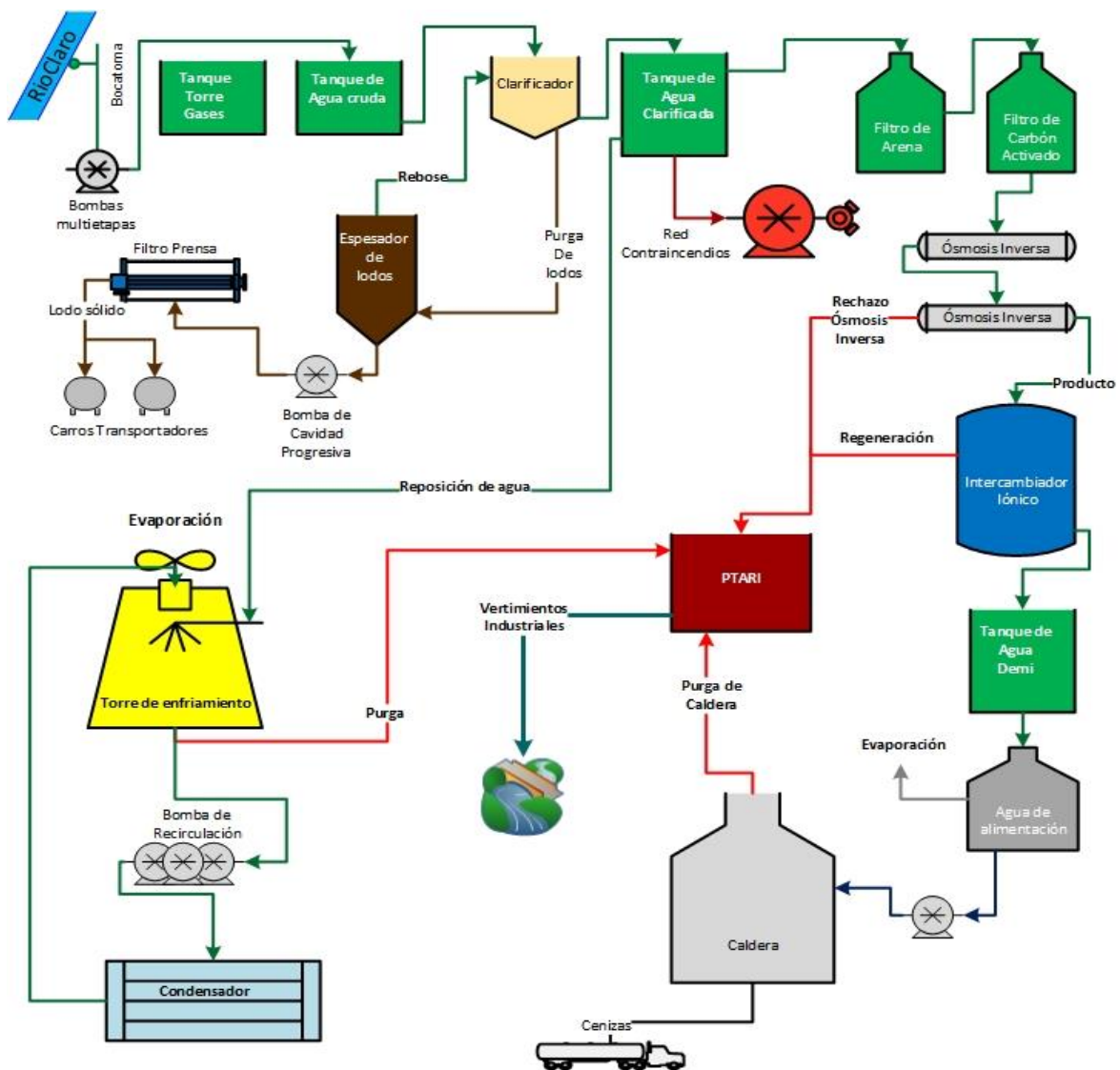


Figura 17. Diagrama de la planta de tratamiento de aguas, Cementos Argos S.A.
Fuente: Autores.

Como se puede evidenciar, la planta de tratamiento de aguas cuenta con una bocatoma, donde se capta el agua cruda del Río Claro, pasando por un desarenador hasta un pozo de bombeo, allí el agua es impulsada por una motobomba a través de 2500 metros hasta llegar a un tanque de almacenamiento; desde este punto y a través de un vaso comunicante ingresa el agua hasta el clarificador, proceso mediante el cual se modifican las características físicas con la adición de coagulantes y floculantes; posteriormente por decantación y desinfección se logra obtener un efluente clarificado, el cual es llevado hasta el tanque de almacenamiento.

Del tanque de agua clarificada se alimentan tres subprocesos que corresponden a una torre de enfriamiento, la red contraincendios y el tren de desmineralización, este último está conformado por un filtro de arena, un filtro de carbón, una unidad de micro filtración, osmosis inversa e intercambio iónico, punto en el cual el agua deberá cumplir con los estándares de calidad *véase Tabla 10*, para ser tomada como reposición para la caldera a través de dos bombas, las cuales se encargan de llevarla hasta el tanque de agua de alimentación de la caldera, pasando por un desaireador.

Sistema de enfriamiento: La planta cuenta con una torre de enfriamiento, que alimenta un condensador de superficie del ciclo de vapor para la generación de energía. El volumen del sistema es de 500 m³ que están constantemente recirculando hacia la torre, con un caudal de 3747 m³/h. La torre está diseñada con un delta de temperatura de 10 °C, lo cual implica una evaporación de 52,7 m³/h aproximadamente; unas pérdidas por ventisca de 1,83 m³/h. La purga recomendada para el sistema es de 9,5 m³/h, con lo cual la reposición de agua debe ser de 64 m³/h a máxima carga.

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar grandes volúmenes de agua, porque son el medio más económico para hacerlo comparado con otros equipos de enfriamiento, como los intercambiadores de calor, donde este ocurre a través del contacto con una pared. En el interior de las torres de enfriamiento, se encuentra un relleno con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que lo enfría “*el agua fluye en diferentes etapas en forma vertical*”.

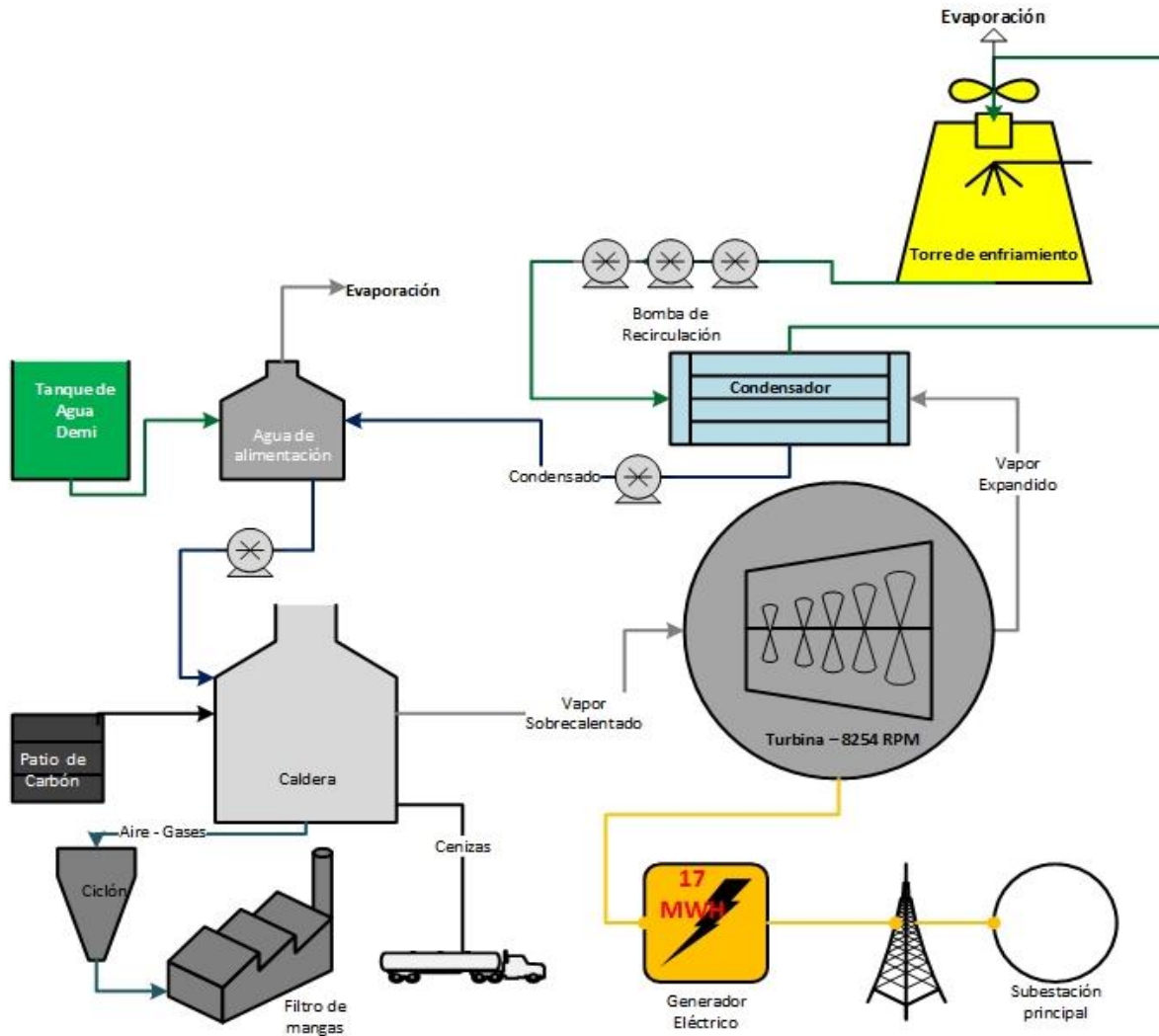


Figura 18. Esquema del proceso de generación de energía, tren de generación de vapor y turbogenerador.
Fuente: Autores.

El agua de alimentación de la caldera está constituida por la combinación de aguas desmineralizadas y condensadas, estos últimos representan el 90% de agua de alimentación aproximadamente, la cual es llevada hasta la caldera mediante una bomba de alimentación, pasando por el economizador e ingresa al domo.

La caldera emplea como combustible carbón, el cual contiene energía química almacenada en sus moléculas y al reaccionar estequiométricamente con el oxígeno, libera esa energía en forma de calor y se lo transfiere por radiación al agua que está contenida en interior de los tubos de la caldera, obteniéndose una energía térmica; posteriormente, esta energía contenida en el vapor, se transforma en trabajo mecánico en una turbina de vapor con la que se tiene otra transformación de energía; finalmente, la turbina está acoplada mecánicamente a un generador eléctrico, obteniéndose de esta manera energía eléctrica y posteriormente se distribuye a los puntos de consumo (Uribe, y otros, 2006).

7.1.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas, requeridas en el proceso de generación de energía termoeléctrica.

Con el fin de identificar la calidad del agua requerida en cada uno de los procesos, que hacen parte del proceso de generación de energía en la termoeléctrica, en la *Tabla 10* se presentan los estándares de los diferentes parámetros fisicoquímicos, definidos por los fabricantes de los equipos y el sistema de control de calidad químico de la planta, cuyo fin es el de preservar la vida útil y mantener la eficiencia del proceso.

Tabla 10. Estándares de los parámetros fisicoquímicos de agua en el ciclo de generación de energía.

MATERIAL	PARAMETRO		ESPECIFICACION
Taque de agua cruda	Turbidez	NTU	2-100
	pH	Un. pH	<8,5
	Cloruros	mg Cl-/L	4,2 – 23
	Conductividad	us/cm	< 210
	Dureza ca	mg CaCO ₃ /L	5,5 - 17
	Dureza mg	mg MnCO ₃ /L	11,4 - 28,0
	Aceites	ppm	<5
	Dbo5	mg DBO ₅ /L	N. E
	DQO	mgO ₂ /L	18-25
	SST	mg/L	< 150
	Alcalinidad Total	mg/L	9-30
	Hierro	mg/L	2,36 - 5,1
	Temperatura	°C	25-30
	Color	UPC	No especifica (N.E)
	Sodio	mgNa/L	0-30
	Sílice	mg SiO ₂ /L	0-15
SDT	mg/L	0-450	
Sulfatos	mg/L	16,4 - 24	
Tanque de agua desmineralizada	pH	Un. pH	9 - 9,5
	Conductividad	µs/cm	< 5
	Hierro	ppb	< 5
	Ca Dureza	ppb	< 0,01
	Sílice	ppb	< 20
Taque de agua clarificada	Turbidez	NTU	<5
	pH	Un. pH	6,5-8,0
	Cloruros	mg Cl-/L	<50
	Conductividad	us/cm	<90
	Dureza ca	mg CaCO ₃ /L	0-220
	Dureza mg	mg MnCO ₃ /L	<110
	Aceites	ppm	<0,5

MATERIAL	PARAMETRO		ESPECIFICACION
	DbO5	mg DBO ₅ /L	<70
	DQO	mgO ₂ /L	<130
	SST	mg/L	10-20
	Alcalinidad Total	mg/L	<130
	Hierro	mg/L	0,3
	Temperatura	°C	25-30
	Color	UPC	<30
	Sodio	mgNa/L	<40
	Sílice	mg SiO ₂ /L	0-15
	SDT	mg/L	0-450
	Sulfatos	mg/L	<200
	COT	mg COT/L	<10
	CIT	mg CIT/L	<2
Sistema de extracción de ceniza gruesa - banda húmeda	pH	Un. pH	6,0 - 9,0
	Solidos suspendidos	mg/L	Sin presencia

Fuente: ENDOSPINA S.A., 2008

7.1.3 Características fisicoquímicas históricas del agua en el tanque de clarificada.

Una vez el agua pasa por el proceso de clarificación, llega al tanque de almacenamiento como se mencionó anteriormente, con la finalidad de analizar posteriormente la factibilidad de reuso o recirculación, en la *Tabla 11* se presenta la media, el máximo y mínimo del periodo comprendido entre (Diciembre de 2014 a Mayo de 2015) y se analizaron las variables de pH, conductividad, color, sólidos suspendidos y de acuerdo a esto, es posible establecer que esta es un agua en este punto del proceso mantiene un pH neutro, con bajo contenido de sólidos suspendidos y color.

Tabla 11. Variables reportadas a en tanque de agua clarificada

Proceso	Medida de tendencia central	pH	Conductividad	Sólidos suspendidos	Color
		Un pH	µs/cm	mg/L	UPC
Tanque de agua clarificada	Media	6,8	70	5	10
	Máximo	10,60	75	10	24
	Mínimo	7,71	63	1	5
	Datos analizados	72	72	72	72

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

7.1.4 Balance másico cuantitativo del recurso hídrico, en el proceso de generación de energía.

En la *Figura 20* se presenta de una manera general, los diferentes procesos que componen el ciclo de generación de energía en la planta RíoClaro, el cual es un complemento al punto anterior y se centra en los afluentes y efluentes (entradas y salidas) de cada uno de los procesos que hacen uso del recurso hídrico, dado que la finalidad de este trabajo de investigación, se centra en evaluar la remoción de sólidos en las aguas residuales industriales, mediante técnicas de coagulación, floculación y sedimentación, con el fin de proyectar alternativas de reutilización en el proceso y disminuir la huella hídrica.

