

**EVALUACIÓN DE EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE SÍLICE MEDIANTE
INTERCAMBIO IÓNICO EN LA TERMOELÉCTRICA TERMOCOA,
VILLAVICENCIO**

EDWARD LINARES PEÑA

LUISA FERNANDA RODRIGUEZ ROLDAN

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2018

**EVALUACIÓN DE EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE SÍLICE MEDIANTE
INTERCAMBIO IÓNICO EN LA TERMOELÉCTRICA TERMOCOA,
VILLAVICENCIO**

EDWARD LINARES PEÑA

LUISA FERNANDA RODRIGUEZ ROLDAN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingenieros ambientales

Asesor

HENRY CONTRERAS LEÓN

Ingeniero ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2018

Autoridades académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMACA, O. P

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P

Rector Sede Villavicencio

P. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

HENRY CONTRETAS LEÓN

Director Trabajo de Grado

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Jurado

CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ

Jurado

Villavicencio, octubre 2018

Papá, mi gran ejemplo a seguir y orgullo, fuiste la persona que me impulsaba a soñar sin importar lo lejanos que parecieran mis sueños, a proponerme metas que me obligaban a superar mis límites una y otra vez y a tomar la vida con calma pero responsabilidad, me enseñaste sobre paciencia, comprensión, tolerancia y tenacidad; te amo, admiro y respeto.

Mamá, tu ejemplo me enseñó sobre el respeto a los demás, a ser racional en mis decisiones, a comprender y apoyar a los demás y sobre todo a defender mis principios y no callar ante una injusticia; todo con el amor que solo una madre puede brindar y que yo siempre atesoraré.

Edward, gracias por acompañarme en este camino, apoyarme a superar mis falencias y otorgarme el placer de conocer tu curiosa mente que siempre busca la respuesta a los por qué de la vida.

Luisa Rodríguez.

A Dios y a María Santísima, por haberme dado salud, fortaleza y paciencia para lograr cumplir uno a uno mis objetivos en el alcance de esta nueva meta de mi vida.

A mi madre, por su incondicionalidad y su amor infinito, por su esfuerzo, entrega y dedicación en su trabajo para poder brindarme una excelente formación académica e integral, por ser mi amiga y compañera, por inculcarme grandes valores y a disfrutar cada momento de la vida, por brindarme esa voz de aliento cuando más lo necesitaba, por corregirme, aconsejarme y motivarme en cada paso que daba, pero, sobre todo, por ser mi ejemplo a seguir.

A Norge Rodríguez, por haberme enseñado a través del propio ejemplo a manejar y sobrellevar los afares de la vida con mucha paciencia, calma y serenidad, pero sobre todo con alegría y responsabilidad, además de mostrarme la riqueza que hay en aprender algo nuevo todos los días.

A Luisa Rodríguez, por el cariño brindado, por permitirme conocer en ella la humildad y la sencillez acompañado de un carácter fuerte forjado y enfocado a grandes metas y propósitos de vida.

Edward Linares.

Agradecimientos

Para lograr la culminación de este proyecto tuvimos que pasar por diferentes pruebas que incluían unos cuantos tropiezos, por lo tanto, agradecemos a Dios por darnos la fortaleza, paciencia y sabiduría para alcanzar una de tantas metas de nuestras vidas.

Agradecemos por el apoyo y confianza de increíbles personas, como el Ing. Antonio Valderrama que nos abrió las puertas de la técnica para el desarrollo de este proyecto, el Ing. Oscar Ricardo Méndez, que además de ser un gran profesional, digno de respetar y admirar, tiene una calidad humana sin igual, el Ing. William Amado por sus conocimientos aportados en nuestro proyecto, el Ing. Oscar Hernández y el Ing. Andrés Grajales, que nos brindaron la logística necesaria para el correcto desarrollo del trabajo y finalmente los operarios de la planta de tratamiento Adolfo, Edwin, Gonzalo, Jorge Obed, Pescador y Yerman, que estaban siempre prestos a cualquier duda que surgiera o apoyo en la manipulación de equipos e instalaciones.

También agradecemos sinceramente al Ing. Harold Bastidas por el apoyo que nos brindó en un momento crucial de nuestra investigación, permitiéndonos conocer su amor por la enseñanza al momento de formar personas de bien basados en el valor del servicio y la gratitud.

Finalmente extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás y su equipo docente ya que fueron los *Facientes Veritatem* en la construcción de nuestros conocimientos; al Ing. Henry Contreras, director de esta investigación, por su guía, compromiso y empeño en todas sus asesorías, demostrándonos sus grandes conocimientos en la rama ingenieril, siendo para nosotros un ejemplo a seguir en la vida laboral que vamos a emprender; al enfrentar nuevos retos que le permitieron descubrir su vocación para la enseñanza al pasar de aplicar sus conocimientos a compartirlos con sus estudiantes.

Contenido

Resumen.....	14
Introducción	16
Capítulo I: Zona de Estudio	17
Planteamiento del problema.....	17
Descripción del Problema	17
Formulación en Torno al Problema.....	17
Objetivos	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos.....	18
Justificación	19
Alcance	20
Delimitación Espacio-Temporal	20
Capítulo II: Fundamentación Teórica	22
Antecedentes	22
Marco de Referencia	26
Marco Teórico	26
Marco Conceptual	29
Espectrofotómetro.	29
Conductividad.....	29
Turbiedad.....	29
pH.	29
Hierro.....	30
Sílice.	30
Membrana semipermeable.....	30
Producto o permeado.	31
Rechazo.	31
Tratamientos terciarios.	31
Resinas.....	31
Agua ultra pura.	32
ANOVA.....	32

R ² y R ² ajustado.....	32
Distribución normal Z.	32
Matriz de decisión.	33
Marco Legal	33
Capítulo III: Proceso Metodológico.....	34
Fase 1. Revisión Histórica de Parámetros Fisicoquímicos	34
Fase 2. Tratamientos Experimentales.....	35
Fase 3. Modificaciones.....	38
Capítulo IV: Procesamiento y Análisis de Resultados	39
Resultados y Análisis.....	39
Revisión Histórica de Parámetros Fisicoquímicos.....	39
Análisis de representatividad.....	39
Análisis de confiabilidad.	43
Análisis de las probabilidades futuras.	46
Tratamientos Experimentales.....	56
Sílice.....	56
Hierro.....	59
Turbiedad.....	61
Conductividad.....	63
pH.	65
Comparación del mejor escenario con el escenario de control.	68
Comparación de tratamientos de acuerdo con el porcentaje de remoción.	70
Modificaciones.....	71
Conclusiones.....	79
Discusión y Recomendaciones	81
Referencias Bibliográficas.....	83
Anexos	87

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio en las coordenadas 4° 4.748'N y 73° 41.240'O	20
Figura 2. Numero de documentos publicados por año en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología.	22
Figura 3. Numero de documentos publicados por área temática en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología.....	23
Figura 4. Numero de documentos publicados por autor en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología	24
Figura 5. Numero de documentos publicados por país/territorio en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología.....	25
Figura 6. Diagrama de flujo metodología	34
Figura 7. Porcentaje de representatividad promedio del sistema por etapas	42
Figura 8. Porcentaje de confiabilidad promedio del sistema por etapas.....	44
Figura 9. Efecto de interacción para sílice.....	58
Figura 10. Efecto de interacción para hierro.....	60
Figura 11. Efecto de interacción para turbiedad	62
Figura 12. Efecto de interacción para conductividad.....	64
Figura 13. Efecto de interacción para pH	66
Figura 14. Comportamiento de parámetros con el mejor escenario y el usual.	69

Lista de tablas

Tabla 1. Variables a utilizar en el modelo	36
Tabla 2. Diseño factorial 2x2.....	37
Tabla 3. Matriz de decisión.....	38
Tabla 4. Promedio de rondas reportadas.....	39
Tabla 5. Interpolación de demanda de agua.....	40
Tabla 6. Porcentaje de Representatividad de Parámetros Registrados	41
Tabla 7. Porcentaje de Confiabilidad de Parámetros Registrados	43
Tabla 8. Planteamiento de hipótesis nula y alternativa (Ho y Ha).....	47
Tabla 9. Porcentajes de probabilidad para Color Real.....	47
Tabla 10. Porcentajes de probabilidad para Dureza.....	48
Tabla 11. Porcentajes de probabilidad para Sulfatos	48
Tabla 12. Porcentajes de probabilidad para Resistividad	48
Tabla 13. Porcentajes de probabilidad para Temperatura.....	49
Tabla 14. Porcentajes de probabilidad para Sólidos en Suspensión	50
Tabla 15. Porcentajes de probabilidad para Cloro Libre	50
Tabla 16. Porcentajes de probabilidad para Alcalinidad Total	51
Tabla 17. Porcentajes de probabilidad para Cloruros	51
Tabla 18. Porcentajes de probabilidad para CO ₂	52
Tabla 19. Porcentajes de probabilidad para Sílice	52
Tabla 20. Porcentajes de probabilidad para Conductividad.....	53
Tabla 21. Porcentajes de probabilidad para pH	54
Tabla 22. Porcentajes de probabilidad para Hierro Total	55
Tabla 23. Porcentajes de probabilidad para Turbiedad.....	55
Tabla 24. R ² y R ² ajustado para sílice.....	57
Tabla 25. ANOVA para sílice.....	57
Tabla 26. Comparaciones múltiples para Sílice - Test de Duncan	59
Tabla 27. R ² y R ² ajustado para hierro.....	59
Tabla 28. ANOVA para hierro.....	60
Tabla 29. Comparaciones múltiples para Hierro - Test de Duncan.....	61
Tabla 30. R ² y R ² ajustado para turbiedad	61

Tabla 31. ANOVA para turbiedad	62
Tabla 32. Comparaciones múltiples para Turbiedad - Test de Duncan.....	63
Tabla 33. R^2 y R^2 ajustado para conductividad.....	63
Tabla 34. ANOVA para conductividad	64
Tabla 35. Comparaciones múltiples para Conductividad - Test de Duncan.....	65
Tabla 36. R^2 y R^2 ajustado para pH	65
Tabla 37. ANOVA para pH	66
Tabla 38. Comparaciones múltiples para pH - Test de Duncan	67
Tabla 39. % de remoción en el sistema de intercambio iónico.....	70
Tabla 40. Matriz de decisión.....	71

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Porcentaje de representatividad por parámetro	35
Ecuación 2. Porcentaje de confiabilidad por parámetro	35
Ecuación 3. Fórmula para la distribución normal Z	35

Lista de anexos

Anexo 1. Parámetros evaluados por etapa	87
Anexo 2. Tren de desmineralización	90
Anexo 3. Diagrama de proceso del STAI	91
Anexo 4. Registro fotográfico tren de desmineralización	92
Anexo 5. Registro fotográfico toma de muestras.....	93
Anexo 6. Registro fotográfico análisis de laboratorio	94
Anexo 7. Tablas de ANOVA para el parámetro de sílice en cada punto de muestreo	94
Anexo 8. Tablas de ANOVA para el parámetro de hierro en cada punto de muestreo	96
Anexo 9. Tablas de ANOVA para el parámetro de turbiedad en cada punto de muestreo	99
Anexo 10. Tablas de ANOVA para el parámetro de conductividad en cada punto de muestreo	101
Anexo 11. Tablas de ANOVA para el parámetro de pH en cada punto de muestreo.....	103
Anexo 12. Lista de control de asistencia	105
Anexo 13. Registro fotográfico asistentes al taller de evaluación técnico-económico-ambiental	106
Anexo 14. Instructivo de tratamientos experimentales.....	106

Resumen

La creciente demanda de agua con características de alta pureza en la industria termoeléctrica yace en evitar un aumento en los costos de operación, mantenimiento, consumo de energía y recursos, ocasionados por la formación de incrustaciones de compuestos de difícil remoción como la sílice en los ductos, módulos o placas de las máquinas y equipos encargados de la generación de energía eléctrica; se realizó una evaluación de la efectividad de remoción de sílice mediante la tecnología de intercambio iónico en la Termoeléctrica de Ocoa en Villavicencio-Meta con el fin de plantear las modificaciones que se deben realizar al Sistema de Tratamiento de Agua Industrial (STAI) para que garantice un agua con características de alta pureza; desarrollando un análisis estadístico de representatividad, confiabilidad del sistema y probabilidades futuras de acuerdo a la revisión histórica de los parámetros fisicoquímicos en los últimos tres años (2015 al 2017) para determinar el estado actual del STAI; se establecieron 5 tratamientos para la operación del tren de desmineralización variando caudales y presiones: T1 (250 a 270GPM & 40PSI), T2 (250 a 270GPM & 80PSI), T3 (117 a 140GPM & 40PSI), T4 (117 a 140GPM & 80PSI), T5 (274 a 278GPM & 64 a 73PSI) obteniendo 150 datos para cada tratamiento (6 submuestras * 5 parámetros * 5 puntos de muestreo) y utilizando la metodología de ANOVA no paramétrico de dos vías y el estadístico de Duncan se identificaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, teniendo en cuenta como variables de respuesta conductividad, pH, sílice, hierro y turbiedad, y se cuantifico la capacidad de remoción de los mismos; finalmente, se desarrolló un taller de diagnóstico técnico-económico-ambiental con participación del personal de la empresa mediante una matriz de decisión para identificar la tecnología que más se ajusta a las necesidades de la industria; como resultado, se evidencio que el STAI con que cuenta la empresa no es confiable al menguar su eficiencia con el paso del tiempo, los parámetros evaluados mostraron diferencias estadísticas significativas siendo el T4 el que mejor se ajusta a las condiciones operacionales requeridas, con una efectividad de remoción de sílice del 98,14%, hierro 0%, turbiedad 31,25% y conductividad 97,87%, sin embargo, con el desarrollo del taller se concluyó que lo más recomendable es implementar un sistema de tecnologías en conjunto de osmosis inversa seguido de una electrodiálisis ya que es más favorable para la salud y seguridad de los trabajadores, representa una mayor confiabilidad del sistema, menor impacto ambiental, menor requerimiento en control y análisis, entre otros.

Palabras clave: Termoeléctrica, sales disueltas, caudal, presión

Abstract

The growing demand for water with characteristics of high purity in the thermoelectric industry lies in avoiding an increase in the costs of operation, maintenance, energy consumption and resources, caused by the formation of incrustations of compounds difficult to remove such as silica in the pipelines, modules or plates of the machines and equipment responsible for the generation of electric power; an evaluation of the effectiveness of silica removal was carried out using the ion exchange technology in the Ocoa Thermoelectric Plant in Villavicencio-Meta in order to propose the modifications that must be made to the Industrial Water Treatment System (STAI) to guarantee a water with high purity characteristics; developing a statistical analysis of representativeness, reliability of the system and future probabilities according to the historical review of the physicochemical parameters in the last three years (2015 to 2017) to determine the current status of the STAI; 5 treatments were established for the demineralization train operation varying flow rates and pressures: T1 (250 to 270GPM & 40PSI), T2 (250 to 270GPM & 80PSI), T3 (117 to 140GPM & 40PSI), T4 (117 to 140GPM & 80PSI), T5 (274 to 278GPM & 64 to 73PSI) obtaining 150 data for each treatment (6 sub-samples * 5 parameters * 5 sampling points) and using the non-parametric two-way ANOVA methodology and the Duncan statistic statistical differences were identified significant among treatments, taking into account as variables of response conductivity, pH, silica, iron and turbidity, and the capacity of removal of them was quantified; finally, a technical-economic-environmental diagnostic workshop was held with the participation of the company's personnel through a decision matrix to identify the technology that best suits the needs of the industry; as a result, it was evidenced that the STAI that the company has is not reliable as its efficiency diminishes over time, the parameters evaluated showed significant statistical differences, being the T4 the one that best adjusts to the required operational conditions, with an effectiveness of removal of silica of 98.14%, iron 0%, turbidity 31.25% and conductivity 97.87%, however, with the development of the workshop it was concluded that the most advisable is to implement a system of technologies together with osmosis Inverse followed by electrodialysis since it is more favorable for the health and safety of workers, represents a greater reliability of the system, lower environmental impact, less requirement in control and analysis, among others.

Keywords: Thermoelectric, dissolved salts, flow, pressure

Introducción

La presente investigación tiene como pilar el tratamiento de agua cruda para uso industrial en el sector energético (termoeléctrica), esta surge por la necesidad de optimizar los sistemas de tratamiento para garantizar la obtención de agua con características de alta pureza con que se abastecen las diferentes y complejas máquinas y equipos utilizados en procesos esenciales para la generación de energía eléctrica.

La complejidad de los sistemas de tratamiento de agua varía de acuerdo a los requerimientos de la industria y la calidad del agua con que se abastece el sistema, sin embargo, cuando se habla de tratamientos para la obtención de agua con características de alta calidad, se hace referencia a tecnologías capaces de remover los sólidos disueltos en la misma; para este caso de estudio en particular, se estudiará la efectividad de remoción de sílice disuelto en el agua mediante la tecnología de intercambio iónico, ya que es el sistema con que cuenta actualmente la termoeléctrica.

La importancia de la efectividad de las diferentes tecnologías utilizadas para la remoción de sólidos disueltos en el agua se deriva de diferentes problemáticas que presentan los equipos y máquinas generados por la incrustación, corrosión y estancamientos dentro de los ductos, módulos o placas de los mismos, aumentando no solo los costos de operación y mantenimiento, sino también en consumo de energía y recursos (Torrez, 2011), a los cuales se ha tenido que enfrentar la Termoeléctrica de Ocoa por la complejidad de remoción de algunos compuestos como la sílice, ocasionando una oferta de energía eléctrica limitada, en un sector en donde la demanda de la misma crece exponencialmente.

La evaluación de la efectividad de remoción de sílice mediante intercambio iónico implicó diversos procesos experimentales en donde se variaron caudales y presiones a unos niveles máximos y mínimos controlados, involucrando principios matemáticos para fundamentar verazmente los métodos analíticos utilizados en la evaluación de la tecnología de intercambio iónico frente a otras disponibles en el mercado partiendo de criterios técnicos y económicos, de tal manera que permita facilitar la toma de decisiones a nivel industrial de acuerdo a las requeridas.

Capítulo I: Zona de Estudio

Planteamiento del problema

Descripción del Problema

Dentro de los diferentes tipos de procesos industriales, existen algunos que demandan recursos con características específicas para que sean llevados a cabo de manera efectiva y eficaz; para el caso de la Termoeléctrica de Ocoa, el recurso hídrico, es vital en el correcto funcionamiento de los equipos diseñados que permiten la generación de energía eléctrica; sin embargo, debido a la complejidad de estos equipos y los diferentes procesos allí realizados, el proceso de generación de energía eléctrica por medio de generadores debe efectuar un tratamiento previo al agua usada para la generación de vapor implementando tecnologías avanzadas como el intercambio iónico, la cual sirve para la remoción de sales; no obstante, esta tecnología no es la más efectiva, ya que este tipo de industria requiere utilizar agua con características de alta pureza (Gomez & Sabugal, 2006). Lo anterior, es debido a la presencia de algunos compuestos disueltos en el agua que son de difícil remoción procedentes de la contaminación del agua con los minerales de la tierra que entra en contacto con esta; específicamente la sílice (Medina, 2000), la cual, a pesar de presentarse en unas mínimas concentraciones, es un inconveniente por los grandes volúmenes de agua allí utilizados, haciendo que disminuya de manera significativa la efectividad de procesos valiosos como la electrodesionización, además de la vida útil de algunos equipos, por la acumulación de este compuesto en los ductos, módulos o placas de los mismos, aumentando no solo los costos de operación y mantenimiento, sino también en consumo de energía y recursos (Torrez, 2011).

Formulación en Torno al Problema

De acuerdo con la explicación dada anteriormente se realiza la siguiente pregunta problema: ¿Cómo varía el porcentaje de remoción de sílice disuelta en el agua en el sistema de intercambio iónico en la Termoeléctrica de Ocoa operando bajo 5 escenarios de caudales y presiones máximas y mínimas controladas, desarrolladas dentro de un periodo de 4 meses?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la eficiencia de remoción de sílice en el agua mediante el intercambio iónico bajo 5 escenarios, variando caudales y presiones para la optimización del sistema de tratamiento en la Termoeléctrica Termocoa ubicada en Villavicencio Meta.

Objetivos Específicos

- I. Analizar los datos históricos de los parámetros fisicoquímicos del estado de la planta de tratamiento durante los últimos 3 años
- II. Cuantificar la capacidad de remoción de sílice del sistema de intercambio iónico mediante 5 tratamientos para la operación de caudal y presión en sus condiciones máximas y mínimas
- III. Plantear las modificaciones que serían necesarias de implementar para garantizar la calidad del agua de carga a la Termoeléctrica de Ocoa.

Justificación

Termoeléctrica de Ocoa se empeña en mejorar continuamente los procesos necesarios para el correcto funcionamiento de su industria como generador de energía eléctrica, por lo cual, ha sido preciso realizar cambios o adaptaciones al sistema de la planta. Este tipo de ajustes, han dado como resultado, que se requiera un suministro de agua con características específicas de alta pureza, pero, el afluente con el que se abastece la planta no cuenta con este tipo de características, motivo por el que se realiza un tratamiento previo a la misma antes de ser suministrada a procesos importantes; no obstante, el tipo de tratamiento utilizado actualmente no es el más efectivo, ya que, esta agua contiene diferentes compuestos de difícil remoción, como lo es la sílice, que, al no ser removida completamente va menoscabando el funcionamiento óptimo en todo el sistema de la planta Termoeléctrica de Ocoa, ocasionando pérdidas económicas a las que debe hacer frente la empresa. Sin embargo, existen diferentes métodos de tratamiento que permiten optimizar el proceso industrial de tal manera que, evite pérdidas económicas y facilite el proceso de tratamiento.

La propuesta consiste en la evaluación del estado del sistema de tratamiento de agua industrial para determinar si el sistema requiere modificaciones operativas o si requiere una sustitución tecnológica para llegar a niveles operativos óptimos mediante la evaluación de diferentes tecnologías que sean técnica y económicamente viables de aplicar al sistema, considerando la probabilidad de sustitución de algún tratamiento que no resulte necesario.