Para la realización de este balance hídrico, se tomaron los datos de los registros históricos que la planta dispone y el cual es un requisito que debe cumplir, como reporte a la Corporación Autónoma Regional competente, de dichos consumos y de igual manera, es un elemento que hace parte de los estándares de gestión ambiental interna del proceso; para este balance se tomaron datos de seis meses (Diciembre de 2014 a Mayo de 2015) y los resultados a nivel general se presentan en la *Tabla 12*, así mismo, en la *Figura 19* se puede observar los porcentajes de consumo, que cada proceso representa en el indicador general; en donde la evaporación en la torre de enfriamiento, purga del sistema de enfriamiento, evaporación durante la desaireación y el consumo por la red contra incendio, representan los mayores consumos respectivamente y el menor consumo se da por la purga de caldera.

Tabla 12. Balance másico cuantitativo, del recurso hídrico en el proceso de generación de energía.

ENTRADA			ACTIVIDAD	SALIDAS		
Proceso	m ³ /mes	L/s		Proceso	m ³ /mes	L/s.
Captación	38.129	15	Generación de energía eléctrica	Evaporación torre de enfriamiento	31.670	12,218
				Purga torre de enfriamiento	2.384	0,920
				Evaporación desaireador	1.133	0,437
				Purga caldera	469	0,181
				Rechazo ósmosis inversa	1.408	0,543
				Red contra incendio	1.065	0,411

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

Porcentaje de consumo de agua por proceso, en la termoeléctrica de RíoClaro

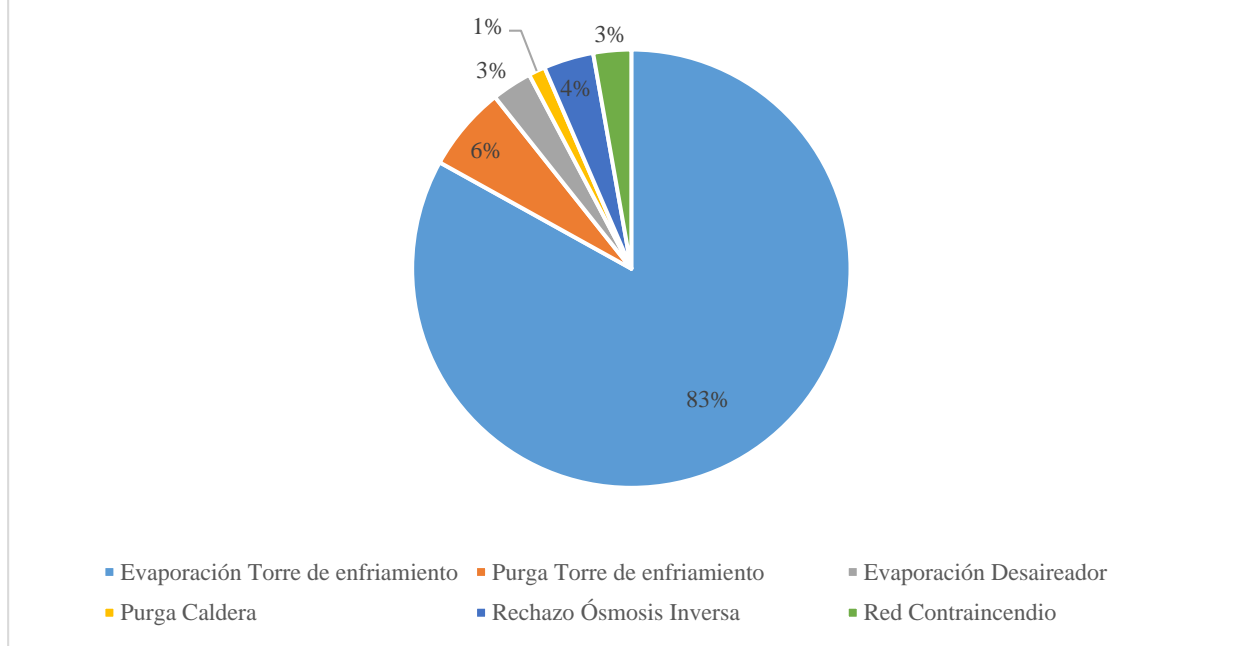


Figura 19. Porcentajes de consumo de agua por proceso, en la central termoeléctrica.

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo anteriormente planteado y como finalidad de este trabajo de investigación, se toma como punto de partida las aguas residuales. En la *Tabla 13* se presentan los afluentes y efluentes volumétricos que componen dichas aguas, así mismo, a través de *Figura 21* la se pueden analizar los porcentajes de composición que cada efluente sobre el total de los vertimientos, en donde el mayor porcentaje corresponde a la purga de la torre de enfriamiento con el 56%, en segundo lugar se encuentran los efluentes de la ósmosis inversa y regeneración del lecho mixto, finalmente con el 33% se encuentra la purga de la caldera.

Tabla 13. Balance másico cuantitativo de los vertimientos industriales, termoeléctrica de RíoClaro.

ENTRADA			ACTIVIDAD	SALIDAS		
Proceso	m ³ /mes	L/s.		Proceso	m ³ /mes	L/s.
Purga torre de enfriamiento	2.384	0,920	Generación de energía	Vertimientos industriales	4.261	1,644
Purga caldera	469	0,181				
Rechazo ósmosis inversa y Regeneración de lecho mixto	1.408	0,543				

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

Balance másico cuantitativo porcentual, de los afluentes de los vertimientos industriales de la central termoeléctrica de RíoClaro.

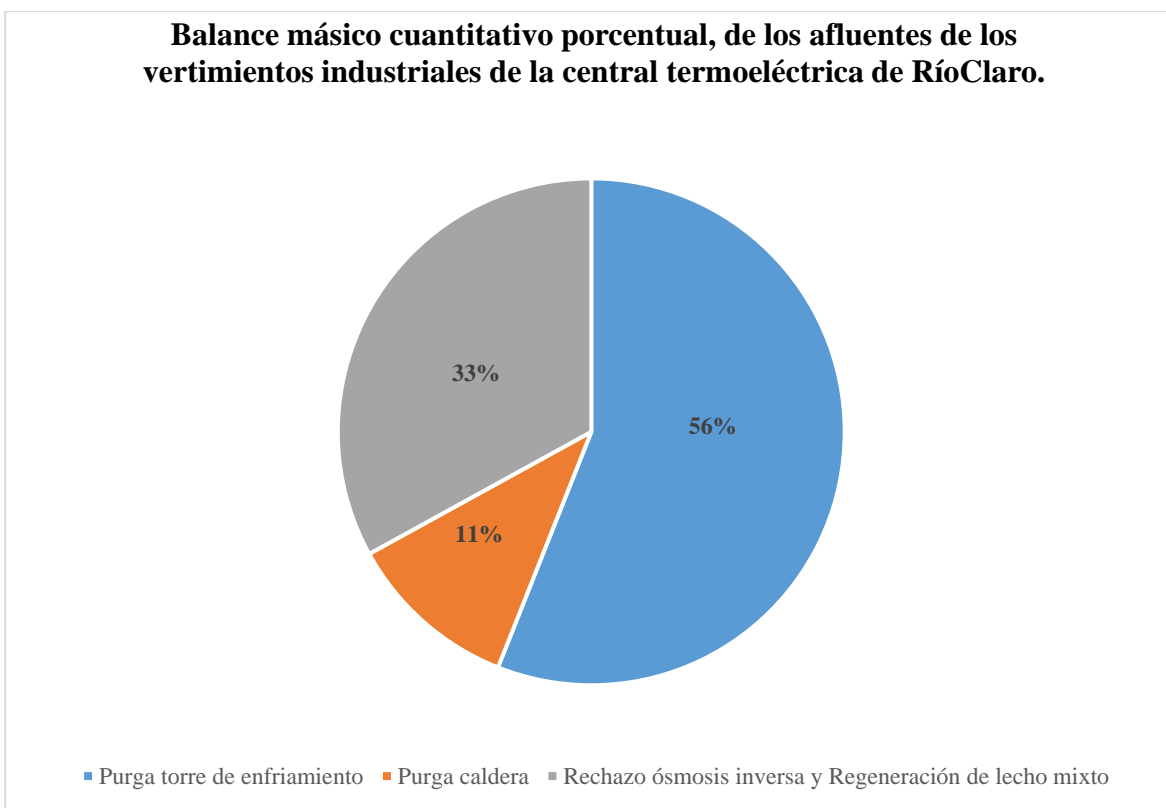


Figura 21. Balance másico cuantitativo porcentual de los afluentes de los vertimientos.

Fuente: Autores.

7.1.5 Características fisicoquímicas de los efluentes que componen las aguas residuales industriales de la central térmica.

Una vez identificados y cuantificados los afluentes que componen los vertimientos industriales de la termoeléctrica de RíoClaro, se consultaron los datos históricos del registro de control de calidad que el proceso realiza, a fin de establecer las características de cada uno de estos, ya que condicionan directamente las características fisicoquímicas del efluente y son el punto de partida en el desarrollo de la etapa pre-experimental.

Los parámetros analizados, corresponden a datos reportados por el área de control de calidad del ciclo agua vapor, entre Diciembre de 2014 y Mayo de 2015; para la torre de enfriamiento se tomaron las variables de pH, conductividad, ortofosfatos, temperatura, turbiedad, hierro y solidos suspendidos. Para cada uno de estos se hallaron las medias aritméticas y los resultados se presentan en la *Tabla 14*; el cual permite establecer que el agua de la purga de la torre de enfriamiento, presenta una temperatura promedio de 31,5°C, un pH de 8,44, es decir, es una agua con tendencia a ser básica, con un contenido considerable de solidos disueltos, medidos indirectamente por la conductividad, baja turbiedad y alto contenido de solidos suspendidos, lo cual interfiere también en los contenidos de color.

Tabla 14. Variables reportadas para la torre de enfriamiento.

Proceso	Medida de tendencia central	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	S.S*	Hierro	Turbiedad
		°C	Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	NTU
Torre de enfriamiento	Media	31,55	8,44	661,80	2,70	31,34	0,21	6,96
	Máximo	36,78	9,40	968,00	20,60	50,00	0,44	12,50
	Mínimo	23,23	7,37	446,00	1,35	16,00	0,05	4,21
	Datos analizados	4309	4355	4356	36	47	18	4279

*Sólidos suspendidos

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

En el caso de la ósmosis inversa, se tomaron los datos históricos de seis meses (Mayo 2014 a Mayo 2015), y se halló la media en conjunto con los valores máximos y mínimos, que este presenta referente a la variable de conductividad, es por ello que a través de la *Tabla 15* se puede observar que oscila en un valor de ± 160 µs/cm.

Tabla 15. Variables reportadas para rechazo de ósmosis inversa.

Proceso	Medida de tendencia central	Conductividad de rechazo
		µs/cm
Rechazo de ósmosis inversa	Media	160
	Máximo	165
	Mínimo	155
	Datos analizados	23

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

El otro efluente que compone las aguas residuales, es la purga de la caldera para el cual se tomó la misma muestra de datos (Diciembre 2014 a Mayo de 2015) y se analizaron las variables de pH, conductividad, ortofosfatos, hierro y sílice, las cuales se presentan en la *Tabla 16* y de acuerdo a esto, es posible establecer que esta es un agua básica, determinada por la media del pH, con bajo contenido de sólidos disueltos a lo igual que el hierro y el fosfato, pero a diferencia de la sílice que se encuentra a altas concentraciones, pero para efectos del desarrollo experimental y de acuerdo a los referentes teóricos, esta variable no presentan interferencia considerable.

Tabla 16. Variables reportadas para purga de caldera.

Proceso	Medida de tendencia central	pH	Conductividad	Fosfatos	Hierro	Sílice
		Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L
Purga de caldera	Media	9,21	49,31	4,77	0,02	3,88
	Máximo	10,60	112,00	14,10	0,06	11,20
	Mínimo	7,71	22,90	1,93	0,00	1,30
	Datos analizados	46	48	43	26	44

Fuente: Autores, basados en datos históricos de la termoeléctrica.

7.1.6 Huella hídrica.

Este es un elemento de análisis que se consideró dentro de las finalidades propuestas en este trabajo de investigación, es por ello que se tomaron los datos históricos del proceso referente al indicador de huella hídrica, en donde se relaciona el consumo de agua dulce (litros), por la cantidad de energía eléctrica generada (kW/H), para ello se puede observar la *Figura 22* que contiene este indicador para los años los 2011, 2012, 2013 y 2014; y en la *Figura 23* se encuentran los indicadores mensuales del primer semestre del año 2015, en donde se muestra una tendencia inicial de disminución, pero en el último año y medio se ha tenido una aumento, en el consumo de este recurso por kilovatio generado.

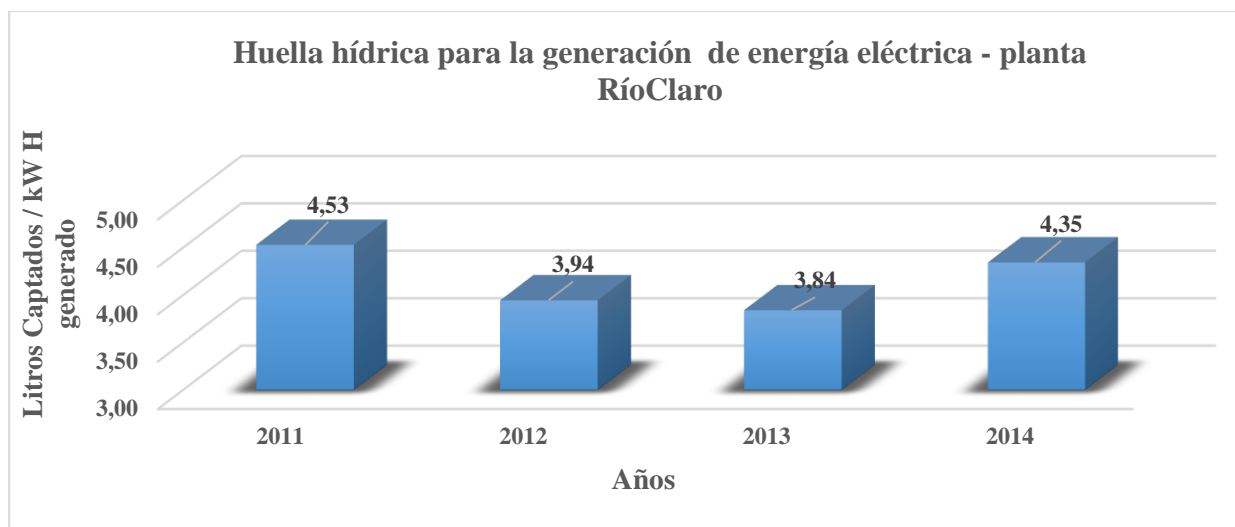


Figura 22. Registro histórico de huella hídrica, para la generación de energía eléctrica de RíoClaro.