Alcance

Delimitación Espacio-Temporal

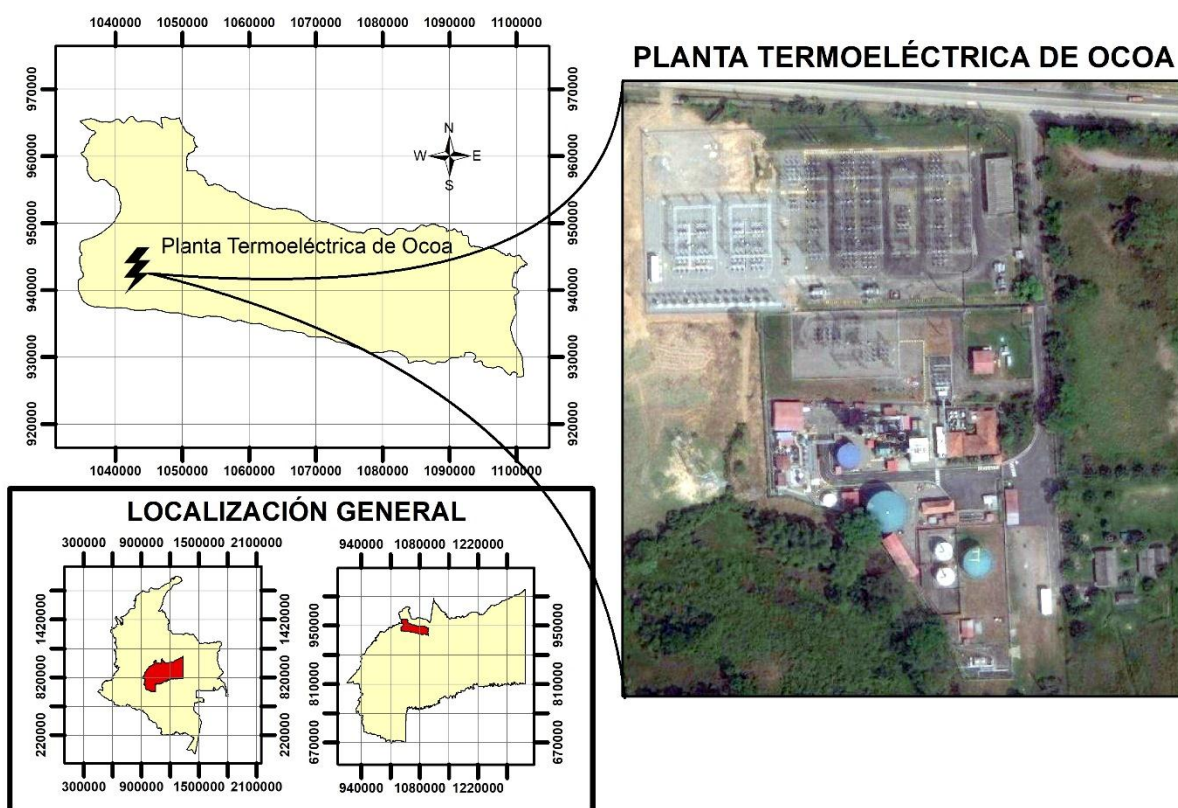


Figura 1. Ubicación del área de estudio en las coordenadas $4^{\circ} 4.748'N$ y $73^{\circ} 41.240'O$, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

La planta Termoeléctrica de Ocoa se encuentra ubicada en el kilómetro 7 vía Acacias, en el municipio de Villavicencio, Meta. Se fundó en el año 1993 en respuesta a la crisis energética que enfrentaba Colombia en el año 1992, funcionando inicialmente con ACPM como suministro de energía. Sin embargo, en junio de 1995 se cuenta con la infraestructura del gasoducto desde Cusiana pasando por Ecopetrol Apiay proveyendo a la unidad gas natural para la generación de energía a partir del 23 de julio de 1995 y al momento de restablecerse de manera normal el suministro de energía en el país, esta quedó como fuente de respaldo hasta el año 1997 que paró su actividad completamente (Mendez, 2017).

En el año 2005 Ecopetrol realizó un estudio de expansión con el cual lograron determinar que para el desarrollo de este nuevo proyecto, demandarían un mayor suministro de energía eléctrica, dando como resultado la adquisición de la Termoeléctrica de Ocoa en el año 2009, la cual

generaba 8 MW en su etapa inicial, con los que abastecía a los campos petrolíferos ubicados en Chichimene, Castilla y Villavicencio (Mendez, 2017).

En el año 2012 Ecopetrol instaló el sistema de electrodesionización debido a que había una nueva tecnología de inyección de agua atomizada a turbinas que presentaba unos requisitos para el agua de inyección con el fin de no dañar internamente la turbina; este cambio de tecnologías se dio debido a que hubo un aumento en la demanda de agua inyectada a la turbina para así generar más potencia eléctrica aportada al sistema eléctrico de Ecopetrol, suministrada a los campos Chichimene, Castilla y Suria que trabajan con bombas eléctricas con el fin de extraer crudo; de esta manera la Termoeléctrica de Ocoa cuenta actualmente con una capacidad de generación de 40 MW (Mendez, 2017).

Teniendo en cuenta los avances tecnológicos que ha sufrido la empresa y la constante evolución de las tecnologías para los sistemas de tratamiento de agua a nivel mundial que se están gestando actualmente, se considera necesaria la optimización de la planta de tratamiento de la Termoeléctrica de Ocoa para así ampliar su capacidad de generación de energía y de la misma manera reducir su dependencia de la empresa EMSA S.A. ESP, quien les suministra un porcentaje de energía, y aumentar la producción de la empresa Ecopetrol (Mendez, 2017).

Por lo anterior se realizará una evaluación de la efectividad de la remoción de sílice mediante intercambio iónico durante un periodo de cuatro meses, partiendo de información secundaria suministrada por la termoeléctrica sobre las variables pH, sílice, hierro, conductividad y turbiedad recopilada durante los últimos tres años; e información primaria sobre el comportamiento de estas, variando caudales y presiones en la fase experimental desarrollada en un intervalo de dos meses.

Capítulo II: Fundamentación Teórica

Antecedentes

De acuerdo con la revisión realizada a partir de la palabra clave “tratamiento de agua industrial” relacionada con cada una de las tecnologías a estudiar (intercambio iónico, ósmosis inversa y electrodiálisis), se determinó que:

Si bien las investigaciones de cada tecnología tuvieron sus inicios hace décadas, datando la ósmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (EDI) como las investigaciones más antiguas (1912) y el intercambio iónico (II) como el más reciente (1956); se puede apreciar que solo hasta 1969 se da una actividad investigativa juiciosa sobre el tema en cuestión, y es hasta la década del noventa que hay un auge vertiginoso en investigaciones de OI y EDI (Figura 2). También se puede apreciar por la cantidad de documentos que la tecnología menos estudiada en comparación con las otras dos es el intercambio iónico con un total de 1389 desde los inicios de su investigación; por otro lado no se encuentra gran diferencia en el número de documentos entre OI (37256 documentos) y EDI (36051 documentos), esto debido posiblemente a que ambas tecnologías iniciaron a ser estudiadas en la misma fecha y antes de iniciar a ser estudiado el intercambio iónico. Adicionalmente, una posible razón de la diferencia abismal en número de investigaciones sea la eficiencia energética y requerimiento de espacio que tienen la ósmosis inversa y la electrodiálisis con relación al intercambio iónico (Medina, 2000).

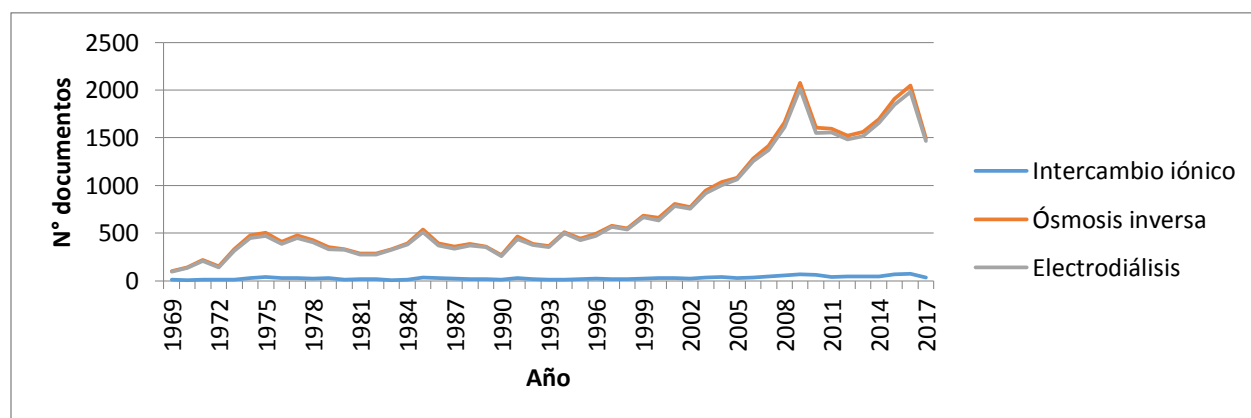


Figura 2. Numero de documentos publicados por año en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018, con base en la información plasmada por Scopus.

Teniendo en cuenta que los estudios de las tecnologías en cuestión pueden abarcar muchas actividades económicas pero el principio operativo es el mismo se puede determinar que el área temática que presenta mayor variedad de información de cada tecnología es “Farmacología, Toxicología y Farmacia” seguida por “Ciencias de la computación” que si bien se esperaría este resultado de la primera área temática, no es el caso de la segunda ya que este no tiene gran relevancia en el tema en comparación con la primera área temática (Figura 3).

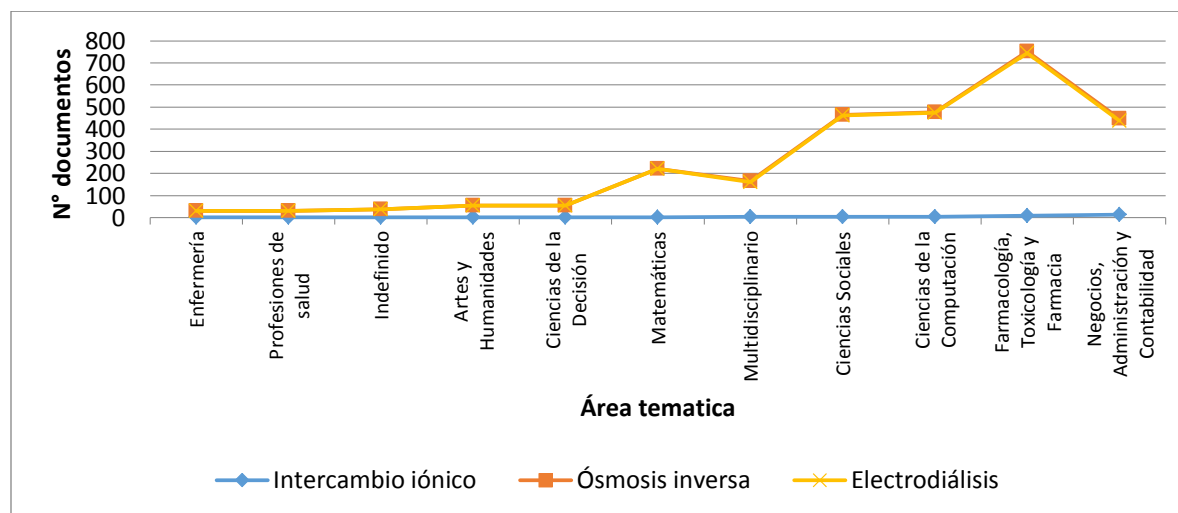


Figura 3. Numero de documentos publicados por área temática en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018, con base en la información plasmada por Scopus.