Fuente: Autores.

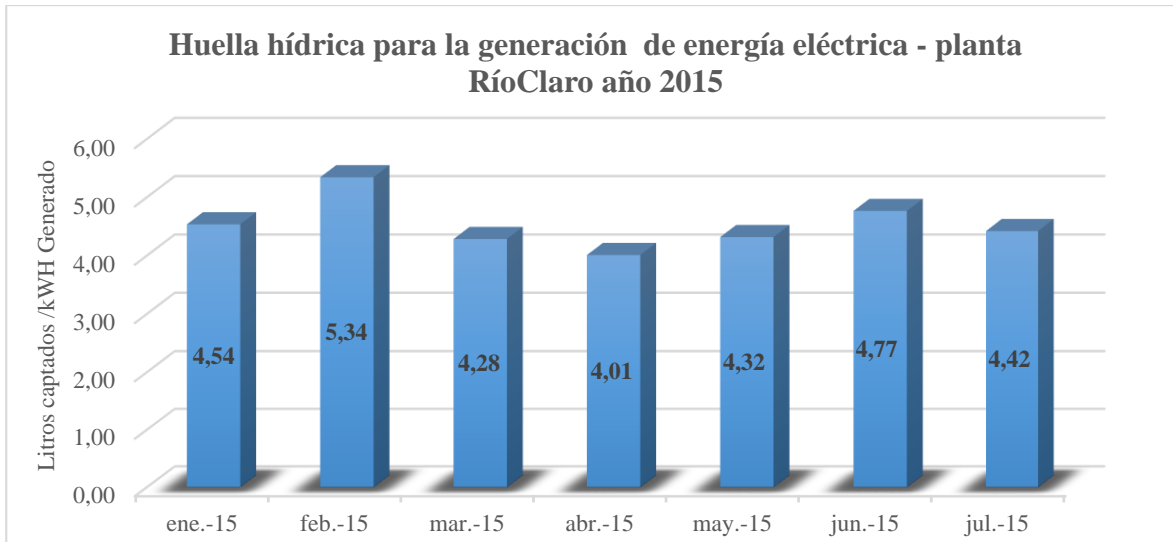


Figura 23. Registro del año 2015 de huella hídrica, para la generación de energía eléctrica de RíoClaro.

Fuente: Autores.

7.2 FASE EXPERIMENTAL

7.2.1 Etapa Pre-experimental

La caracterización fisicoquímica, para cada una de las variables definidas en la metodología para las aguas residuales, se realizó durante el mes de Mayo de 2015, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en la fase del diagnóstico, referente a la calidad de cada uno de los afluentes y las características resultantes, una vez son homogenizadas por el sistema de neutralización y que de este modo constituyen los vertimientos industriales de la central termoeléctrica; para ello se tomaron 16 muestras cuyos resultados se encuentran en la *Tabla 17* con los valores máximos y mínimos, así mismo como la media aritmética; permitiendo establecer que estas, son aguas residuales básicas, con alto contenido de color, sólidos suspendidos y sólidos disueltos; con una temperatura promedio de 35,9 °C.

Es importante considerar que dentro de estos muestreos se realizó un registro de observaciones, referente a las condiciones que tuvieron repercusiones significativas, en la variación de los valores de los parámetros por fuera de la tendencia; es por ello que el valor de 3020 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para la conductividad, correspondió a un día en el que se había realizado regeneración del lecho mixto, el cual se desarrolla un día por cada 15 días; los demás aspectos registrados corresponden a condiciones meteorológicas, en donde se presentaron días lluviosos, de verano y una carga estable de generación de energía.

Tabla 17. Ensayos preliminares de tratabilidad de las aguas residuales industriales.

Proceso	Medida de tendencia central	Conductividad	Temperatura	Sólidos Suspendidos	Color	pH
		μs/cm	°C	mg/L	PtCo	Un pH
Sistema de neutralización	Media	926,88	33,19	26	141	8,82
	Máximo	3020	35,9	41	218	10,03
	Mínimo	567	28	12	65	8,33
	Datos analizados	16	16	16	16	16

Fuente: Autores.

Los ensayos preliminares de jarras, se desarrollaron durante el mes de junio de 2015, en donde los coagulantes que se probaron fueron el Sulfato de Aluminio tipo B líquido, el Policloruro de Aluminio – PAC, NALCO 8557, NALCO 8187 a una concentración del 1%, según lo establecido en el diseño metodológico; además como ayudante de coagulación se utilizó el polímero floculante aniónico NALCLEAR 8173¹; con cada uno de los coagulantes se realizaron cinco ensayos, por cada gradiente de velocidad.

El gradiente de velocidad uno se presenta en la *Tabla 18*, el cual se desarrolló de la siguiente manera: Durante los primeros 60 segundos se realiza la mezcla rápida a 120 RPM, después de este tiempo se bajan las revoluciones a 100 RPM y se procede a adicionar 1 ppm de polímero aniónico, empleando el menor tiempo posible (10 segundos por cada jarra aproximadamente); cada 15 segundos se disminuyen 20 RPM hasta llegar a 40 RPM, siendo esta la velocidad establecida para la mezcla lenta y se deja hasta completar un periodo 10 minutos.

Tabla 18. Gradiente de velocidad número uno.

RPM	Tiempo [min]	Temperatura °C	Valor de G, s ⁻¹
120	00:00	30	99
100	01:00	30	79
80	01:30	30	60
60	01:45	30	41
30	02:00	30	17
30	10:00	30	17

Fuente: Autores.

¹ NALCLEAR 8173: Copolímero de poliacrilamida aniónico de alto peso molecular

El gradiente de velocidad dos se presenta en la *Tabla 19*, el cual se desarrolló de la siguiente manera: Durante los primeros 60 segundos se realiza la mezcla rápida a 270 RPM, después de este tiempo se bajan las revoluciones a 200 RPM y se procede a adicionar 1 ppm de polímero aniónico, empleando el menor tiempo posible (10 segundos por cada jarra aproximadamente); cada 15 segundos se disminuyen 50 RPM hasta llegar a 40 RPM, siendo esta la velocidad establecida para la mezcla lenta y se deja hasta completar un periodo 10 minutos.

Tabla 19. Gradiente de velocidad número dos.

RPM	Tiempo [min]	Temperatura °C	Valor de G, s ⁻¹
270	00:00	30	273
200	01:00	30	188
150	01:30	30	131
100	01:45	30	79
40	02:00	30	25
40	10:00	30	25

Fuente: Autores.

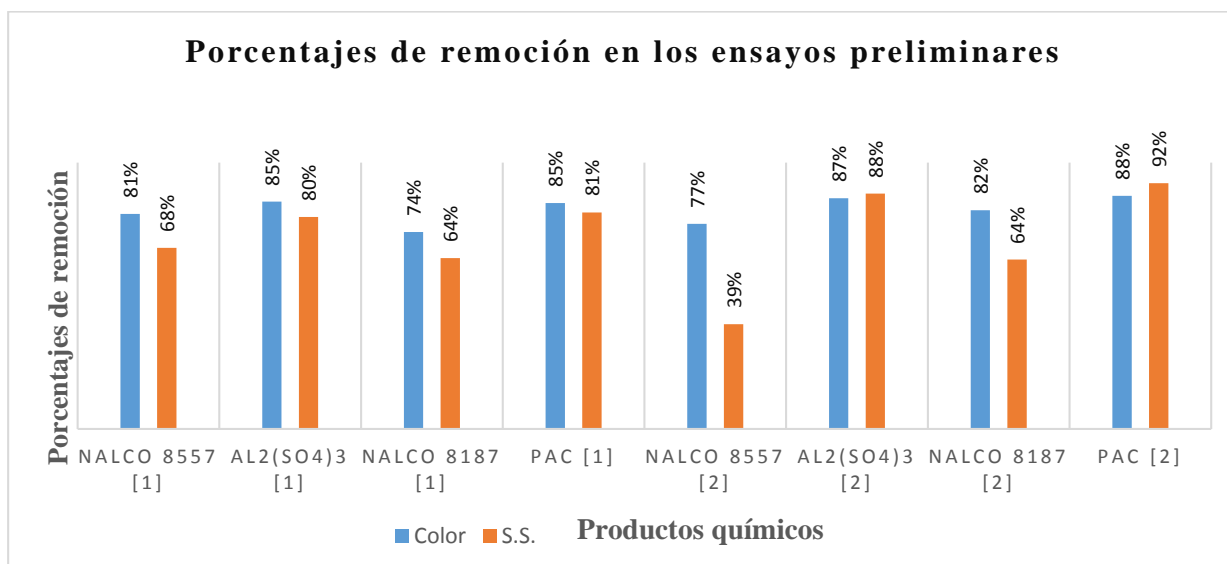
Finalmente se tomaron los resultados de las dosis óptimas de cada ensayo, se calcularon los porcentajes de remoción y secuencialmente la media aritmética para cada variable por tipo de coagulante; los cuales se presentan en la *Figura 25* y a través de estos, es posible establecer que los mejores porcentajes de remoción para la variable del color son del 88% con el PAC y del 87% con el sulfato de aluminio; ambos con el gradiente de velocidad dos, posteriormente se pueden evidenciar que con el 85% de remoción se encuentran los mismos productos, pero con el gradiente de velocidad uno.

Por otro lado referente a la variable de los sólidos suspendidos, el mayor porcentaje de remoción es realizado por el PAC con un promedio de 92% y con el 88% se encuentra el sulfato de aluminio, ambos con el gradiente de velocidad dos, posteriormente se pueden evidenciar que con el 81% y 80% los mismos productos, en su respectivo orden corresponden al gradiente de velocidad uno.

Con respecto a los productos NALCO 8557 y NALCO 8187 es posible establecer que se logran altos porcentajes de remoción, pero no son superiores a los que se obtuvieron con el sulfato de aluminio y el PAC.



Figura 24. Sistema de neutralización, Central termoeléctrica de RíoClaro; Julio 20 de 2015.
Fuente: Autores.



[1] = Gradiente de velocidad 1. [2] = Gradiente de velocidad 2.

Figura 25. Porcentajes de remoción de color y solidos suspendidos en los ensayos preliminares para cada gradiente.

Fuente: Autores.

En la *Figura 26* se presentan las dosis óptimas por tipo de coagulante, para cada uno de los ensayos realizados con el gradiente de velocidad uno y en la *Figura 27* se pueden observar, las dosis optimas por tipo de coagulante, para cada uno de los ensayos realizados con el gradiente de velocidad dos.

Para cada gradiente se realizaron cinco ensayos, es decir, cinco muestreos bajo los lineamientos establecidos en el diseño metodológico (aleatorios, en días no consecutivos, en un horario al azar) con la finalidad de tener la reproducibilidad y poder observar las líneas de tendencia, de las dosis óptimas con cada producto químico, estando las menores dosis para el PAC (línea amarilla) y Sulfato de Aluminio (línea naranja); las dosis más altas tienen tendencia a darse con los productos NALCO 8557 Y NALCO 8187; esto se presentó con los dos gradientes de velocidad.

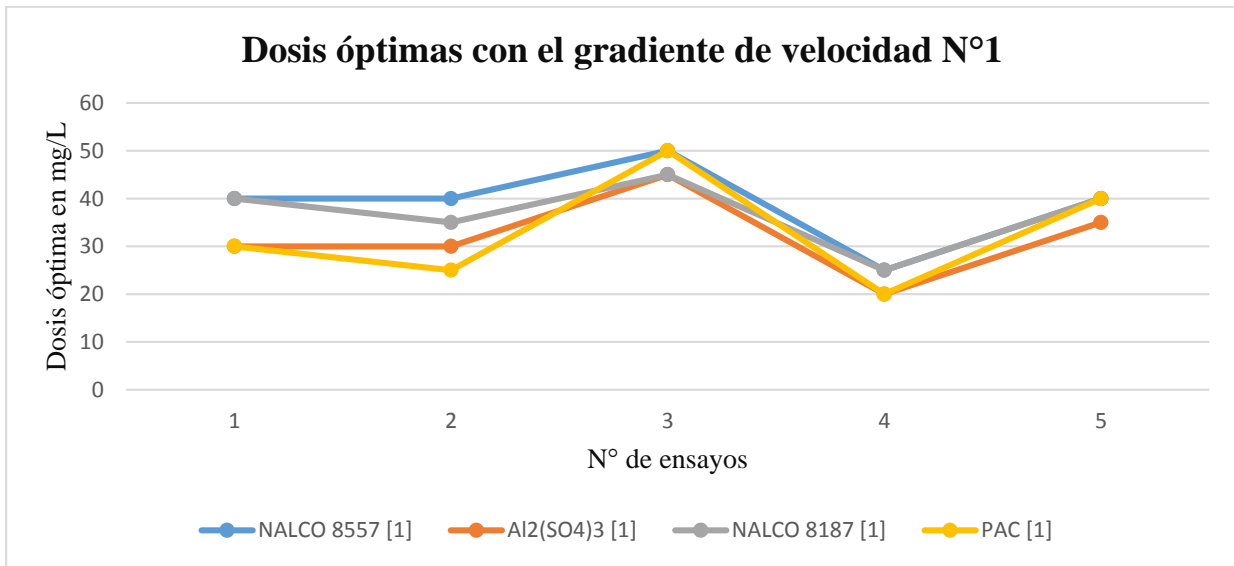


Figura 26. Dosis óptimas en los ensayos preliminares con el gradiente de velocidad 1.
Fuente: Autores.

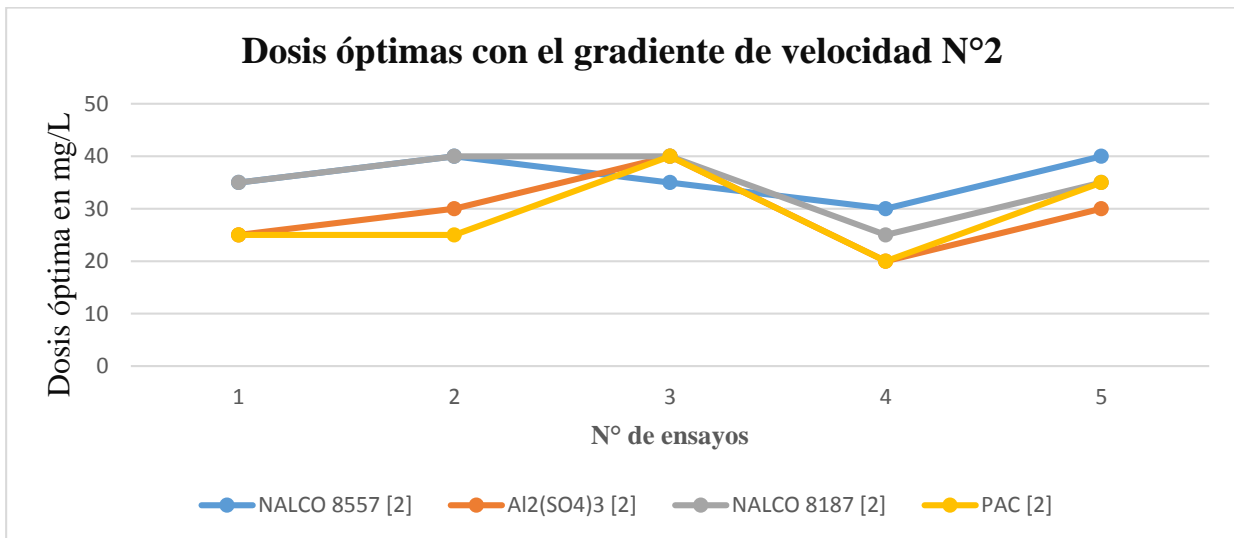


Figura 27. Dosis óptimas en los ensayos preliminares con el gradiente de velocidad 2.
Fuente: Autores.

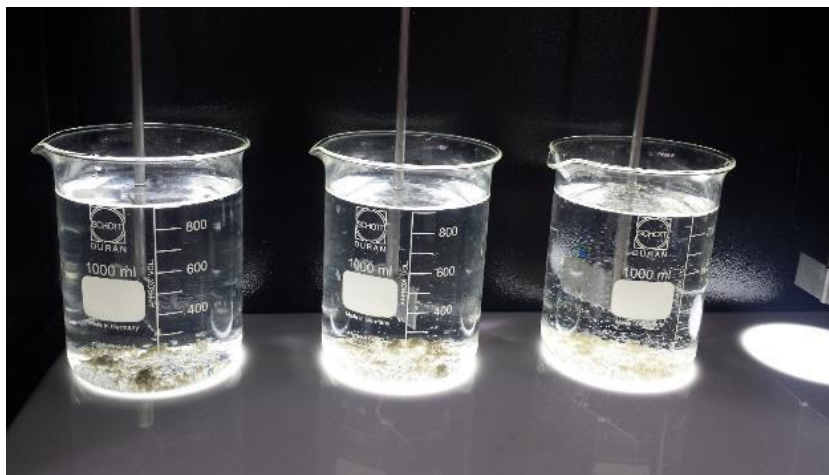


Figura 28. Ensayos de jarra preliminares; mayo 25 de 2015.
Fuente: Autores.



Figura 29. Ensayos preliminares de jarras; junio 07 de 2015.
Fuente: Autores.

Siguiendo el diseño metodológico para el desarrollo de esta fase y de acuerdo a los resultados anteriores; los productos químicos empleados para el desarrollo de la etapa experimental, son el Policloruro de aluminio – PAC y el Sulfato de Aluminio Tipo B Líquido, con el gradiente de velocidad dos, el cual se presenta a través de la *Tabla 19* contemplando las revoluciones por minuto y el tiempo.

El comportamiento de los gradientes de velocidad, se presentó acorde a lo que plantea Vargas (2004), “*cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas*” teniendo en cuenta que fue mayor, en la mezcla rápida del gradiente número dos en relación con la mezcla rápida del gradiente uno, secuencialmente se disminuye rápidamente la velocidad (gradiente) para ambos

de una forma proporcional, terminando con la misma intensidad; razón por la cual el gradiente dos, presentó una mayor eficiencia de remoción de sólidos y mejor calidad de floc, en relación con las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la central térmica.

7.2.2 Etapa experimental

En la etapa experimental se realizaron 20 ensayos según el diseño metodológico y fueron distribuidos de la siguiente manera: 5 ensayos, con una dosificación consecutiva de 5 en 5 ppm; 5 ensayos, con una dosificación consecutiva de 6 en 6 ppm; 5 ensayos, con una dosificación consecutiva de 7 en 7 ppm; 5 ensayos, con una dosificación consecutiva de 10 en 10 ppm; para un total de 20 muestras y 40 ensayos por los dos tipos de coagulante empleados, los cuales se desarrollaron bajo el siguiente procedimiento:

Como el sistema de vertimiento opera intermitente, la condición de tiempo mínimo en operación del sistema de neutralización, para la toma de las muestras es de 30 minutos, garantizando de esta manera el criterio de representatividad. El punto de muestreo corresponde a la descarga del sistema de bombeo, véase *Figura 30*.

Durante 60 segundos se realiza la mezcla rápida a 270 RPM, después de este tiempo se bajan las revoluciones a 200 RPM y se procede a adicionar 1 ppm de polímero aniónico, empleando el menor tiempo posible (10 segundos por cada jarra aproximadamente); cada 15 segundos se disminuyen 50 RPM hasta llegar a 40 RPM, siendo esta la velocidad establecida para la mezcla lenta y se deja hasta completar un periodo 10 minutos.

Una vez finalizada la agitación lenta, se retiran las paletas, se deja en reposo por un periodo de 5 minutos y posteriormente se realiza la medición de cada una de las variables.



Figura 30. Punto de muestreo para la realización de los ensayos de Jarras.

Fuente: Autores.

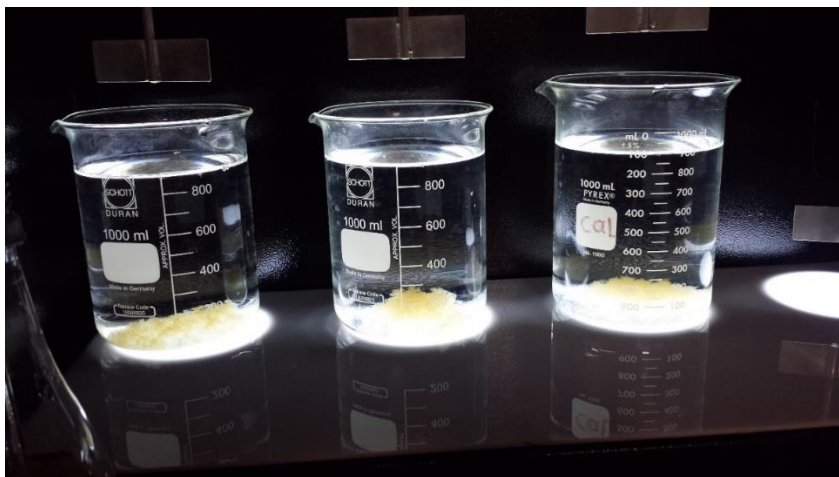


Figura 31. Ensayo de jarras con policloruro de aluminio; agosto 27 de 2015.

Fuente: Autores.

Una vez se realizaron los 40 ensayos, se hallaron los porcentajes de remoción por cada variable y tipo de coagulante; los cuales se presentan en la hoja de cálculo del ANEXO A, allí se pueden observar las dosis óptimas con sus respectivas características iniciales y finales; siendo estos los datos que se correlacionan a través del software STATGRAPHICS Centurion, mediante este se analizan los patrones o relaciones entre las variables y los tipos de coagulantes, en donde se obtuvo lo siguiente:

7.2.2.1 Relación ΔpH vs coagulante.

De acuerdo al Método Lineal Generalizado, se relaciona la variable de ΔpH , entre el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC). La Figura 32, resume los resultados del modelo estadístico lineal general, que relaciona ΔpH con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P (véase Tabla 20), para ΔpH es menor que 0,05, hay una relación estadísticamente significativa entre ΔpH y las variables predictorias <con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 20. Análisis de varianza para ΔpH

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,0828361	2	0,0414181	34,55	0,0000
Residuo	0,0443614	37	0,00119896		
Total (Corr.)	0,127198	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

La segunda tabla ANOVA, para el valor-P más alto es 0,1395 (véase *Tabla 21*), que corresponde a B. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 65,124% de la variabilidad en ΔpH . El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 63,2388%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0346259. El error medio absoluto (MAE) de 0,0236734 es el valor promedio de los residuos.

Tabla 21. Suma de cuadrados tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Coagulante	0,0827793	1	0,0827793	69,04	0,0000
DOSIS OPTIMA	0,00273364	1	0,00273364	2,28	0,1395
Residuo	0,0443614	37	0,00119896		
Total (corregido)	0,127198	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

Esta figura, dibuja un segmento cuyos extremos son los valores mínimo y máximo de la variable en la muestra dada. El punto dibujado al interior de éstos, representa el valor medio. Para calcular la relación entre variables se tiene en cuenta:

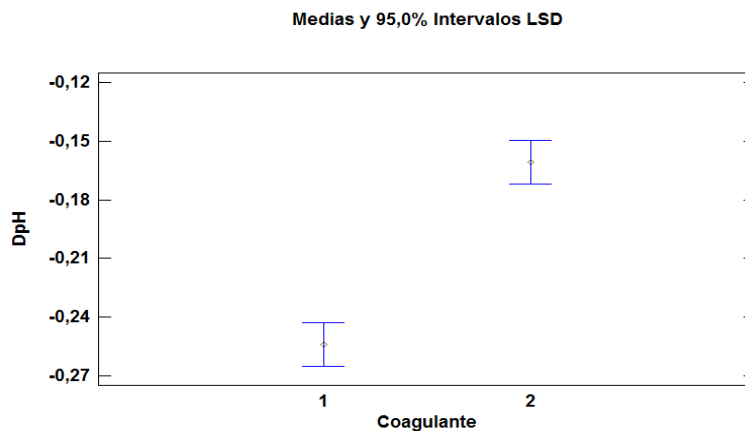
Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 1

A=Coagulante

Número de factores cuantitativos: 0

B= DOSIS OPTIMA



Coagulante 1, sulfato de aluminio Tipo B. Coagulante 2, Policloruro de aluminio (PAC).

Figura 32. Relación ΔpH vs Coagulante.

Fuente: Autores.

Se obtiene las medias de factores cuantitativos para los 2 coagulantes, con intervalos de confianza del 95%. El pH inicial en el sistema de neutralización varía en 8,82. De acuerdo al rango de pH obtenido experimentalmente, se demuestra que se obtuvo un rendimiento del 26% con el sulfato de aluminio, pero esto se debe, a que el sulfato consume la alcalinidad, al tener un rango de trabajo de pH muy limitado; luego el PAC retiene un 16%, debido a que el aluminio residual en el agua tratada, se reduce con respecto al agua cruda, es decir, que este coagulante causa una menor turbiedad en suspensión (menor dependencia de pH y temperatura); esto representa una capacidad comparativa, puesto que su dosificación dependerá de las características de los coloides y normalmente, no requiere un ajuste del pH y otra de sus ventajas, es que tiene una velocidad de reacción muy alta.

Por lo regular, habrá un intervalo de pH en el que un reactivo, se desempeñará mejor y que concuerda con el mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado.

7.2.2.2 *Relación Δ Sólidos suspendidos vs coagulante.*

De acuerdo al Método Lineal Generalizado, se relaciona la variable de Δ SS, entre el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC). La *Figura 33*, resume los resultados del modelo estadístico lineal general. Dado que el valor-P (véase *Tabla 22*), para Δ SS es mayor o igual que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre Δ SS y el tipo de coagulante con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 22. Análisis de varianza para Δ Sólidos Suspendidos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,00334935	3	0,00111645	1,58	0,2107
Residuo	0,0254106	36	0,000705851		
Total (Corr.)	0,02876	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

La segunda tabla ANOVA para Δ SS (véase *Tabla 23*), prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,9979, que corresponde a B. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 11,6459% de la variabilidad en DSS. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 4,28302%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0265679. El error medio absoluto (MAE) de 0,0231245 es el valor promedio de los residuos.

Tabla 23. Suma de cuadrados tipo III.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Coagulante	0,000150764	1	0,000150764	0,21	0,6467
DOSIS OPTIMA	0,000109279	1	0,000109279	0,15	0,6963
Residuo	0,0254106	36	0,000705851		
Total (corregido)	0,02876	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

Para calcular la relación entre variables se tiene en cuenta:

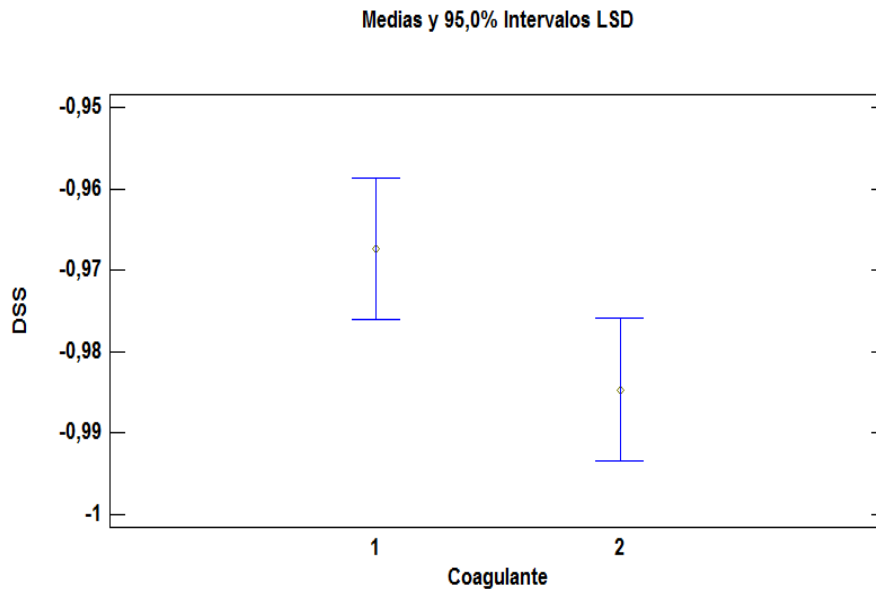
Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 1

Factor categórico A =Coagulante

Número de factores cuantitativos: 1

B= DOSIS OPTIMA



Coagulante 1, sulfato de aluminio Tipo B. Coagulante 2, Policloruro de aluminio (PAC).

Figura 33. Relación Δ SS vs Coagulante.

Fuente: Autores.

Se obtiene las medias de factores cuantitativos para los 2 coagulantes, con intervalos de confianza del 95%. La caracterización inicial de los sólidos suspendidos, en el sistema de neutralización, se encuentra en el rango de 26 mg/L. El mayor poder coagulante y la mínima turbiedad del agua clarificada que se obtiene, lo obtuvo el PAC con un 98,5% hacen que se consigan bajas concentraciones de sólidos suspendidos con

respecto al proceso con sulfato de aluminio, que fue de 96,5%, lo cual es el indicado, por el aspecto de producto terminado y mejor operación de las etapas posteriores.

7.2.2.3 *Relación Δ Color vs coagulante.*

Se relaciona la variable de Δ Color, entre el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC). La *Figura 34*, resume los resultados del modelo estadístico lineal genera, que relaciona Δ color con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P (véase *Tabla 24*), para Δ color es mayor o igual que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre Δ color y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 24. Análisis de varianza para Δ Color.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,00697822	2	0,00348911	1,28	0,2910
Residuo	0,101119	37	0,00273295		
Total (Corr.)	0,108098	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

La segunda tabla ANOVA para Δ color (Véase *Tabla 25*), prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,5538, que corresponde a B. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 6,45549% de la variabilidad en Δ color. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 1,39903%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0522777. El error medio absoluto (MAE) de 0,0418338 es el valor promedio de los residuos.