Adicionalmente se puede inferir que el autor más citado en la investigación de las tres tecnologías es Anon ya que presenta el mayor número de documentos publicados y le conferiría veracidad a la información citada en caso de traerlo a colación en algún trabajo (Figura 4).

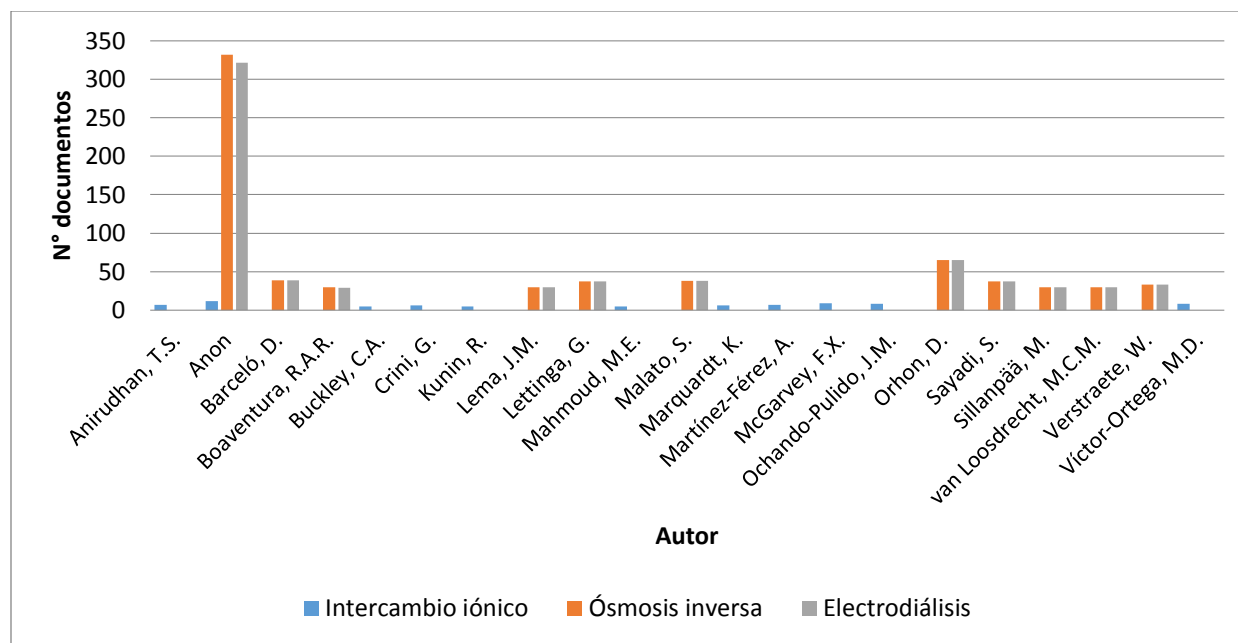


Figura 4. Numero de documentos publicados por autor en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018, con base en la información plasmada por Scopus.

Finalmente a nivel internacional se obtuvo que el país con más publicaciones es Estados Unidos, esto debido a que hace parte de las potencias mundiales y es un país pionero en grandes áreas del conocimiento, además de la tecnología avanzada con la que cuentan en comparación con otros países como Colombia, que si bien no alcanza a estar dentro de los 10 países con mayor número de publicaciones si cuenta con 104 publicaciones referentes a OI y 104 publicaciones referentes a EDI (Figura 5).

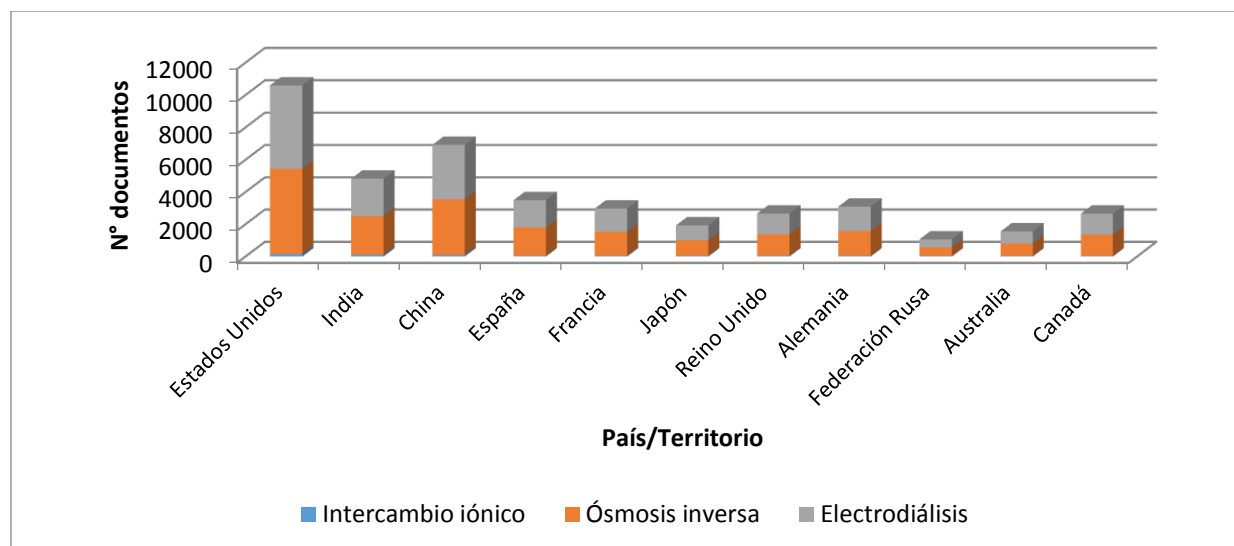


Figura 5. Numero de documentos publicados por país/territorio en relación con tratamiento de agua industrial y cada tecnología, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018, con base en la información plasmada por Scopus.

De acuerdo con los resultados anteriores se puede concluir que se cuenta con una base de datos bastante completa concerniente a OI y EDI, sin embargo, un factor recurrente fue el bajo número de publicaciones sobre intercambio iónico, lo cual representa una limitante para la investigación. Otro patrón recurrente es la cantidad de datos relacionados a OI y EDI, sin importar la dependencia por la que se agrupan los datos se puede apreciar que ambas tecnologías manejan un volumen similar de datos, lo que lleva a inferir que ambas tecnologías se encuentran intrínsecamente relacionadas y son tema de investigación de igual importancia.

En el ámbito local se puede tomar como referente la Termoeléctrica de Suria, perteneciente a la misma empresa Ecopetrol, la cual implementa un sistema de tratamiento de agua industrial afín a la planta objeto de estudio, sin embargo, esta cuenta con la tecnología de ósmosis inversa en sustitución del intercambio iónico para dar solución a problemas como el alto consumo de químicos para la remoción de sales disueltas en el agua proveniente de fuentes subterráneas con la cual se abastece la planta.

Marco de Referencia

Marco Teórico

La calidad del agua depende de la variedad y cantidad (concentración) de elementos y compuestos químicos presentes en la misma a los cuales se les denomina sólidos disueltos, estos, reciben el nombre de impurezas cuando son de origen natural y contaminantes cuando son de origen antropogénico (De la Cruz, Nápoles, & Santana, 2012).

Los usos del agua obedecen a las características de esta, sin embargo, para el uso a nivel industrial el agua no siempre cumple con los parámetros de calidad requeridos; por esto, los esfuerzos sustanciales de la industria, así como de los diseñadores de procesos y equipos, han dado lugar a muchos desarrollos innovadores (Dunne, Norris, & Mathewson, 2006), respecto al tipo de tratamiento y/o tecnologías a implementar para la obtención de agua con características específicas de calidad, debido a que generalmente los problemas originados a nivel industrial por el agua que es empleada en diversas operaciones como calentamiento, enfriamiento, generación de vapor, entre otros, pueden ser causados en gran medida por la variedad y concentración de sólidos disueltos, así como gases, contenidos en el agua de acuerdo a su procedencia (Menéndez & Pire, 2015).

Un primer trabajo corresponde a Díaz (2004), quien realizó un estudio de: “Influencia de las concentraciones de Sólidos solubles std (Ca, Mg y SiO₂) en la calidad del agua utilizada en las calderas de la central termoeléctrica trinitaria”, en donde se buscó determinar los problemas en la central termoeléctrica causados por la ineficiencia del sistema de tratamiento de agua respecto a los sólidos disueltos (Díaz & Enma, 2004). Este trabajo es pertinente con la investigación, debido a que no solo muestra los problemas del sistema de tratamiento de agua, sino también los costos en los que incurre la industria a causa de la limpieza y mantenimiento de la maquinaria y equipos, producto del deterioro de los mismos, por incrustaciones, corrosión, estancamientos, entre otros; además de otro tipo de inconvenientes generados por no realizar una ponderación previa de condiciones ideales de los diferentes parámetros fisicoquímicos durante cada etapa que compone el sistema de tratamiento de agua.

Otro estudio relevante, esta vez realizado por Gélover, Gutiérrez, & Martín, en 2016, titulado “Remoción De Sílice, En Agua, Mediante Electrogenación De Aluminio”, busco reducir el

volumen de sílice incrustado en torres de enfriamiento, utilizando tres sistemas electroquímicos con aluminio como agente coagulante; sin embargo los resultados obtenidos mostraron que por cada parte de sílice, se requieren cuatro partes de aluminio, además de que el sistema más efectivo solo logro remover un 66% de la concentración de dicho compuesto, concluyendo la inviabilidad de implementación de estos sistemas en industrias que demanden grandes volúmenes de agua por la cantidad de agentes químicos y energía requerida para su funcionamiento (Gélover, *et al*, 2016).

Debido a este tipo de resultados, es necesario profundizar un poco sobre tecnologías aptas para la remoción de sales disueltas, como la sílice, ya que, esta representa uno de los componentes más persistentes y perjudiciales para los procesos de tipo industrial.

Dentro de las tecnologías existentes en el mercado actual y más eficiente para la desmineralización del agua, se destacan según la literatura, la ósmosis inversa, la electrodiálisis e intercambio iónico.

La ósmosis inversa (OI) es una tecnología de membrana semipermeable diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular por la cual el solvente (agua) es transferido a través de dicha membrana inyectándole presión (Medina, 2000).

La electrodiálisis emplea una combinación de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas y una corriente eléctrica continua entre dos electrodos (cátodo y ánodo) para desionizar el agua, separando las moléculas o iones en un campo eléctrico debido a la diferencia de carga y de velocidad de transporte a través de la membrana (Guerrero, Roca, & Sanz, 2006).

El intercambio iónico es un proceso que tiene por objeto la eliminación de los iones del agua para uso industrial u otras actividades donde un ion es sustituido o intercambiado por otro de la misma carga, este proceso es utilizado tanto para la extracción de disolventes sólidos en el agua como para tratar la dureza de esta (Cabezas, 2012).