Tabla 25. Suma de cuadrados tipo III.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Coagulante	0,0048045	1	0,0048045	1,76	0,1930
DOSIS OPTIMA	0,000975719	1	0,000975719	0,36	0,5538
Residuo	0,101119	37	0,00273295		
Total (corr.)	0,108098	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

Para calcular la relación entre variables se tiene en cuenta:

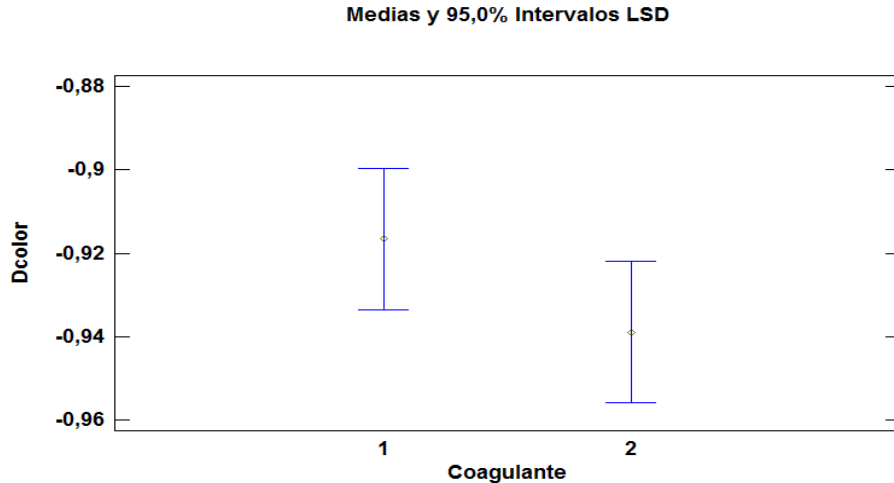
Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 1

A =Coagulante

Número de factores cuantitativos: 1

B= DOSIS OPTIMA



Coagulante 1, sulfato de aluminio Tipo B. Coagulante 2, Policloruro de aluminio (PAC).

Figura 34. Relación Δ Color vs Coagulante.

Fuente: Autores.

Se obtiene las medias de factores cuantitativos para los 2 coagulantes, con intervalos de confianza del 95%. La caracterización inicial del color en el sistema de neutralización, se encuentra en 141 PtCo, lo cual los porcentajes de remoción de color con los 2 coagulantes, no variaron mucho entre sí. De forma general, estos estuvieron entre el 92% y 94% de remoción, por lo que la dosis de coagulantes depende estrechamente de la concentración preliminar del color, lo que contrasta con la poca proporción de coagulante adicional necesaria al aumentar las concentraciones de turbiedad. A medida que los valores de color se hacen más altos, mayor porcentaje de remoción se presenta, en este caso, el mejor porcentaje, lo obtuvo el PAC y este permite una mejor separación de partículas; aun así, estos coagulantes son eficientes en cuanto a remoción de color.

7.2.2.4 Relación Δ Conductividad vs coagulante.

Se relaciona la variable de Δ Conductividad, entre el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC). La *Figura 35*, resume los resultados del modelo estadístico lineal genera, que relaciona Δ Conductividad con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P (*Véase Tabla 26*) para Δ Conductividad es menor que 0,05, hay una relación estadísticamente significativa entre Δ Conductividad y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 26. Análisis de varianza para Δ Conductividad.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,00672522	2	0,00336261	5,68	0,0071
Residuo	0,0219148	37	0,000592291		
Total (Corr.)	0,02864	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

La segunda tabla ANOVA para Δ Conductividad (Véase Tabla 27), prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,1895, que corresponde a A.

Aunque solo se está evaluando el factor cuantitativo B (dosis óptima), el factor categórico A para este parámetro, implica que el efecto no está presente. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 23,4819% de la variabilidad en Δ Conductividad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 19,3458%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,024337. El error medio absoluto (MAE) de 0,0176028 es el valor promedio de los residuos.

Tabla 27. Suma de cuadrados tipo III.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Coagulante	0,00105827	1	0,00105827	1,79	0,1895
DOSIS OPTIMA	0,00447522	1	0,00447522	7,56	0,0092
Residuo	0,0219148	37	0,000592291		
Total (corregido)	0,02864	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

Para calcular la relación entre variables se tiene en cuenta:

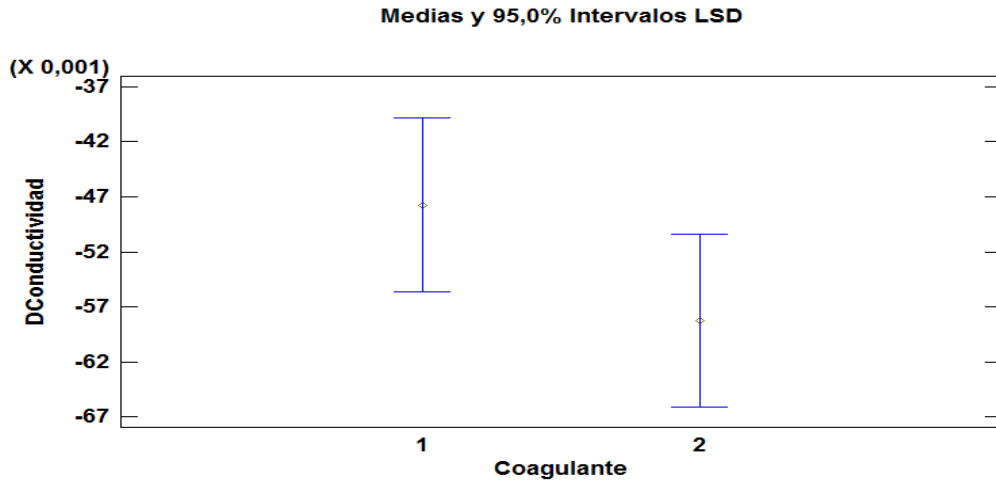
Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 1

A =Coagulante

Número de factores cuantitativos: 1

B= DOSIS OPTIMA



Coagulante 1, sulfato de aluminio Tipo B. Coagulante 2, Policloruro de aluminio (PAC).

Figura 35. Relación Δ Conductividad vs Coagulante.

Fuente: Autores.

Se obtiene las medias de factores cuantitativos para los 2 coagulantes, con intervalos de confianza del 95%. No hay diferencias estadísticamente significativas entre ningún par de medias con un nivel de confianza del 95,0%. La caracterización inicial de la conductividad en el sistema de neutralización, se encuentra en 926,88 lo cual los porcentajes de remoción de conductividad con los 2 coagulantes, no variaron mucho entre sí. De forma general y en su orden, estos estuvieron entre el 48% y 58% de remoción.

7.2.2.5 Relación Δ Cantidad de lodo vs coagulante.

Se relaciona la cantidad de lodo generado, entre el sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC). La *Figura 36*, resume los resultados del modelo estadístico lineal general, que relaciona Δ Cantidad de lodo con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P (*Véase Tabla 28*) para cantidad de lodo es mayor o menor que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre cantidad de lodo y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 28. Análisis de varianza para Δ Cantidad de lodo.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	424,469	2	212,234	1,78	0,1821
Residuo	4401,43	37	118,958		
Total (Corr.)	4825,9	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

La segunda tabla ANOVA para Cantidad de lodo generado (Véase Tabla 29), prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,2624, que corresponde a B. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, debería considerar eliminar B del modelo. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 8,79564% de la variabilidad en Cantidad de lodo generado. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 3,86568%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10,9068.

Tabla 29. Suma de cuadrados tipo III.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Coagulante	355,756	1	355,756	2,99	0,0921
DOSIS OPTIMA	154,069	1	154,069	1,30	0,2624
Residuo	4401,43	37	118,958		
Total (corregido)	4825,9	39			

Fuente: Statgraphics Centurion.

Para calcular la relación entre variables se tiene en cuenta:

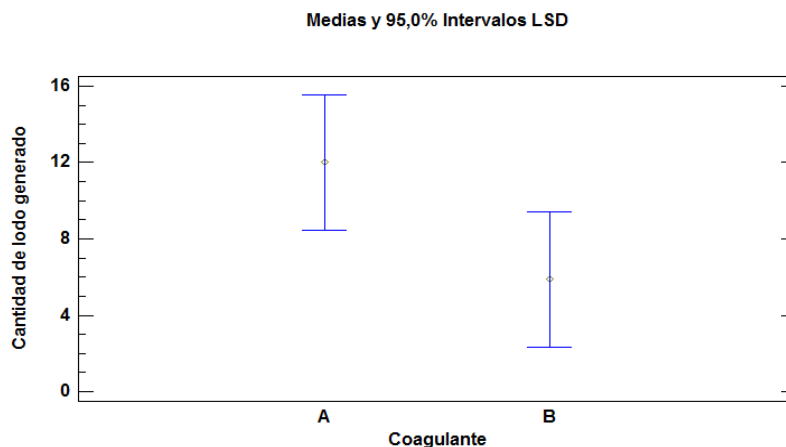
Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 1

A=Coagulante

Número de factores cuantitativos: 1

B=DOSIS OPTIMA



Coagulante 1, sulfato de aluminio Tipo B. Coagulante 2, Policloruro de aluminio (PAC).

Figura 36. Relación Δ Cantidad de lodo (mL) vs Coagulante.

Fuente: Autores.

Se obtiene las medias de factores cuantitativos para los 2 coagulantes, con intervalos de confianza del 95%. El porcentaje de generación de sólidos sedimentables, indica una diferencia de 12% para el coagulante 1, por lo que produjo más lodo en comparación con el coagulante 2 que fue de 6% y lo cual representa, condiciones más favorables. Esta variable se vuelve necesaria, para evaluar la formación del floc y las condiciones de tratamiento.

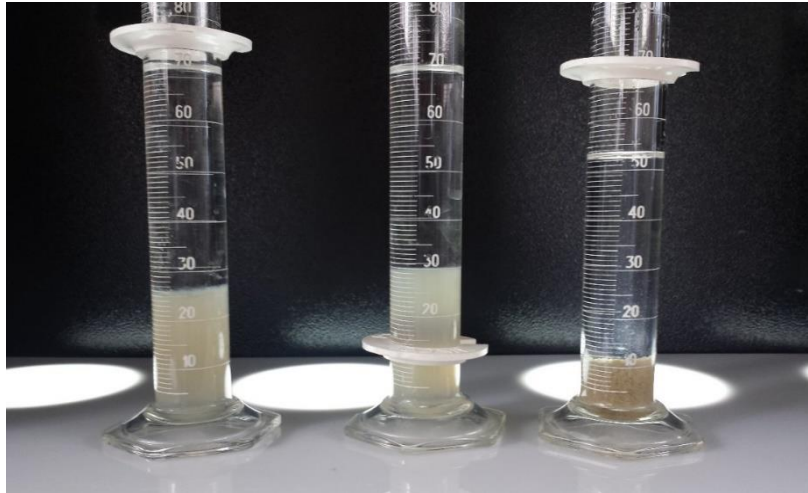


Figura 37. Cantidad de lodos generados con PAC y sulfato de aluminio; julio 23 de 2015.
Fuente: Autores.

Aunque los Sulfatos de Aluminio son calificados eficientes, en comparación a otros tipos de coagulantes, en esta oportunidad, el Policloruro de Aluminio presentó la ventaja de generar menos lodo, lo cual, el Sulfato de Aluminio se vio afectado por la caracterización del sistema de neutralización y las condiciones de operación específica.

8. CONCLUSIONES

La huella hídrica del proceso de generación de energía de la central termoeléctrica de RíoClaro, se puede considerar a través de dos grandes sistemas, como lo es el ciclo de generación de vapor y el sistema de enfriamiento; el mayor consumo interno de agua industrial está representado en un 89,3% por el sistema de enfriamiento y en un 7,9% por el ciclo de agua-vapor, siendo este segundo el más exigente referente las características de calidad que el primero.

La composición de las aguas residuales industriales en el sistema de neutralización, está dado por tres efluentes del proceso: El primero es la purga de la torre de enfriamiento, que aporta el 56% sobre el total del efluente que se vierte; con respecto a la variables de esta purga, se concluye que éstas son aguas con un alto contenido de sólidos suspendidos, color y conductividad, ya que la torre enfriadora opera bajo el principio de ciclo abierto con tiro inducido, razón por la cual hay evaporación y aumento en la concentración de la características fisicoquímicas que circula en este sistema en la relación con el agua de reposición, además presenta un pH básico.

El segundo efluente está dado por el rechazo de la ósmosis inversa y la regeneración del intercambiador iónico, cuyas características es la presencia de bajo contenido de sólidos suspendidos y color, un pH neutro con tendencia a ser muy básico cuando se regenera el lecho mixto y una conductividad promedio de 160 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

El tercer efluente corresponde con un 11% a la purga de la caldera, la cual presenta bajos contenidos de color, sólidos suspendidos, un pH básico y una conductividad baja.

Los procesos de coagulación, floculación y sedimentación constituyen uno de los principales sistemas de tratamiento de agua en países como Colombia, por ser una alternativa de bajo costos de operación y mantenimiento y su alta eficiencia para la modificación de las características fisicoquímicas; planteamiento que es coherente con los resultados de este trabajo de investigación, en donde es posible concluir que de acuerdo con los ensayos de jarra realizados, se lograron remover más del 90% del contenido de las variables de sólidos suspendidos y color; además con respecto al pH se confirma que con ambos coagulantes trabajan eficientemente mientras se mantenga neutro, aunque de acuerdo a los resultados, presenta un mejor desempeño el policloruro de aluminio comparado con el comportamiento del sulfato de aluminio, con relación en el aumento de la dosis óptima del coagulante.

Con respecto a la variable de la conductividad, se puede concluir que no se tiene remoción del contenido de sólidos disueltos, ya que aumenta con la adición de los coagulantes en un 5,3 % aproximadamente, es decir, que las características finales del agua residual industrial de la central termoeléctrica oscilan en un rango entre los 700 y 850 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

El policloruro de aluminio presentó un destacado desempeño en relación con los resultados del sulfato de aluminio, en donde se obtuvieron porcentajes de remoción del 98,5% para los sólidos suspendidos y del 94% para el color, además el comportamiento del pH con ambos compuestos químicos, después de la

reacción es que lo bajan, pero el PAC presenta un margen más amplio de reacción en comparación con el sulfato de aluminio.

Otro de los aspectos importantes considerados dentro la realización de los ensayos de jarras, es la cantidad de lodo generado posterior en el proceso de sedimentación, en donde el Policloruro de Aluminio, presenta condiciones más favorables en relación con el Sulfato de Aluminio, ya que presenta un menor porcentaje de generación de estos.

El análisis económico para el consumo de productos químicos, se realizó con base en los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y en los datos de operación de la Planta de RíoClaro, con el propósito de comparar el lodo producido con la dosis óptima: El Sulfato de Aluminio, produjo 33 mL de lodo, con una dosis óptima de 18 mg/L y el Policloruro de Aluminio, produjo 20 mL de lodo con una dosis óptima de 12 mg/L.

Después de obtener los consumos (mg/L), se realizó la conversión del costo comercial de los coagulantes por Kg/mes, para la reutilización de la purgas de torre de enfriamiento, en el que el valor del Sulfato de Aluminio, oscila en \$1500/Kg. y el Policloruro de Aluminio en \$1200/Kg; es decir, que se adquiere un consumo de 42,9 Kg/mes, con un total de \$64.350 para el Sulfato de Aluminio y con el PAC, se adquiere un consumo de 28,6 Kg/mes, con un total de \$34.376. Finalmente, el coagulante que presenta viabilidad tanto en condiciones favorables de operación como en la parte económica, es el Policloruro de Aluminio (PAC), con una diferencia significativa de \$29.973 Kg/mes.

De acuerdo con los resultados de los ensayos de la fase experimental, es posible dar respuesta a la pregunta problema *¿Las aguas residuales industriales de la central termoeléctrica de RíoClaro, se pueden reutilizar en diferentes procesos del ciclo de generación, con previo tratamiento de coagulación, floculación y sedimentación?* En donde se concluye que se pueden reusar en el proceso de generación de energía el 17,6% y el 71,4% restante, debe realizársele un tratamiento, que modifique las concentraciones de sólidos disueltos, el otro 11% está representado por la purga de caldera, la cual por sus características de calidad se pueden reutilizar en el proceso sin ningún tratamiento.

Parte del fortalecimiento de este proyecto de investigación, es que fue abordado teniendo en cuenta la normatividad vigente que aplica al proceso, obteniendo como resultado que este tipo de aguas vertidas a cauces receptores, presentan factibilidad de reuso, tratamiento y reutilización, generando ventajas en términos operativos y de sostenibilidad desde el punto de vista ambiental, social y económico.

9. RECOMENDACIONES

De acuerdo con el objetivo general de este trabajo de investigación, se realizan las siguientes recomendaciones, con la finalidad de reusar y recircular el 100% de las aguas residuales industriales, de la central termoeléctrica en el proceso productivo, disminuyendo la huella hídrica y los impactos económicos sobre el proceso en las temporadas de verano.

Según los balances de consumo de agua en el proceso, del total de los vertimientos del proceso se puede distribuir de la siguiente manera:

La primera alternativa consiste en reusar el agua de la purga de la caldera, la cual representa el 11% del total de los vertimientos industriales (*Tabla 33*), devolviéndola al proceso, específicamente al tanque de agua clarificada; ya que por sus bajas concentraciones de color, sólidos suspendidos y conductividad, cumple con las características establecidas para este punto del proceso, excepto con el pH según el cuadro comparativo presentado en la *Tabla 30*; pero teniendo en cuenta la representación del volumen de esta purga, sobre el total de agua clarificada (que es igual a la cantidad captada, ya que entre estos dos puntos no hay consumo) el pH histórico medio según los datos analizados del tanque de agua clarificada es de 6.8, es decir, representaría un incremento del 1,2 % (ya que hay una dilución) con lo cual no sobrepasaría el valor máximo establecido para este punto del proceso. Esta propuesta puede ser visualizada en la *Figura 38* con la línea punteada de color rojo; ahora con base en la misma relación (purga de caldera sobre el volumen de captado), del 1,2% se lograría una disminución en este porcentaje sobre el indicador de la huella hídrica, además de los costos por captación y bombeo en consumo de energético.

Tabla 30 Análisis comparativo entre la calidad fisicoquímica de la purga de caldera vs el estándar de calidad en el tanque de agua cruda.

Características fisicoquímicas de la purga de caldera.								
Características Finales	Parámetros	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	9,2	49,31	4,77	0	0,02	0	0
Estándares de calidad requeridos en el tanque de agua cruda								
Características fisicoquímicas requeridas en el tanque de agua clarificada	Parámetros	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	<8,5	<210	N.E	< 150	< 5,1	2 - 100	N.E

Fuente: Autores.

Con el 56% del total de los vertimientos, que corresponden a la purga de la torre de enfriamiento, (Figura 21 y la Tabla 13), se realiza un análisis comparativo entre los estándares de calidad de agua requeridos en los subprocesos, con los resultados iniciales y finales de los ensayos de jarras, presentados en la Tabla 31; con base en esto, es posible concluir que los valores finales, cumplen con todos los estándares de calidad requeridos en el tanque de agua clarificada, excepto con la conductividad; más sin embargo, se propone que estas aguas sean tratadas por un sistema de clarificación (coagulación, floculación y sedimentación), ya que de acuerdo con la información histórica del proceso presentada en la Tabla 13, se tiene un valor promedio de 6,8 para el pH y un máximo histórico de 75 $\mu\text{s}/\text{cm}$ de conductividad, teniendo presente que el valor permitido en el tanque de agua clarificada es menor a 90 $\mu\text{s}/\text{cm}$, es posible concentrar en 15 $\mu\text{s}/\text{cm}$ de conductividad; es por ello que en el ANEXO B se realiza un balance másico, con el cual se establece que mediante esta técnica de tratamiento, se puede recuperar 750 m^3/mes (17,6%) sobre el total de los vertimientos (4261 m^3/mes), es decir, se propone que se devuelva al tanque de agua clarificada en conjunto con la purga de la caldera.

Tabla 31. Análisis comparativo entre la calidad de agua a la salida del sistema de clarificación propuesto vs el estándar de calidad en el tanque de agua cruda.

Características Iniciales	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	$\mu\text{s}/\text{cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	30,18	8,55	741,1	2,7	21,8	0,21	6,96	139,9

Tratamiento propuesto Clarificación (Coagulación, Floculación, Sedimentación)

Características Finales	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	$\mu\text{s}/\text{cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	30	6,7	783,3	N.A	0,5	0,21	N.A	9,3

Estándares de calidad requeridos en el tanque de agua clarificada

Características fisicoquímicas requeridas en el tanque de agua clarificada	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	$\mu\text{s}/\text{cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	25-30	6,5-8,0	<90	N.A	< 20	0,3	<5	<30

Fuente: Autores.

Con el 38,4% excedente del proceso de clarificación propuesto, más el 33% del rechazo de la ósmosis inversa, en conjunto con los efluentes de la regeneración del intercambiador iónico de la planta de tratamiento, o sistema de desmineralización de la central térmica, se obtiene el 71,4% del total de las aguas residuales y de acuerdo al comparativo realizado en la *Tabla 32*, se puede establecer que no cumple con el valor máximo de conductividad permitido en los diferentes subprocesos, es por ello que se propone que estos sean sometidos a un tratamiento para la remoción de sólidos disueltos, que de acuerdo a los referentes teóricos, se sugiere que se emplee una ósmosis inversa, antecedido por un filtro de arena y carbón; en donde al final se obtendrá un efluente con la remoción entre el 90 y 95% de los sólidos disueltos, así mismo como ausencia de sólidos suspendidos y color, con lo cual se espera que la conductividad máxima del permeado de este sistema propuesto, corresponda a 78 $\mu\text{s}/\text{cm}$; obteniendo las características fisicoquímicas para recircularlas en el proceso, de acuerdo con el balance másico del *ANEXO C*.

Como se planteó en los referentes teóricos, los sistemas de ósmosis inversa tienen dos efluentes; el permeado y el rechazo, que generalmente corresponden respectivamente al 65 - 70% y 30 al 35%, es decir, de ese 71,4%; el 46,4% corresponderá al permeado con una conductividad máxima de 78 $\mu\text{s}/\text{cm}$, el cual se propone que sea recuperado al tanque de agua clarificada, ya que no representa ninguna alteración a las características de calidad, antes por el contrario, se mantendría una tendencia a la que normalmente se obtiene en la actualidad, es por ello que en la *Figura 38*, este sistema se encuentra puntuado con una línea azul.

Con el 25% del total de las aguas residuales restantes, que corresponden al rechazo de ósmosis inversa del sistema de tratamiento propuesto, cuyas características fisicoquímicas se presentan en la *Tabla 32*, en donde se prevén altas concentraciones de sólidos disueltos; se propone llevar este rechazo a un tanque de almacenamiento adicional, para utilizarlo en el lavado de patios y en el sistema de extracción de ceniza gruesa o sello hidráulico de la cámara de combustión, el cual tiene como especificación de calidad ausencia de sólidos y un pH entre 6.0 – 9.0, además teniendo en cuenta el consumo de agua en estas actividades y por el subproceso de enfriamiento de cenizas (consumo de la red contra incendio, *Tabla 12*), estaría bajo sus especificaciones técnicas. Es importante aclarar que no se propone este proceso, como consumo de los efluentes del sistema de clarificación propuesto, ya que la oferta supera la demanda.

Tabla 32. Análisis comparativo entre la calidad de agua a la salida del sistema de ósmosis propuesto vs el estándar de calidad en el tanque de agua clarificada.

Tratamiento propuesto		Filtración (lecho de arena y carbón) + Ósmosis Inversa							
Características fisicoquímicas del permeado	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendidos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	$\mu\text{s}/\text{cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	30	6,7	78,33	N.A	0	0,021	0	0

Características fisicoquímicas del rechazo	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendedos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	30	6,7	704,97	N.A	0	0,189	0	0
Características fisicoquímicas requeridas en el tanque de agua clarificada	Parámetros	Temperatura	pH	Conductividad	Fosfatos	Sólidos Suspendedos	Hierro	Turbiedad	Color
	Unidades	°C	Un pH	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	UPC
	Valor	25-30	6,5-8,0	<90	N.A	< 20	0,3	<5	<30

Fuente: Autores.

La configuración de este sistema de tratamiento propuesto se presenta en la *Figura 38*, en donde el tren de desmineralización está compuesto por un filtro de arena, un filtro de carbón y la ósmosis inversa, así mismo, como los diferentes puntos a los que se propone que sean recuperadas las aguas, visualizándose gráficamente con líneas punteadas de color rojo, azul y amarillo; en el recuadro verde se puede evidenciar la secuencia del sistema propuesto y los mismos datos se encuentran especificados en la *Tabla 33*.

En caso de implementar el sistema de tratamiento por clarificación, filtración, ósmosis inversa es importante considerar que en este trabajo de investigación, solo se evaluó la primera fase del tratamiento (coagulación, floculación y sedimentación) por tal motivo sería apropiado desarrollar una evaluación para las etapas posteriores.

Tabla 33. Balance másico cuantitativo de las proyecciones de recuperación de las aguas residuales de la central termoeléctrica de RíoClaro.

	Proceso	m ³ /mes	L/s.	Porcentaje que representa	Sistema de tratamiento	Punto de recuperación	m ³ /mes	L/s.	Porcentaje que representa
	Aguas residuales industriales de la central térmica	Purga torre de enfriamiento	2.384	0,920	56%	Clarificación	Recuperación al tanque de agua clarificada	750	0,29
Clarificación + Filtro de arena, carbón, ósmosis inversa						Recuperación al tanque de agua clarificada	1.062	0,41	24,9 %
Clarificación + Filtro de arena, carbón, ósmosis inversa						Almacenamiento aguas recuperadas	572	0,22	13,5 %
Rechazo ósmosis inversa y Regeneración de lecho mixto planta principal		1.408	0,543	33%	Filtro de arena, carbón, ósmosis inversa	Recuperación al tanque de agua clarificada	915	0,35	21,5%
					Filtro de arena, carbón, ósmosis inversa	Almacenamiento aguas recuperadas	493	0,19	11,5 %
Purga caldera		469	0,181	11%	Recuperación	Recuperación directa al tanque de agua clarificada	469	0,18	11 %
Total		4.261	1,644	100 %			4.261	1,644	100 %

Fuente: Autores.

Con la implementación y ejecución de estas recomendaciones, se estaría disminuyendo el 11,17% del agua captada; lo que directamente impacta positivamente el indicador de huella hídrica del proceso, con una reducción en este mismo porcentaje; además representa un ahorro económico anual, estimado por la energía necesaria para bombear un metro cúbico desde la bocatoma hasta la planta de tratamiento, que según los registros de la planta es de 2,6 kW H; lo que al año implicaría un ahorro de 132.943,2 kW H, estimando el costo del kilovatio a \$ 200, representaría un ahorro de \$ 26.588.640 al año.

LISTA DE REFERENCIAS

- ABC. (25 de marzo de 2009). Importancia de la depuración de efluentes. (R. Horvath, Ed.) *ABC Color*, 1. Recuperado el 26 de Febrero de 2016, de <http://www.abc.com.py/edicion-impresas/suplementos/abc-rural/importancia-de-la-depuracion-de-efluentes-1158622.html>
- ACODAL. (1992). *Teoría de la Coagulación del Agua*. . (J. Arboleda, Ed.) Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de Teoría y práctica de la Purificación del agua: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/teoria.pdf>
- Altamirano, E., & Peñafiel, A. (2012). *Optimización de la calidad de aguas residuales de una fábrica de bacterias*. Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 11 de Septiembre de 2015, de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4689/1/T185.pdf>
- Álvarez, D. d., Castellanos Ortiz, F., & Probanca Caro, E. (2012). Selección y evaluación de una planta de tratamiento de agua para la central termoeléctrica Este Habana. *Tecnología Química*, XXXIII(1), 64-73. Recuperado el 11 de Septiembre de 2015, de <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/download/3430/2885>
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua (tercera edición ed.)*. Colombia: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE COLOMBIA. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015
- Ariza, D. (2010). *Química General*. Módulo didáctico , Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bogotá.
- AUXIAQUA. (2011). Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de Ósmosis Inversa. Sistemas de filtración: <http://www.auxiaqua.es/sistemas-filtracion/>
- Ávila, J. (1999). Lo esencial acerca del intercambio iónico. *Agua latinoamerica*, 3. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015, de Lo esencial acerca del intercambio iónico: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/PDF/5-6-02avilla.pdf>
- Blass Amador, G., & Panamá Tirado, L. A. (2007). Aplicación de electrocoagulación para eliminación de silicio en agua de enfriamiento. *UNAM. Revista AIDIS*, 1(2), 1-8. Recuperado el 11 de Septiembre de 2015, de <http://www.journals.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14388>
- Bravo, L. (2011). Estrategias para la reutilización del agua. *Gestión de la calidad del agua*, 17-24. Recuperado el 26 de Junio de 2015, de <http://ambientonline.es/Ediciones de AMBIENT/4 Edición GQA MEA2010-11.pdf>
- Bustos, L. (30 de Noviembre de 2008). *Laboratorios de calidad de agua*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://laboratoriosdecalidaddeagua.blogspot.com/2008/11/laboratorios-de-calidad-de-aguas.html>.