Un estudio realizado en Chile por Gallego *et al*, s.f., titulado “Evaluación De Diferentes Estrategias Para La Optimización De La Operación En Sistemas De Ósmosis Inversa Con Altas Concentraciones de Sílice (SiO₂) En La Planta Desaladora De Arica (Chile)”, desarrolló una revisión multitemporal de una planta desaladora de agua entre el periodo 1998-2009, para

determinar las estrategias asociadas a la reducción de costos de mantenimiento de membranas a causa de incrustaciones de sílice en las mismas; esta metodología de análisis, permitió mostrar que la reducción de los costos de mantenimiento se debía a la compra de un antiincrustante específico para la sílice desarrollado por laboratorios Genesys Membrane Products en Madrid (España), el cual era dosificado en la etapa previa a la ósmosis inversa, para este caso, un lecho de arena filtrante; generando una reducción de 12 a 1 las intervenciones de mantenimiento anuales (Del Vigo, Gallego, Ordóñez, Shang, & Valdivia).

Este tipo de estudios y metodologías, facilitan el planteamiento de nuevas estrategias para evaluar técnica y económicamente las tecnologías aplicadas a sistemas de tratamiento de agua, evitando obsolescencia dentro del sistema y aumentando la eficiencia de este.

Por otra parte, en 2009, Nevárez, en su Tesis titulada “Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de la refinería estatal Esmeraldas – Ecuador”, para la obtención del título como Ingeniera Química, busca reducir el consumo de regenerante y una elevada calidad final del agua, para suministrarla como vapor de agua a diferentes operaciones de refinación de petróleo, y así evitar problemas de incrustaciones dentro de las calderas (Nevárez, 2009).

Al variar las concentraciones del regenerante de las resinas a nivel de laboratorio, logra concluir que, al disminuir la concentración del mismo de 0,75N a 0,65 N, la concentración de sílice se reduce desde 32,01 hasta un 0,05 ppm, además de que un mantenimiento periódico a los equipos y bombas utilizadas reduce costos en las cantidades de insumos químicos requeridos (Nevárez, 2009). El desarrollo de este trabajo es relevante ya que muestra que el rendimiento de las tecnologías implementadas para el tratamiento, ya que pueden aumentar significativamente la eficiencia teniendo en cuenta variables o procesos anteriores a la misma.

Por todo esto, es importante efectuar evaluaciones técnicas y económicamente, periódicamente a los sistemas de tratamiento de agua aplicados en la industria y a nivel general, ya que las propiedades del recurso hídrico varían de acuerdo con el tiempo y a las necesidades de la misma industria.

Marco Conceptual

Espectrofotómetro.

Es un instrumento usado en la física óptica que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones. También es utilizado en los laboratorios de química para la cuantificación de sustancias y microorganismos (Equipos y laboratorio de Colombia).

Conductividad.

La conductividad es la capacidad que tiene un material de dejar pasar a través de él la corriente eléctrica y se expresa en unidades de Siemens por metro [S/m] en sistema de medición SI; aunque el agua pura (H_2O) no conduce la electricidad, prácticamente toda el agua presenta una disolución de sales en diferente concentración que tienen la capacidad de transportar la energía eléctrica. Las concentraciones de sólidos totales disueltos o STD se pueden reducir de un 5 a 99% con los procesos de ósmosis inversa, que de igual manera reduciría la conductividad del agua, dando lugar a agua pura o ultra pura (Lenntech).

Turbiedad.

Es la expresión de ciertas propiedades de absorción de la luz que tiene el agua y está ocasionada por la presencia de materiales en suspensión como arcilla, limo, partículas orgánicas coloidales, plancton y otros organismos microscópicos; la presencia de turbidez es importante porque puede enmascarar la presencia de otros contaminantes, que se puede reducir a 1 NTU mediante la filtración; esta lectura da idea de si la filtración es eficaz o no (Medina, 2000).

pH.

El pH es logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno del agua y su valor es un indicativo de las características del agua, también es la variable más importante en un sistema de tratamiento de agua ya que influye en gran medida en las condiciones óptimas de funcionamiento de cada etapa del mismo; para la estabilización del pH generalmente se emplea cal hidratada, soda cáustica, carbonato de sodio o carbonato de calcio (Medina, 2000).

Hierro.

Prácticamente todas las aguas contienen hierro en mayor o menor cantidad, las aguas subterráneas presentan normalmente concentraciones de 1 a 5 ppm, cuyo contenido puede ser problemático para determinados usos, domésticos o industriales ya que contenidos de 0,5 ppm son normalmente perjudiciales, e incluso algunos procesos industriales no permiten contenidos superiores a 0,1 ppm. La química del hierro en el agua es bastante compleja; hay dos tipos de iones de hierro, el ferroso y el férrico, el primero es inestable en presencia de aire y cambia al estado férrico por lo cual, para la eliminación del hierro, puede procederse a la aireación del agua, con la que se consigue bajar dicho contenido hasta 0,1 ppm (Medina, 2000).

Sílice.

La sílice (SiO_2) se puede encontrar en algunas aguas subterráneas en cantidades de hasta 100 ppm, aunque normalmente se hallan contenidos de 20 ppm y si bien no contribuye a la dureza del agua, si es una parte importante de las incrustaciones formadas por muchas aguas. La solubilidad de la sílice en el agua es de unos 110-125 mg/l, sin embargo, también está bastante relacionada con la temperatura del agua ya que la solubilidad de la sílice aumenta con la temperatura. La concentración de sílice en el agua puede reducirse en gran medida mediante procedimientos fisicoquímicos de coagulación-floculación, los productos empleados suelen ser el cloruro férrico y la cal, junto a cantidades mínimas de algún polielectrolito orgánico, sin embargo el proceso es bastante complejo tanto desde el punto de vista de los equipos como las dosificación a utilizar, resultando bastante caro e inusualmente se recurre a su implementación (Medina, 2000).

Membrana semipermeable.

Las membranas permiten el paso preferencial de ciertas sustancias presentes en una disolución frente a otras. La parte que ha atravesado la membrana se conoce como "permeado" y la que no lo hace es el "rechazo". Existen membranas de tipo plano, tubulares, de fibra hueca o de arrollamiento en espiral, siendo esta la más usada por el reducido espacio ocupado por las membranas sin sacrificar su capacidad (Medina, 2000).

Producto o permeado.

El producto o permeado es el agua permeada a través de la membrana la cual es baja en sales y que puede ser utilizada desde para una caldera hasta para fines farmacéuticos con el tratamiento correspondiente (Osmosis Inversa).

Rechazo.

Agua de arrastre a la salida del sistema, que contiene las sales que han sido separadas por las membranas (Osmosis Inversa).

Tratamientos terciarios.

Son procesos de naturaleza biológica y físicoquímica utilizados para eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como, por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno (Cyclus ID S.L.).

Resinas.

Las resinas son pequeñas perlas de plástico que están compuestas por cadenas de polímeros orgánicos que tienen grupos funcionales cargados positiva (anión) o negativamente (catión) integrados en el cordón de resina (Puretec Industrial Water).

Las resinas catiónicas están cargadas negativamente y, por lo tanto, atraen iones cargados positivamente. Hay dos tipos de resinas catiónicas, catión ácido débil (CAD) y catión ácido fuerte (CAF) (Puretec Industrial Water).

Las resinas aniónicas están cargadas positivamente y, por lo tanto, atraen iones cargados negativamente. Hay dos tipos de resinas aniónicas; anión base débil (WBA) y anión base fuerte (SBA). Solo la resina SAW elimina sílice (Puretec Industrial Water).

Las resinas de lechos mixtos o mixed bed usa resinas SAC y SBA combinadas, donde el catión ácido fuerte y la resina de anión base fuerte se entremezclan. Esto efectivamente hace que el tanque de lecho mixto actúe como miles de unidades de lecho doble en un tanque. El intercambio catión/anión tiene lugar una y otra vez dentro del lecho de resina (Puretec Industrial Water).

Agua ultra pura.

El agua ultra pura contiene una concentración muy baja de sales, de componentes orgánicos/pirógenos, oxígeno, sólidos suspendidos y bacterias. Son usadas principalmente en los semiconductores e industriales farmacéuticas, su producción exige una manera especializada de trabajo, algunas técnicas que se utilizan son la filtración de membrana, intercambiadores iónicos, electrodesionización, filtros secundarios de micras, ultravioleta, sistemas de ozono, entre otros (Lenntech).

ANOVA.

El análisis de la varianza es un proceso estadístico-algebraico que particiona la suma de cuadrados total, en la suma de cuadrados asociadas al conjunto de efectos o factores a los cuales se les desea estimar su variabilidad, con el propósito de realizar pruebas de hipótesis estadísticas para cada una de ellas (Martínez, 2009).

 R^2 y R^2 ajustado.

El R^2 tiende a estimar de forma optimista el ajuste de la regresión lineal. Siempre aumenta como el número de efectos que se incluyen en el modelo. Por otro lado, el R^2 ajustado es la medida de bondad de ajuste corregida (precisión de modelo) para los modelos lineales, identifica el porcentaje de varianza en el campo objetivo que se explica mediante la entrada o entradas. R^2 ajustado intenta corregir la estimación excesiva de R^2 . R^2 ajustado podría disminuir si un efecto específico no mejora el modelo (IBM Knowledge Center).

Distribución normal Z.

Esta distribución es un modelo matemático que permite determinar probabilidades de ocurrencia para distintos valores de una variable. Así, para determinar la probabilidad de encontrar un valor de la variable, conociendo el promedio y la varianza de un conjunto de datos, se debe reemplazar estos valores en la fórmula matemática del modelo (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011).

Matriz de decisión.

Es un gráfico que permite a un equipo o un individuo identificar y analizar la tasa de la fuerza de las relaciones entre conjuntos de información, es de gran utilidad en la selección de un proyecto, en la evaluación de soluciones alternativas a problemas, y en el diseño de los recursos (Universidad Autónoma de México, 2017).

Marco Legal

Dentro de la Legislación Nacional Colombiana se ha estipulado un sinnúmero de normatividad ambiental para establecer los derechos sobre el uso del agua y los compromisos con la misma. En el caso de la termoeléctrica, esta deberá solicitar concesión o proponer asociación para tener acceso a la fuente hídrica según el artículo 170 del Decreto 2811 de 1974 (Decreto 2811, 1974) y pagar una tasa retributiva por el uso de la misma según el Decreto 155 de 2004 (Decreto 155, 2004)

De igual manera, debe contar con un permiso de vertimientos cumpliendo con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales establecidos en la Resolución 0631 de 2015 (Resolución 0631, 2015), sin embargo, esta planta no realiza vertimientos, ya que los lodos producto del proceso de tratamiento de agua industrial se dejan a cargo de la empresa Ecopetrol, la cual se encarga de transportarlos para su correcto tratamiento y disposición.

Para el correcto desarrollo de este proceso investigativo se usará como pauta la NTC ISO 5667-3 (International Organization for Standardization, 2004), la cual establece las directrices para la preservación y manejo de las muestras, ya que la veracidad de los resultados depende de la correcta aplicación de las técnicas de muestreo establecidas en la norma.