- Calderón, F. (s.f.). *Color*. Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Analisis_de_%20Color1.htm
- Calderón, L., Corredor, A., García, H., & Miguel, G. (Octubre de 2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Recuperado el 26 de Febrero de 2016, de http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/WWF_Analisis-costo-beneficio-energias-renovables-no-convencionales-en-Colombia.pdf
- Cánepa, L., Maldonado, V., & Barrenechea, A. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. (CEPIS, Ed.) Lima, Perú. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoI/uno.pdf>
- Cañas, C. (2005). Estudio de aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta La Flora del Amb. S.A E.S.P. 142. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 22 de Octubre de 2015, de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6922/2/118190.pdf>
- Cardozo, S., Sánchez, Y., & D'Armas, H. (2011). *Tratamiento de agua para la generación de vapor con un sistema de suavizado y dosificación de productos químicos*. Recuperado el 24 de abril de 2016, de <http://www.redalyc.org/pdf/2150/215024822004.pdf>
- Castrillón, D., & Giraldo, M. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de Aluminio granulado, tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/3146/1/6281622H565.pdf>
- CEPIS. (Abril de 1973). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Recuperado el 29 de Mayo de 2015, de Departamento de Ingeniería y Ciencias del Ambiente: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-04a.pdf>
- CEPIS/OPS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. Recuperado el 03 de Agosto de 2015, de <http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/620/1/BVCI0000570.pdf>
- Cinética Química S.A de C.V. (s.f.). *Policloruro de Aluminio*. Recuperado el 28 de Julio de 2015, de <http://www.policlorurodealuminio.com/policloruro-de-aluminio.html>
- COMISIÓN NACIONAL PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA. (2009). *Tratamiento de agua para su utilización en calderas*. Secretaría de energía, Cuauhtémoc - México. Recuperado el 11 de Septiembre de 2015, de http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/10/Tratamiento_de_agua_v1_1.pdf
- COMUNIDAD ANDINA. (2005). *Manual de estadísticas Ambientales*. Santa Cruz de la Sierra.

- CONGRESO DE COLOMBIA. (11 de Junio de 1997). Ley 373. *Diario Oficial No. 43.058*. Santa Fe de Bogotá, D.C. Recuperado el 08 de Agosto de 2015, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=342>
- Cortina Domínguez , C., & Márquez Ortiz , R. (2008). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil*. Tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. Recuperado el 28 de Abril de 2015, de <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2029/tesis%20coruinadominguez.pdf?sequence=1>
- Curso a distancia, potabilizadoras. (s.f.). *Características de las aguas residuales*. (ETAP) Recuperado el 26 de Febrero de 2016, de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- DEFENSORÍA DEL PUEBLO. (s.f.). *Diagnóstico sobre la calidad del agua para el consumo humano en Colombia, en el marco del derecho humano al agua*. Informe defensorial. Recuperado el 14 de Diciembre de 2014, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/foro4/06Informe.pdf>
- Del Toro, J. (2014). *Agualim*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de Ósmosis inversa Agualim tratamiento integral del agua: <http://www.agualim.com/osmosis-inversa-tratamiento-integral-del-agua/>
- Delgado, J., Gutierrez, C., Salazar, F., G. M., Mercado, R., & Pereira, J. (2013). Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo. *Scielo*, 24(1). Recuperado el 22 de Octubre de 2015
- EcuRed. (s.f.). *Fuerzas de Van der Waals*. (Enciclopedia cubana) Recuperado el 23 de abril de 2016, de http://www.ecured.cu/Fuerzas_de_Van_der_Waals
- EDOSPINA S.A. (2008). *Planta desmineralizadora automática de Cementos Argos - RioClaro*. Manual de operación.
- EMCALI. (2014). *Especificaciones técnicas, polímero aniónico ayudante de floculación para el tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 03 de Agosto de 2015, de http://emcalinet.emcali.com.co/contratacion/publico/index.php?_a=archivos.descargar&iidproceso=3544&idarchivo=11591&
- ENDESAEDUCA. (2014). *Centrales térmicas convencionales*. Recuperado el 26 de Febrero de 2016, de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/viii.-las-centrales-termicas-convencionales

- ENOHSA. (2013). *Capítulo VII - 7. Floculación*. Ente Nacional de Obras Hídricas de Sanseamamiento, Buenos aires - Argentina. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://es.scribd.com/doc/143970318/ENOHSA-Floculacion#scribd>
- Fernández, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Informe de vigilancia tecnológica, Madrid - España. Recuperado el 11 de Septiembre de 2015, de <http://www.uned.es/experto-universitario-gestion-I-D/bibliografia/bibliografia%20/BIBLIOGRAFIA/TRATMIENTOS%20AVANZADOS%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20INDUSTRIALES.pdf>
- Fernández, E. (octubre de 2010). *Proyecto ejecutivo de planta de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Xochiapa, Ver.* Recuperado el 16 de Enero de 2015, de Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30564/1/FernandezMayo.pdf>
- García, M. (2013). *Protocolo para la determinación de sólidos suspendidos totales secados a 103 - 105 °C*. Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de <http://sigug.uniguajira.edu.co/sigug/pdf/PROTOCOLOS/GL-PL-09.%20PROTOCOLO%20S%C3%93LIDOS%20SUSPENDIDOS%20TOTALES%20A%20%20103-105%C2%B0C.pdf>
- González, K.-k., & Karin, C. (2001). Estimación por mínimos cuadrados ponderados en modelos lineales generalizados. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 63. Recuperado el 26 de Octubre de 2015, de Sistema de Bibliotecas: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/Gonzales_K_K/cap1.pdf
- Hernández Matiz , A. (2007). *Ahorro y uso eficiente del agua del recurso agua en una empresa del sector aceites y grasas vegetales*. Informe de pasantía, Universidad de la Salle, Bogotá. Recuperado el 12 de Enero de 2015, de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14043/T41.07%20H43a.pdf;jsessionid=0EFCE3FBC2E497D17E84087A2E02331F?sequence=1>
- Hernández Sánchez, I. (2011). *Tratamiento de aguas residuales para aporte a central térmica de ciclo combinado*. Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III Madrid , Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Leganés - España. Recuperado el 16 de Diciembre de 2014, de <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11659>
- IBM. (s.f.). *Modelos lineales generalizados*. Recuperado el 16 de Mayo de 2015, de http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_22.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/spss/advanced/idh_idd_genlin_typeofmodel.htm?lang=es
- IMTA. (s.f.). *INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA*. Recuperado el 29 de Abril de 2015, de Ahorro de agua mediante recuperación de purgas en torres de enfriamiento, a través de la eliminación de microorganismos, sílice y otras especies

químicas: <https://www.imta.gob.mx/ahorro-de-agua-mediante-recuperacion-de-purgas-en-torres-de-enfriamiento-a-traves-de-la-eliminacion-de-microorganismos-silice-y-otras-especies>

INQUINAT S.A. (2008). *Desmineralización de agua ¿Ósmosis Inversa o Intercambio Iónico?* Recuperado el 27 de Abril de 2015, de <http://pemac-la.com/assets/osmosis-inversa-vs-intercambio-ionico.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. (2010). *Norma Técnica Colombiana NTC- 3903. Procedimiento para el ensayo de coagulación - floculación en un recipiente con agua o método de jarras*. Bogotá, D.C.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. (1995). *Normas Técnica Colombiana NTC - 5667. Gestión ambiental. Calidad de agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo*. Bogotá, D.C. Recuperado el 24 de Marzo de 2016, de http://ingenieria.udea.edu.co/isa/normas_decretos/norma%20muestreo.pdf

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. (1998). *Norma Técnica Colombiana NTC - 4531. Calidad de agua. Determinación de la conductividad eléctrica*. Bogotá D.C.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. (2011). *Norma Técnica Colombiana NTC - 5844. Calidad de agua. Determinación del color*. Bogotá D.C., Colombia.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. (2012). *Norma Técnica Colombiana - NTC - 3651. Calidad de agua. Determinación del pH*. Bogotá D.C.

Lago, J., Fernández, J., & Díaz, D. (2005). Minimización de los residuos provenientes de la regeneración de las Resinas de las Plantas Desmineralizadoras del CRP-AMUAY. *Scielo*, 20(4), 43-54. Recuperado el 28 de Abril de 2015, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-40652005000400004&script=sci_arttext

Laurent, H., & Garrido, A. (2010). *Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España*. Madrid - España: Fundación Botín & Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 24 de Enero de 2015, de <http://www.fundacionbotin.org/paginas-interiores-de-una-publicacion-de-la-fundacion-botin/papeles-de-agua-virtual-n-6-analisis-y-evaluacion-de-las-relaciones-entre-el-agua-y-la-energia-en-espana.html>

LENNTECH. (s.f.). Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de <http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>

MINAMBIENTE. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015, "Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a*

cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones". Recuperado el 05 de Agosto de 2015, de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (25 de Julio de 2014). Resolución 1207. *Diario Oficial 49242*. Bogotá, D. C. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2006). *Decreto 1900*. Bogotá D.C. Recuperado el 23 de Septiembre de 2015, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=20466>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (25 de Octubre de 2010). Decreto 3930. *Diario Oficial 47873*. Bogotá D. C. Recuperado el 30 de Agosto de 2015, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. (2000). Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS. En *Título C - Sistemas de potabilización*. Bogotá D.C.: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/5._Sistemas_de_potabilizacion.pdf

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL MARINO. (Diciembre de 2010). *Plan nacional de reutilización de aguas*. Recuperado el 17 de Enero de 2015, de Gobierno de España: <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publ>

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. (2010). *Plan nacional de reutilización de aguas*. Gobierno de España, España. Recuperado el 16 de Diciembre de 2014, de http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/version_preliminar_pnra231210_tcm7-153069.pdf

Mira, J. (Ed.). (13 de Noviembre de 2006). *ECOPORTAL*. Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de El agua en Colombia: http://www.ecoport.net/Temas-Especiales/Agua/El_agua_en_Colombia

Nemerow, N., & Dasgupta, A. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. (I. Medioambiental, Trad.) Madrid: Díaz de Santo, S.A. Recuperado el 31 de Mayo de 2015, de <https://books.google.com.co/books?id=KDMjTWMEuaoC&pg=PA631&lpg=PA631&dq=como+agua+con+impurezas+de+considerable+concentraci%C3%B3n+que+se+extrae+del+sistema+circulatorio+de+las+calderas+a+fin+de+mantener+el+control+de+concentraci%C3%B3n.&source=bl&ots=txx>

- Oliveiros Beltrán, N. (2006). *Análisis de alternativas para el tratamiento de aguas residuales industriales de una fábrica productora de aromas y fragancias en la Ciudad de Bogotá*. Monografía de especialista en ingeniería ambiental, Universidad Industrial de Santander, Bogotá. Recuperado el 27 de Abril de 2015, de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7569/2/119973.pdf>
- OOCITIES. (s.f.). *Tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales*. Recuperado el 26 de Febrero de 2016, de <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/tratamientobiologico4.pdf>
- Pardo Matínez, C. (2012). *Selección de tecnologías limpias*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Pérez, G. (2015). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil, mediante procesos electroquímicos*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4518/1/T-UCE-0017-116.pdf>
- Pérez, J. A. (s.f.). Coagulación y Floculación. En J. A. Pérez, *Tratamiento de aguas* (pág. 60). Recuperado el 01 de Junio de 2015, de http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358040/CAP_2.pdf
- Pérez, J. (s.f.). *II Coagulación y floculación. Tratamiento de aguas*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas. Recuperado el 01 de Julio de 2015, de http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358040/CAP_2.pdf
- Prieto, J. (23 de Octubre de 2009). *Eficiencia y uso responsable de energía*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2014, de Energía eficiente: <https://energiaeficiente.wordpress.com/2009/10/23/como-funcionan-las-centrales-termicas/>
- Recalde, M. (2010). Determinación de los procesos de influencia en el proceso del agua, de la quebrada El Guamal, para su potencial uso industrial, por la empresa americana de curtidos Ltda. y Cía S.A. Pereira, Colombia. Recuperado el 23 de abril de 2016, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2056/1/6285M578.pdf>
- Renom, M. (2011). *Termometría*. Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de Principios básicos de las mediciones atmosféricas : http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/PBMA/PBMA_teotico/Bolilla3-Termometria.pdf
- RENOVATEC. (s.f.). *Control Químico de Torres de Refrigeración*. Fuenlabrada, Madrid - España. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de <http://www.controlquimico.es/index.php/control-quimico-de-torres-de-refrigeracion>
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (s.f.). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Recuperado el Enero de 16 de 2015, de Informe de vigilancia tecnológica:

http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf

Romero Rojas, J. A. (2009). *Calidad del agua* (Tercera ed., pág. 484). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ruiz, A. (Ed.). (13 de Diciembre de 2014). Escasez de agua, un asunto de supervivencia. *Diario del Istmo*. Recuperado el 10 de Enero de 2015, de <http://www.diariodelistmo.com/edicion/2014-12-13/14321.pdf>

Salazar, L. (2012). *Diseño de plantas potabilizadoras*. Medellín, Colombia. Recuperado el 25 de Septiembre de 2015

SERQUIMSA. (2015). *Consideraciones acerca del ensayo de jarras en el tratamiento de agua residual industrial*. (M. C. Gil, Editor) Recuperado el 28 de Julio de 2015, de <http://www.serquimsa.com/consideraciones-acerca-del-ensayo-de-jarras-en-el-tratamiento-de-agua-residual-industrial/>

SIAME. (2005). *Guía ambiental para proyectos carboeléctricos*. Sistema de información ambiental minero energético. Recuperado el 23 de Abril de 2015, de http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/SECTOR%20ENERG%C3%89TICO/Guia%20ambiental%20para%20proyectos%20carboel%C3%A9ctricos.pdf

Sierra Ramírez , C. (2011). *Contaminación Termal. Anexo III Propuesta metodológica para establecer las normas de vertimientos líquidos aplicables al sector de generación térmica de energía decreto 3930 de 2010*. Propuesta al ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Asociación Nacional de Empresas Generadoras, Bogotá. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de http://www.andeg.org/sites/default/files/Informe_Final_MAVDT.pdf

Superintendencia del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. (enero de 2014). Guía de termoeléctricas. 9-11. Miraflores, Chile. Recuperado el 23 de abril de 2016

SPX Cooling Technologies. (2009). *Torre de Enfriamiento. Marley Clase W400*. . Manual de Usuario, OVERLAND PARK, KANSAS 66213 UNITED STATES. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de spxcooling.com/pdf/sp_M92-1312D.pdf

Standard Methods For the examination of water and Wastewater. (2005). *Total Suspended Solids dried at 103 - 105 °C 2540 D*. (21 st. ed. ed.). New York: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Recuperado el 24 de Marzo de 2016, de http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf

- Taco Ugsha, M., & Mayorga Llerena, E. (2013). Aplicación del proceso Fenton en la disminución de materia orgánica en aguas residuales de la industria termoeléctrica. *Química Central*, 3(1), 25-30. Recuperado el 29 de Abril de 2015, de <http://www.uce.edu.ec/documents/22782/3210980/04.pdf>
- Tafur Bravo, L., & Quevedo Salas, R. (2014). *Alternativa para el Tratamiento de aguas residuales cromadas, con quitosano extraído del exoesqueleto de camarón*. Trabajo de pregrado, Universidad del Tolima, Facultad de ingeniería agronómica, Ibagué - Tolima. Recuperado el 27 de Abril de 2015, de <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1250/1/RIUT-FBA-spa-2014-Alternativa%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20cromadas%20con%20Quitosano%20extra%20del%20exoesqueleto%20de%20camar%C3%B3n.pdf>
- UNITEK. (s.f.). *Lecho mixto, parámetros fisicoquímicos del agua*. Recuperado el 04 de Agosto de 2015, de http://www.unitek.com.ar/productos-lecho-mixto.php?id_lib_tecnica=6
- UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. (s.f.). *Coagulación y floculación*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua: http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/curso/uni_05/u5c2s2.htm
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. (s.f.). *Torres de enfriamiento*. Recuperado el 30 de Agosto de 2015, de Cátedra de integración III: http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Torres_de_enfriamiento.pdf
- Uribe, A., Valencia, P., González, J., Revollo, Á., Escobar, C., Morales, A., . . . Gómez, A. (2006). *Estudio de impacto ambiental. Proyecto de generación de energía eléctrica Planta Valle*. Cementos Argos S.A., Medellín.
- Vargas, L. (2004). *Capítulo 5. Mezcla rápida*. CEPIS, Lima. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoI/cinco.pdf>
- Vargas, L. (2004). *Capítulo 6. Floculación*. CEPIS. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/MANUALI/TOMOI/seis.pdf>
- Vargas, L. (2013). *Capítulo 11*. Manual I: Teoría, CEPIS, Organización Panamericana de la Salud. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoII/once.pdf>
- Vásquez, E. (15 de octubre de 2003). *Las fuerzas de van der Waals*. Recuperado el 23 de abril de 2016, de <http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/van%20der%20waals.html>

ANEXOS

ANEXO A. Resultados fase experimental.