Capítulo III: Proceso Metodológico

Para la realización del proyecto se trabajó a un nivel explicativo, aplicando la investigación documental para recabar información sobre el estado de la planta de tratamiento durante un tiempo específico y una investigación experimental para comprobar la eficiencia del sistema que opera la planta en el momento y así formular el análisis de la planta de tratamiento en la Termoeléctrica de Ocoa.

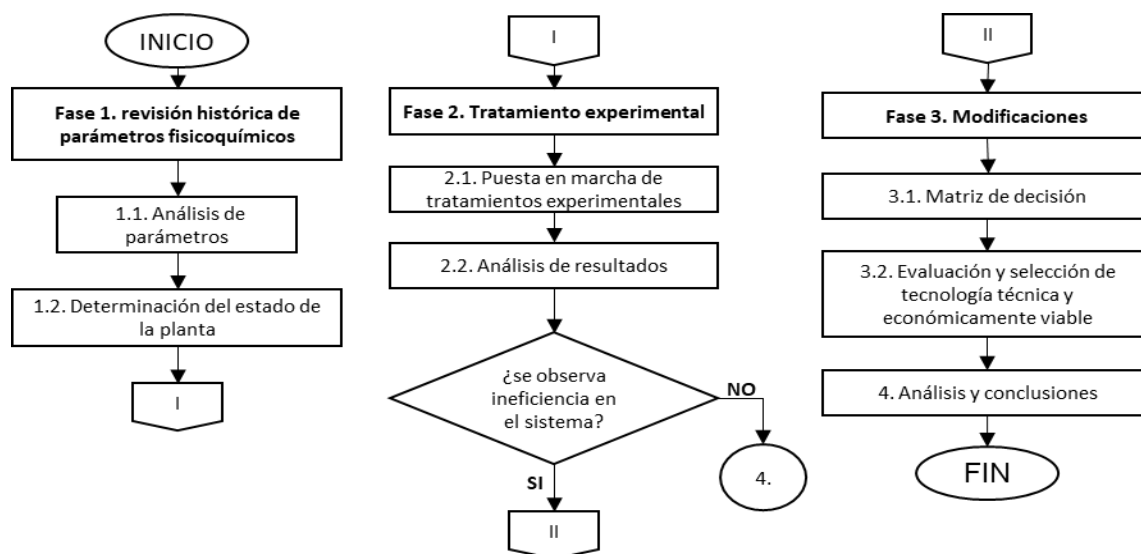


Figura 6. Diagrama de flujo metodología, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Fase 1. Revisión Histórica de Parámetros Fisicoquímicos

A través de inspecciones y recopilación de información secundaria se desarrolló la revisión del sistema de tratamiento, el cual tuvo asociado el análisis de los parámetros fisicoquímicos (pH, sílice, turbiedad, hierro y conductividad) operacionales a los cuales se les ha monitoreado durante los últimos 3 años.

Para determinar la representatividad de los datos obtenidos de la empresa se realizó el análisis estadístico de los reportes, donde el número de rondas reportadas no debía ser inferior al 90% del total de las rondas establecidas para realizar reportes (4 rondas diarias) para considerar estos datos representativos:

Ecuación 1. Porcentaje de representatividad por parámetro

$$\% \text{ representatividad} = 1 - \frac{\# \text{ rondas no reportadas}}{\# \text{ total de rondas establecidas}} * 100$$

Para el análisis de la confiabilidad del sistema de tratamiento para entregar agua en excelente calidad se procedió a la cuantificación de eventos en que las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos se encontraban por fuera de especificaciones operacionales (ver Anexo 1) respecto a la cantidad total de datos reportados para cada año haciendo uso de la metodología de indicadores de desempeño (Ecuación 2); siendo que el porcentaje de confiabilidad promediado por etapa debía ser igual o superior al 95% para considerar que el sistema era eficiente:

Ecuación 2. Porcentaje de confiabilidad por parámetro

$$\% \text{ confiabilidad} = 1 - \frac{\# \text{ datos fuera de rango operacional durante un año}}{\# \text{ total de datos tomados durante un año}} * 100$$

Con el fin de establecer si el STAI es capaz de garantizar a futuro el suministro de agua de acuerdo con las exigencias demandadas por la industria, se determinó la probabilidad de que la confiabilidad del sistema a futuro sea del 95% o superior en cada parámetro medido por etapa (ver Anexo 1), utilizando la metodología de distribución normal Z:

Ecuación 3. Fórmula para la distribución normal Z

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde:

Z: número de desviaciones estándar que hay desde x a la media de la distribución

x: valor de la variable aleatoria a hallar (rango máximo y mínimo operacional del parámetro)

μ : media aritmética

σ : desviación estándar

Fase 2. Tratamientos Experimentales

Para el desarrollo del diagnóstico del STAI de la planta Termocoa se desarrolló un modelo experimental de diseño factorial 2X2, teniendo en cuenta las siguientes variables:

Tabla 1. *Variables a utilizar en el modelo*

Variables independientes	Variables dependientes
Caudal	pH
Presión	Sílice
	Turbiedad
	Hierro
	Conductividad

Nota: Variables dependientes e independientes a evaluar en los tratamientos experimentales, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Donde se buscaba obtener el porcentaje de rendimiento del intercambio iónico en remoción de sílice modificando las variables caudal y presión con el fin de determinar la influencia de estas sobre la remoción de sílice y demás variables mencionadas anteriormente.

Para este modelo experimental se realizó un muestreo estratificado, donde la unidad experimental fueron las variables dependientes mencionadas anteriormente y la unidad de evaluación fue 1000 ml de agua antes, durante y después del tratamiento experimental (Anexo 2) que contó con 6 submuestras estratificadas por horas de medición.

Estos experimentos se llevaron a cabo una vez por semana cada uno, dejando un lapso de 20 minutos para estabilizar la maquina al hacer las modificaciones de caudal y presión, realizando 6 repeticiones por experimento cada media hora, correspondiendo estos tratamientos a alta presión-alto caudal, alta presión-bajo caudal, baja presión-bajo caudal, baja presión-alto caudal y finalmente el experimento de control que corresponde a los rangos de caudales y presiones operadas normalmente por la empresa; siendo un total de 1 ¼ días de experimentación, esto debido a que la planta de tratamiento recarga el tanque de agua filtrada únicamente hasta que el nivel de agua del tanque así lo indique. Dichos rangos están dados por el manual operativo de la planta.

Tabla 2. *Diseño factorial 2x2*

Matriz de experimentos			Plan de experimentación		Respuesta (% rendimiento)						
X1		X2	Caudal (Gal/min)	Presión (Psi)	Variable dependiente	Submuestras					
		1				2	3	4	5	6	
1	-	-	250*	40*	Sílice pH Conductividad Hierro Turbiedad						
2	+	-	300*	40*	Sílice pH Conductividad Hierro Turbiedad						
3	-	+	250*	80*	Sílice pH Conductividad Hierro Turbiedad						
4	+	+	300*	80*	Sílice pH Conductividad Hierro Turbiedad						
5	CONTROL	CONTROL	CONTROL	CONTROL	Sílice pH Conductividad Hierro Turbiedad						

Nota: *Manual operativo de la planta (Mecánicos Asociados - MASA A STORK COMPANY), por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Posterior a la toma de resultados se procedió a realizar el análisis estadístico de los mismos mediante el método ANOVA no paramétrico de dos vías (Gutierrez & De la Vara, 2012) con el fin de cuantificar y evaluar la importancia de las variables estudiadas y el R^2 y el R^2 ajustado para medir la calidad global del modelo haciendo uso del software InfoStat.

Fase 3. Modificaciones

Para la realización de las modificaciones del sistema de tratamiento se empleó la evaluación técnica y económica de cada tecnología estudiada en este trabajo con la ayuda de la siguiente matriz de decisión que fue realizada mediante talleres con el personal de la empresa distribuido en tres sesiones cada semana durante dos horas; de esta manera se logró dar el peso de importancia de los criterios para la selección de la tecnología más eficiente según la percepción de la empresa ya que inicialmente el peso de importancia de cada criterio se tomó con base en la literatura existente dándole un valor uniforme a cada criterio:

Tabla 3. *Matriz de decisión*

Atributo	Criterio	Valor asignado	Peso de importancia **p^a
Técnico (50%)	Confiabilidad		7,14%
	Viabilidad		7,14%
	Flexibilidad		7,14%
	Complejidad		7,14%
	Accesibilidad		7,14%
	Requerimientos de análisis y controles		7,14%
	Tratamiento y manejo de subproductos		7,14%
Económico (50%)	Costos (inversión, operación y mantenimiento)		12,5%
	Requerimiento de área		12,5%
	Empleo de energía eléctrica		12,5%
	Requerimiento de personal calificado		12,5%
*ITO_{STAI}			100%

Nota: *índice de Tecnología Óptima, **peso de importancia de cada parámetro, por García, Pardo, & Rodríguez, 2015

Capítulo IV: Procesamiento y Análisis de Resultados

Resultados y Análisis

Revisión Histórica de Parámetros Fisicoquímicos

Tanto para la determinación del porcentaje de representatividad como de confiabilidad del Sistema de Tratamiento de Agua Industrial (STAI) fue necesario acotar el número de rondas reportadas cada año para cada parámetro evaluado dentro de cada etapa del STAI (Anexo 1), obteniendo finalmente un porcentaje de rondas reportadas para cada etapa del STAI:

Tabla 4. Promedio de rondas reportadas

PUNTOS DE CONTROL EN EL STAI	PROMEDIO DE RONDAS REPORTADAS			PROMEDIO DE RONDAS ESTABLECIDAS		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	131	140	255	490	494	494
SALIDA CLARIFICACIÓN	372	437	477	490	494	494
FILTRACIÓN	361	423	423	490	494	494
TANQUE DE AGUA FILTRADA	174	122	106	490	494	494
TREN DE DESMINERALIZACIÓN	204	259	262	523	527	527
TANQUE DE AGUA DEMI	301	255	143	523	527	527
EDI	476	645	745	1493	1507	1507
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS	358	366	357	1493	1507	1507
SKID DEL SPRINT	739	853	942	2010	2028	2028
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	41	33	61	42	42	42
PROMEDIO	316	353	377	804	811	811

Nota: Promedio de rondas reportadas y promedio de rondas establecidas en cada punto de control del STAI, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Análisis de representatividad.

Para el caso de las rondas correspondientes a los años 2015, 2016 y 2017 se obtuvo el porcentaje de representatividad agrupado por las áreas o fases del Sistema de Tratamiento de Agua Industrial (STAI).

Para el cálculo de representatividad se halló inicialmente el número de rondas establecidas para cada año mediante la interpolación de datos como el tiempo de operación anual de la turbina encargada de la generación de energía eléctrica, la demanda de agua por unidad de tiempo de

esta y la capacidad máxima de tratamiento de cada una de las etapas que comprende el sistema de tratamiento de agua industrial de acuerdo con el manual de operaciones (Tabla 5). Sin embargo, el resultado de esta interpolación resultaba incongruente respecto al número de rondas reportadas. Es decir, el número de rondas reportadas superaba el número de rondas establecidas, ocasionando que el porcentaje de representatividad en la mayoría de las etapas superaran el umbral máximo del 100%, por tal razón, se recalcularon los porcentajes de representatividad estableciendo que cada una de las etapas trabajó sobre una capacidad del 38,46% de acuerdo con lo manifestado por el personal de operaciones (Tabla 6).

Tabla 5. *Interpolación de demanda de agua*

FASE	CAPACIDAD GPM	CAPACIDAD GPM AL 50%	TIEMPO DE OPERACIÓN (DÍAS)			AGUA GENERADA/CONSUMIDA (GALONES)		
			2015	2016	2017	2015	2016	2017
Desarenador	320	123,08	78,39	79,56	79,09	14472000	14688000	14601600
Clarificador	320	123,08	78,39	79,56	79,09	14472000	14688000	14601600
Tanque de agua filtrada	320	123,08	78,39	79,56	79,09	14472000	14688000	14601600
Tren de desmineralización	300	115,38	83,62	84,86	84,36	14472000	14688000	14601600
EDI	105	40,38	238,90	242,47	241,04	14472000	14688000	14601600
Tanque EDI	105	40,38	238,90	242,47	241,04	14472000	14688000	14601600
Skid del sprint	-	-	321,60	326,40	324,48	-	-	-
Tanque de neutralización	-	-	6,67	6,77	6,73	-	-	-
Turbina	30	30	321,60	326,40	324,48	14472000	14688000	14601600

Nota: por Linares, E. & Rodriguez, L. con base en el manual de operaciones, 2018.

Lo anterior se debe a la toma de decisiones por parte de los operarios de planta de agua para lograr mantener los parámetros fisicoquímicos del agua dentro de los rangos operacionales establecidos en el manual para cada etapa del sistema, ya que los mismos presentan cambios abruptos en los parámetros fisicoquímicos de entrada al STAI, ocasionados por las variaciones hidrológicas en la bocatoma de la planta de tratamiento de agua industrial. Lo anterior debido a que en época de lluvias aumentan las concentraciones de turbiedad, sílice, entre otros, causando un incremento en la cantidad de químicos y tiempos de retención necesarios para el tratamiento

del agua y en época de verano se restringe el caudal de captación por parte de la Corporación Autónoma Regional (Cormacarena). Sin embargo, el único porcentaje de representatividad que no se recalculo fue el Skid del Sprint puesto que es la única etapa del proceso realizado en simultaneo con la turbina ya que es el encargado de vaporizar el agua que ingresa a esta. Es decir, la capacidad y el tiempo de operación del Skid del Sprint corresponde a la capacidad y tiempo de operación de la turbina.

Para el caso de los tanques se omitió el cálculo de porcentaje de representatividad, puesto que al ser usados como reservas no es posible determinar un número de rondas establecidas. Sin embargo, si se les hace seguimiento a los parámetros fisicoquímicos del agua para garantizar las condiciones operacionales del agua en las etapas posteriores a los mismos.

Tabla 6. *Porcentaje de Representatividad de Parámetros Registrados*

PUNTOS DE CONTROL EN EL STAI	%REPRESENTATIVIDAD		
	2015	2016	2017
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	26,67%	28,32%	51,48%
SALIDA CLARIFICACIÓN	75,93%	88,49%	96,41%
FILTRACIÓN	73,71%	85,66%	85,60%
TANQUE DE AGUA FILTRADA*	N/A	N/A	N/A
TREN DE DESMINERALIZACIÓN	39,02%	49,16%	49,69%
TANQUE DE AGUA DEMI*	N/A	N/A	N/A
EDI	31,85%	42,78%	49,45%
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS*	N/A	N/A	N/A
SKID DEL SPRINT*	36,78%	42,04%	46,47%
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	N/A	N/A	N/A
PROMEDIO	47,33%	56,08%	63,18%

Nota: N/A: No Aplica, *Puntos de control en el STAI que no son procesos de tratamiento, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

A nivel general se puede identificar que ninguno de los datos es representativo a excepción de la salida de la clarificación para el año 2017 con un porcentaje del 96,41%. Además, es evidente que las etapas con un mayor porcentaje de representatividad a través de los años se concentran en las fases de salida de la clarificación y la filtración (Figura 7). Lo cual, puede deberse a las exigencias operativas requeridas para operar el tren de desmineralización o DEMI y garantizar la eficiencia del mismo de tal manera que se contrarreste el rápido deterioro de las resinas allí utilizadas y mantenerlas dentro de su rango de vida útil.

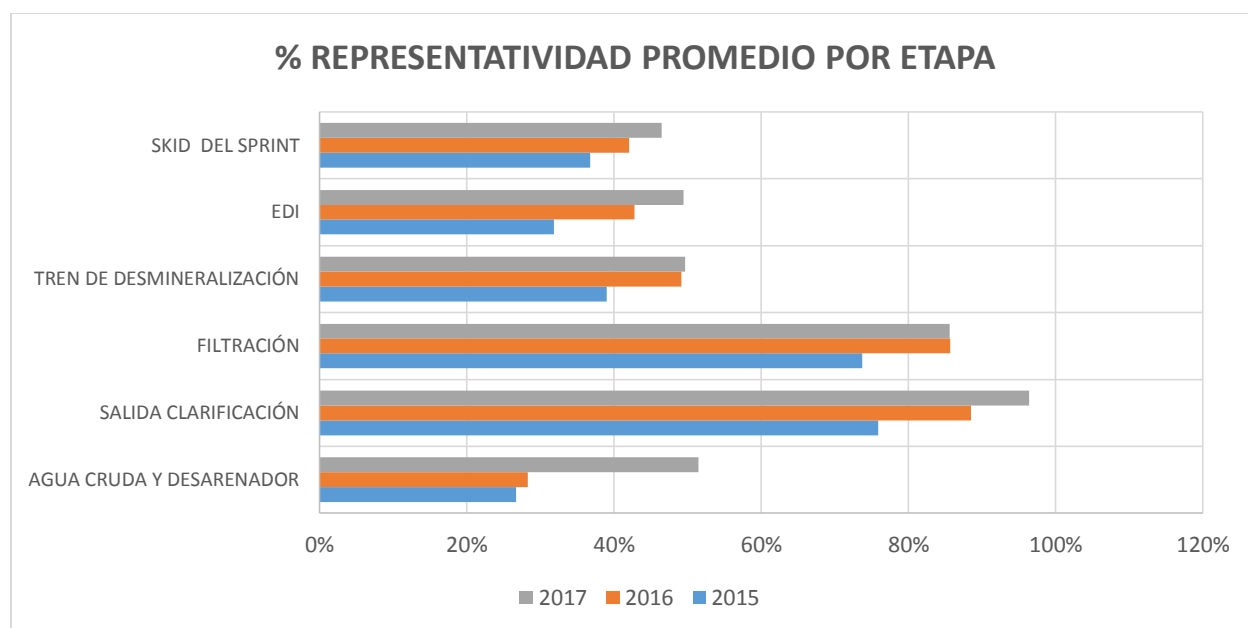


Figura 7. Porcentaje de representatividad promedio del sistema por etapas, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018

Adicionalmente, se observó una tendencia positiva a través del tiempo en cada una de las fases debido al creciente interés por disminuir o mitigar incidentes de tipo operativo que ocasionaban un aumento en los tiempos de inactividad de la planta causados por averías en ciertas máquinas y equipos utilizados en el proceso de tratamiento de agua; no obstante, si bien se observa una mejora a lo largo de los años, esta no es lo suficientemente estricta para garantizar o lograr alcanzar un umbral de un 90% de representatividad, siendo muy desfavorable para la termoeléctrica ya que todos los porcentajes deberían presentar los mismos valores, teniendo en cuenta que todos los procesos son indispensables y deben operar sistemáticamente, como es el caso del Skid del Sprint, el cual no logra siquiera un porcentaje del 47% de representatividad, lo que lleva a considerarse que para el personal de la planta esta etapa no es relevante. Esto ocasiona inconvenientes de gran magnitud, puesto que este es el proceso de transición más importante por ser la última fase del sistema de tratamiento y la primera del proceso de generación de energía eléctrica, por lo cual debe garantizarse que funcione de manera adecuada e ininterrumpidamente, ya que cualquier interrupción del mismo se vería reflejado en pérdidas económicas de gran magnitud por la compra de energía eléctrica a la Electrificadora del Meta S.A E.S.P para suplir la energía requerida de procesos dependientes de su actividad principal,

además de posibles costos por mantenimiento y reparación de máquinas y equipos que pudieran presentar daños por el detenimiento no previsto.

Análisis de confiabilidad.

Respecto al porcentaje de confiabilidad del sistema de tratamiento de agua calculado a través de la metodología de índices de desempeño para establecer si los datos de los parámetros evaluados (Anexo 1) cumplen los niveles máximos permisibles correspondiente a los años 2015, 2016 y 2017 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7. *Porcentaje de Confiabilidad de Parámetros Registrados*

PUNTOS DE CONTROL EN EL STAI	% CONFIABILIDAD		
	2015	2016	2017
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	77,72%	74,39%	60,90%
SALIDA CLARIFICACIÓN	42,08%	42,78%	41,05%
FILTRACIÓN	71,88%	70,78%	65,35%
TANQUE DE AGUA FILTRADA*	93,42%	92,50%	83,45%
TREN DE DESMINERALIZACIÓN	89,20%	85,95%	70,98%
TANQUE DE AGUA DEMI*	90,61%	90,51%	84,68%
EDI	80,65%	80,23%	55,03 %
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS*	88,63%	82,83%	75,74%
SKID DEL SPRINT*	96,03%	95,19%	91,77%
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	83,52%	83,51%	84,48%
PROMEDIO	81,37%	79,87%	71,34%

Nota: *Puntos de control en el STAI que no son procesos de tratamiento, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Basados en la metodología establecida para el desarrollo de la investigación se logró evidenciar, de acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 7), que la única etapa que logra superar el umbral del 95% es el Skid del Sprint. Sin embargo, solamente es confiable para los años 2015 y 2016, además, es pertinente resaltar que el año con mayor confiabilidad es el año 2015 ya que solo una de las diez etapas que contempla el sistema de tratamiento se encuentran por debajo del 70% de confiabilidad.