Tabla 34. Tabla de resultados fase experimental

No Muestra	Coagulante	ID Muestra	Dosis Óptima	Conductividad i	T° i	pH i	Color i	SS i	Conductividad f	pH f	Color f	SS f	Δ pH	Δ color	ΔSS	Δ Conductividad	Cantidad de lodo generado
1	A	1A	20	737	31	8,69	147	25	769	6,17	10	0	-29,00%	-93,20%	-100,00%	-4,16%	0
1	B	1B	20	737	31	8,69	147	25	762	7,41	0	1	-14,73%	-100,00%	-96,00%	-3,28%	0
2	A	2A	25	715	28	8,53	111	17	765	6,1	8	0	-28,49%	-92,79%	-100,00%	-6,54%	0
2	B	2B	20	715	28	8,53	111	17	758	7,35	1	0	-13,83%	-99,10%	-100,00%	-5,67%	0
3	A	3A	30	680	30	8,41	87	18	716	5,8	3	1	-31,03%	-96,55%	-94,44%	-5,03%	0
3	B	3B	20	680	30	8,41	87	18	715	6,98	0	0	-17,00%	-100,00%	-100,00%	-4,90%	0
4	A	4A	30	882	30	8,71	166	27	934	6,2	9	2	-28,82%	-94,58%	-92,59%	-5,57%	0
4	B	4B	25	882	30	8,71	166	27	901	7,27	12	1	-16,53%	-92,77%	-96,30%	-2,11%	0
5	A	5A	20	741	29	8,52	115	18	767	6,8	17	1	-20,19%	-85,22%	-94,44%	-3,39%	0
5	B	5B	30	741	29	8,52	115	18	789	6,94	19	0	-18,54%	-83,48%	-100,00%	-6,08%	0
6	A	6A	20	801	29	8,56	166	27	826	6,57	22	2	-23,25%	-86,75%	-92,59%	-3,03%	0
6	B	6B	30	801	29	8,56	166	27	847	7,04	17	1	-17,76%	-89,76%	-96,30%	-5,43%	0
7	A	7A	20	694	30	8,43	120	17	715	6,44	17	1	-23,61%	-85,83%	-94,12%	-2,94%	0
7	B	7B	30	694	30	8,43	120	17	718	6,86	8	0	-18,62%	-93,33%	-100,00%	-3,34%	0
8	A	8A	20	758	29	8,42	136	20	781	6,58	14	1	-21,85%	-89,71%	-95,00%	-2,94%	0
8	B	8B	30	758	29	8,42	136	20	840	7,02	17	1	-16,63%	-87,50%	-95,00%	-9,76%	0
9	A	9A	30	750	32	8,45	148	25	814	6,11	1	0	-27,69%	-99,32%	-100,00%	-7,86%	27
9	B	9B	38	750	32	8,45	148	25	833	7,1	6	0	-15,98%	-95,95%	-100,00%	-9,96%	14
10	A	10A	28	772	31,8	8,61	147	23	795	6,18	7	0	-28,22%	-95,24%	-100,00%	-2,89%	20

No Muestra	Coagulante	ID Muestra	Dosis Óptima	Conductividad i	T° i	pH i	Color i	SS i	Conductividad f	pH f	Color f	SS f	Δ pH	Δ color	ΔSS	Δ Conductividad	Cantidad de lodo generado
10	B	10B	28	772	31,8	8,61	147	23	824	7,12	2	0	-17,31%	-98,64%	-100,00%	-6,31%	11
11	A	11A	18	737	32,1	8,54	125	15	746	6,64	1	1	-22,25%	-99,20%	-93,33%	-1,21%	33
11	B	11B	24	737	32,1	8,54	125	15	785	7,19	11	0	-15,81%	-91,20%	-100,00%	-6,11%	10
12	A	12A	28	819	32,7	8,53	140	22	858	6,28	13	1	-26,38%	-90,71%	-95,45%	-4,55%	25
12	B	12B	35	819	32,7	8,53	140	22	902	6,91	9	0	-18,99%	-93,57%	-100,00%	-9,20%	20
13	A	13A	30	835	31	9,93	58	10	898	7,31	6	0	-26,38%	-89,66%	-100,00%	-7,02%	25
13	B	13B	36	835	31	9,93	58	10	889	9,12	6	0	-8,16%	-89,66%	-100,00%	-6,07%	20
14	A	14A	30	756	33	8,58	134	22	802	6,09	20	1	-29,02%	-85,07%	-95,45%	-5,74%	30
14	B	14B	36	756	33	8,58	134	22	829	6,93	8	0	-19,23%	-94,03%	-100,00%	-8,81%	10
15	A	15A	35	712	28	8,35	157	28	793	6,72	3	0	-19,52%	-98,09%	-100,00%	-10,21%	26
15	B	15B	28	712	28	8,35	157	28	760	6,21	9	1	-25,63%	-94,27%	-96,43%	-6,32%	12
16	A	16A	18	659	23	8,25	123	23	689	6,48	4	0	-21,45%	-96,75%	-100,00%	-4,35%	20
16	B	16B	30	659	23	8,25	123	23	710	6,98	6	0	-15,39%	-95,12%	-100,00%	-7,18%	10
17	A	17A	12	465	31	8,84	66	12	481	6,73	13	0	-23,87%	-80,30%	-100,00%	-3,33%	25
17	B	17B	12	465	31	8,84	66	12	489	7,52	7	0	-14,93%	-89,39%	-100,00%	-4,91%	20
18	A	18A	28	706	30	8,2	104	17	736	6,15	18	1	-25,00%	-82,69%	-94,12%	-4,08%	0
18	B	18B	28	706	30	8,2	104	17	774	6,99	2	1	-14,76%	-98,08%	-94,12%	-8,79%	0
19	A	19A	20	755	31	8,61	249	31	807	6,47	24	1	-24,85%	-90,36%	-96,77%	-6,44%	0
19	B	19B	20	755	31	8,61	249	31	829	7,37	5	1	-14,40%	-97,99%	-96,77%	-8,93%	0
20	A	20A	28	848	32	8,02	299	39	845	6,06	5	1	-24,44%	-98,33%	-97,44%	0,36%	0
20	B	20B	28	848	32	8,02	299	39	843	7,26	12	0	-9,48%	-95,99%	-100,00%	0,59%	0

Fuente: Autores.

ANEXO B. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera y el sistema de clarificación propuesto al tanque de agua cruda.

En la *Figura 39* se presenta el balance másico del tanque de agua de clarificada, con la recuperación de la purga de caldera y el 17% del flujo tratado por el proceso de clarificación propuesto.

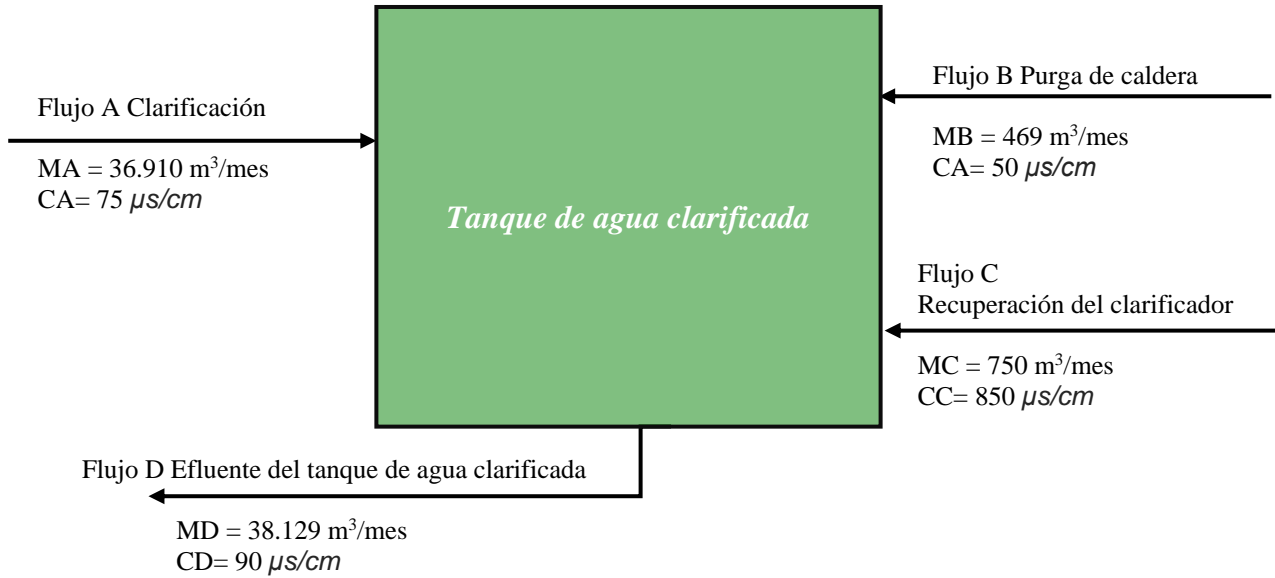


Figura 39. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera y el sistema de clarificación propuesto al tanque de agua cruda.

Fuente: Autores

$$(MA * CA) + (MB * CA) + (MC * CC) = (MD * CD)$$

En donde:

MA= Masa del flujo A

MB= Masa del flujo B

MC= Masa del flujo C

MD= Masa del flujo D

CA= Concentración del flujo A

CB= Concentración del flujo B

CC= Concentración del flujo C

CD= Concentración del flujo D

Despejando CD:

$$\frac{(MA * CA) + (MB * CA) + (MC * CC)}{MD} = CD$$

$$\frac{\left(36.910 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} * 75 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}\right) + \left(469 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} * 50 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}\right) + \left(750 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} * 850 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}\right)}{38.129 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}} = 89,93 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$$

ANEXO C. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera, clarificador y permeado del sistema de ósmosis inversa al tanque de agua clarificada.

En la *Figura 40* se presenta el balance másico del tanque de agua de clarificada, con la recuperación de la purga de caldera, el 17% del flujo tratado por el proceso de clarificación propuesto y el permeado del sistema de ósmosis inversa propuesto.

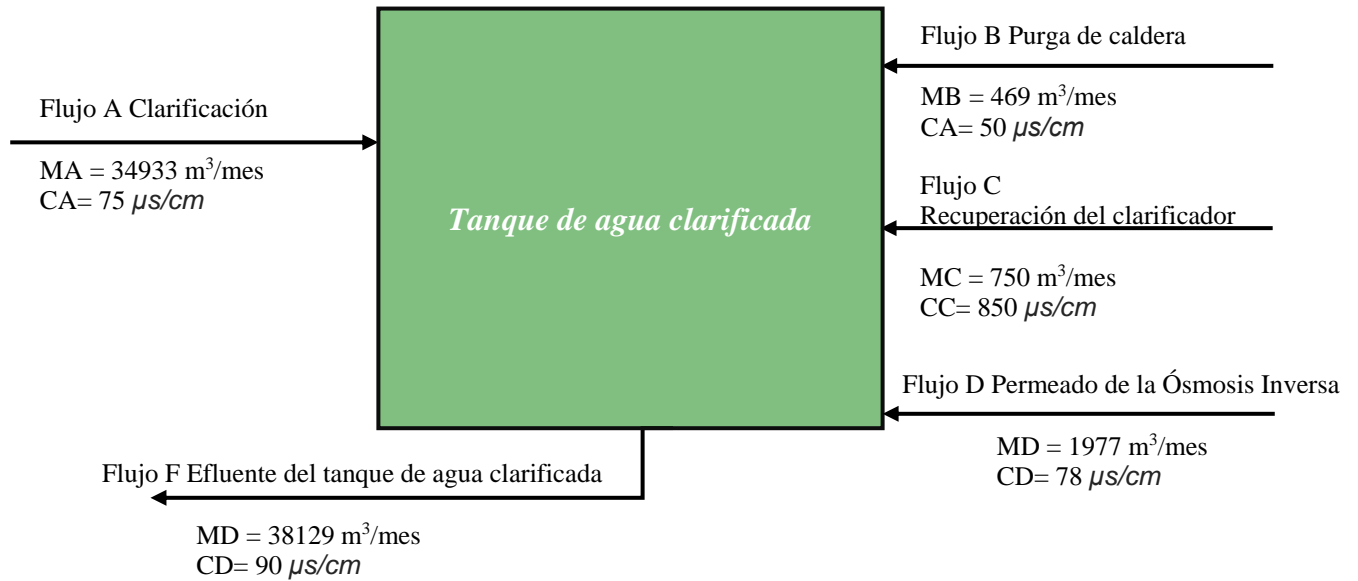


Figura 40. Balance másico para la recuperación de la purga de caldera, clarificador y permeado del sistema de ósmosis inversa al tanque de agua clarificada.

Fuente: Autores

$$(MA * CA) + (MB * CA) + (MC * CC) + (MD * CD) = (MF * CF)$$

En donde:

MA= Masa del flujo A
 MB= Masa del flujo B
 MC= Masa del flujo C
 MD= Masa del flujo D
 MF= Masa del flujo F

CA= Concentración del flujo A
 CB= Concentración del flujo B
 CC= Concentración del flujo C
 CD= Concentración del flujo D
 CF = Concentración del flujo F

Despejando CF:

$$\frac{(MA * CA) + (MB * CA) + (MC * CC) + (MD * CD)}{MF} = CF$$

$$\frac{\left(34.933 \frac{m^3}{mes} * 75 \frac{\mu S}{cm}\right) + \left(469 \frac{m^3}{mes} * 50 \frac{\mu S}{cm}\right) + \left(750 \frac{m^3}{mes} * 850 \frac{\mu S}{cm}\right) + \left(1977 \frac{m^3}{mes} * 78 \frac{\mu S}{cm}\right)}{38.129 \frac{m^3}{mes}} = 90,0 \frac{\mu S}{cm}$$