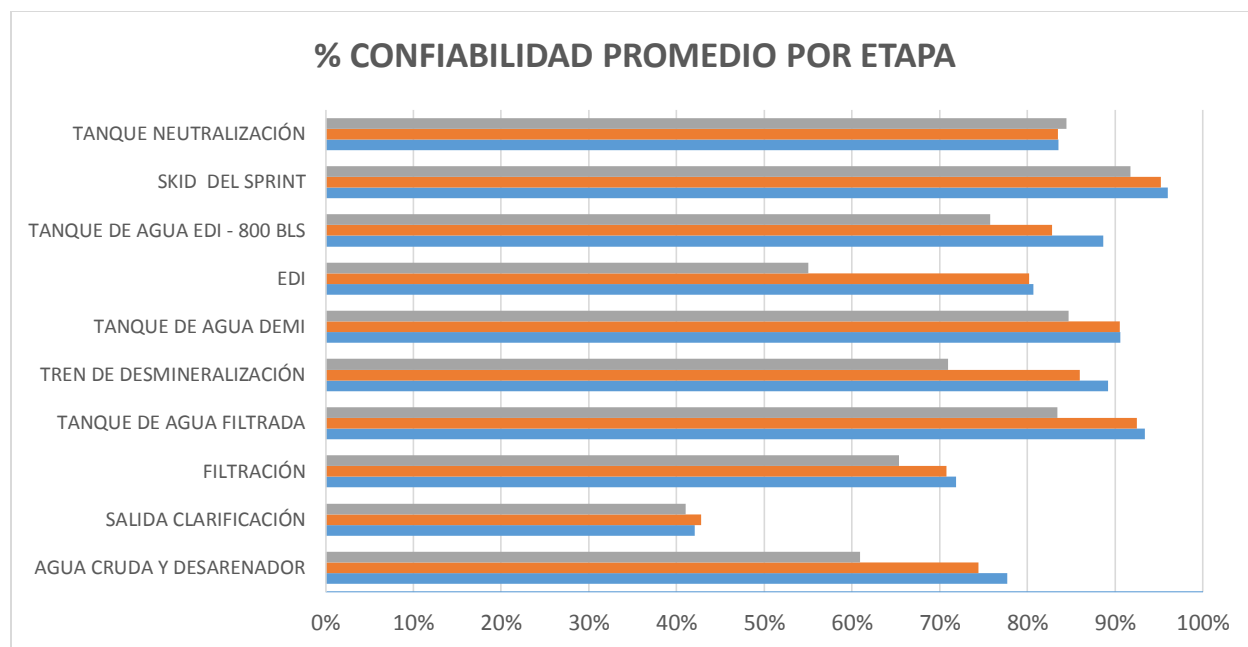


Figura 8. Porcentaje de confiabilidad promedio del sistema por etapas, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018

También se identifica que la etapa más cercana al porcentaje de confiabilidad es el Skid del Sprint y el más alejado es la salida de la clarificación, siendo el primero punto de control dentro del STAI que no efectúa ningún tratamiento al recurso en cuestión y el segundo es la etapa que comprende más parámetros a controlar y la mayor reducción porcentual con respecto a los requerimientos necesarios en la etapa anterior; seguidamente, el tren de desmineralización, que es la etapa evaluada en esta investigación, presenta una reducción en los porcentajes de confiabilidad, iniciando con 89,20% en el año 2015 y finalizando en 2017 con un 70,98%, demostrando con esto que el Sistema de Intercambio Iónico no es confiable y no presenta una tendencia que indique lo contrario a futuro, esto alusivo a que la tecnología presenta desgaste por su vida útil provocando que la eficiencia decaiga.

Por otra parte, se puede apreciar que el incremento o descenso del porcentaje de confiabilidad (Tabla 7) entre una y otra etapa del STAI responde a un patrón de comportamiento que se repite en los tres años sin importar la cantidad de datos reportados para cada uno (Tabla 4).

Es importante aclarar que los rangos de operación establecidos en el manual de STAI son las características que debe tener el agua al terminar cada etapa de tratamiento, es decir, a la salida de cada fase.

Por lo anterior, en la primera fase del STAI se ve que la confiabilidad de la misma no supera el 78%, lo cual puede deberse a las características iniciales que posee el agua cruda que alimenta al sistema, por consiguiente, aunque los rangos de exigencia para los parámetros físico-químicos del agua a la salida del desarenador son bastante amplios no se puede determinar si esta fase es realmente efectiva o no, ya que si las concentraciones del agua de alimentación de la fase son considerablemente altas, se podría decir que es muy efectivo al lograr obtener por lo menos una confiabilidad del 70% aproximadamente, pero si por otra parte las concentraciones iniciales del agua cruda son relativamente bajas se podría objetar que esta etapa no es muy efectiva.

También es de notar que los porcentajes de confiabilidad más bajos son los de la etapa de la salida de la clarificación, respecto al bajo porcentaje de confiabilidad de la primera, el cual no supera el 43%: se puede afirmar que además de ser la etapa en que se hace seguimiento a mayor cantidad de parámetros, la baja efectividad de esta etapa radica en que los operarios de la planta realizan la dosificación de coagulante y floculante obedeciendo a un manual operativo suministrado por la empresa encargada de la instalación y diseño de la planta de tratamiento de agua, ocasionando que no se realice periódicamente experimentos de prueba de jarras, lo cual es bastante recomendable hacer ya que observando el comportamiento de los datos durante el transcurso de cada año, se identifica que las concentraciones de ciertos parámetros físicoquímicos del agua que alimenta esta etapa no son constantes. Es decir, los valores fluctúan de tal manera que hay diferencias muy significativas entre uno y otro.

Por otro lado, el Skid del Sprint es la fase con mayor porcentaje de confiabilidad dentro del sistema y la única que se consideraría confiable para los dos primeros años, manteniéndose por encima del 95%; en consecuencia, aunque esta no es una fase de tratamiento, si es el final del mismo, donde se muestra si el sistema cumple con los requerimientos para el funcionamiento óptimo de la turbina o no, sin embargo, esta etapa presenta una tendencia negativa en el transcurso del tiempo, lo que incidiría en que la turbina con el paso del tiempo tenga un mayor desgaste y una reducción considerable de su vida útil.

Por otra parte, se evidencia que a partir del proceso de clarificación hasta el tanque de filtración hay un aumento progresivo del porcentaje de confiabilidad en el tanque de agua filtrada, que cabe resaltar es la etapa con el segundo porcentaje de confiabilidad más alto en todos los años. Sin embargo, este escenario se repite en cada etapa, donde el tratamiento anterior a cada tanque de almacenamiento es inferior al porcentaje de confiabilidad del mismo.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se podría asumir que al ser estos tanques únicamente para uso de almacenamiento y no un proceso de tratamiento del agua, actúan como el nivelador de los parámetros fisicoquímicos con que sale el agua de la fase anterior a estos, de tal forma que si hay una diferencia de la calidad con que sale el agua de la fase anterior a través del tiempo, esta no se ve reflejada significativamente en los parámetros fisicoquímicos tomados en los tanques ya que este sería un promedio del agua tratada en dicho tiempo, además del gran volumen de almacenamiento que tiene cada uno y los cuales se mantienen en un nivel de 70% de su capacidad total como mínimo.

Adicionalmente, se puede apreciar que con el paso del tiempo el sistema va alejándose paulatinamente de los estándares necesarios establecidos para la obtención de agua ultra pura, teniendo en cuenta que solo en el año 2015 y 2016 el Skid del Sprint alcanzó el umbral de 95% de confiabilidad y para el año 2017 no se logró, lo que finalmente quiere decir que el sistema no es apto para seguir operando en las condiciones actuales y es necesario corregirlo, ya sea mediante la modificación dentro del sistema de tratamiento o la sustitución de las tecnologías existentes por unas que suplan la necesidad de la empresa satisfactoriamente, debido a que, hoy por hoy la termoeléctrica enfrenta una demanda de energía eléctrica que apunta a un aumento constante en la necesidad del mercado, haciendo que cualquier por menor presentado en el sistema de tratamiento pueda conllevar a consecuencias desfavorables como pérdidas económicas por baja producción y mantenimiento de equipos.

Análisis de las probabilidades futuras.

Ahora bien, con base en los datos tomados en cada año (2015, 2016 y 2017) y con el fin de conocer si es posible que el sistema siga operando en dichas condiciones sin incurrir en pérdidas económicas para la Termoeléctrica de Ocoa se plantea el siguiente interrogante: ¿se podría afirmar que siempre y cuando se mantenga la tendencia de los datos tomados en cada año, los

años subsiguientes tendrán una probabilidad de encontrarse dentro de una confiabilidad del 95% o superior a este?

Tabla 8. *Planteamiento de hipótesis nula y alternativa (Ho y Ha)*

	En símbolos	En palabras
Ho	$p \leq 5\%$	Los datos de los años subsiguientes tienen una probabilidad del 95% o superior de encontrarse dentro del rango.
Ha	$p > 5\%$	Los datos de los años subsiguientes tienen una probabilidad inferior al 95% de encontrarse dentro de los rangos.

Nota: por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Mediante el análisis de la distribución normal se hallaron los siguientes porcentajes de probabilidad:

Tabla 9. *Porcentajes de probabilidad para Color Real*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA COLOR REAL								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	0,00	10,00	50,80%	R	59,48%	R	75,17%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	10,00	30,00	87,29%	R	75,38%	R	85,44%	R
FILTRACIÓN	0,00	5,00	44,83%	R	56,36%	R	70,88%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Como se puede apreciar en la Tabla 9, el color real no presenta probabilidad de alcanzar en ningún año ni etapa el 95% de confiabilidad, además con el transcurso del tiempo se aleja cada vez más de lograr alcanzar el porcentaje de probabilidad necesario para aprobar la hipótesis nula.

En cuanto a la dureza, se puede apreciar que en todas las etapas y todos los años se aprueba la hipótesis nula, es decir, los datos de los años subsiguientes tienen una probabilidad del 95% o superior de encontrarse dentro del rango (Tabla 10); los altos porcentajes de probabilidad para este parámetro es debido a que las concentraciones presentes en todos los datos reportados para cada año son de cero, lo cual se debe a que probablemente al momento de realizar la ronda en estos puntos, hacen seguimiento a ciertos parámetros omitiendo estos y reportando en la planilla valores de cero.

Tabla 10. *Porcentajes de probabilidad para Dureza*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA DUREZA								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	3,00	0%	A	0%	A	0%	A
TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN	0,00	100,00	0%	A	0%	A	0%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Los sulfatos presentan una alta probabilidad de encontrarse dentro de los rangos operacionales determinados en el manual a lo largo del tiempo en todas las etapas (Tabla 11), esto indica que si hubiera un cambio en los rangos máximos y mínimos operacionales los resultados para sulfatos no se verían perjudicados ya que los porcentajes de probabilidad se encuentran muy cerca del 100%.

Tabla 11. *Porcentajes de probabilidad para Sulfatos*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA SULFATOS								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	0,50	0,87%	A	0,10%	A	0,00%	A
TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN	0,00	60,00	0,06%	A	1,32%	A	0,05%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

De acuerdo con la Tabla 12, la resistividad parece ser un inconveniente en el proceso de la etapa de electrodesionización o EDI ya que para ningún año se logra tener una confiabilidad del sistema del 95% o superior a futuro, sin embargo, aunque ha presentado mejoras porcentuales a través del tiempo y dado el caso de seguir avanzando de la misma manera se necesitarían muchos años para lograr rechazar la hipótesis nula.

Tabla 12. *Porcentajes de probabilidad para Resistividad*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA RESISTIVIDAD								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
EDI	15,00	20,00	97,90%	R	90,87%	R	82,20%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

La temperatura es un parámetro que en el STAI de Termocoa no presenta ningún tratamiento ni proceso destinado a regular la misma dentro de los rangos operacionales establecidos en el manual y aunque la temperatura de Villavicencio, municipio donde se encuentra el STAI, oscila entre 28°C y 30°C hay que tener en cuenta que el municipio se encuentra en la falda de la cordillera oriental, con lo cual la red hídrica que viene desde la cordillera hasta el municipio presentará una temperatura menor a la temperatura del municipio ya que el trayecto que recorre el agua es muy corto para nivelar la temperatura con la del ambiente, además, el agua que alimenta esta etapa se almacena previamente en un tanque de gran capacidad haciendo que sea menos probable que la temperatura aumente hasta alcanzar la misma del ambiente; de esta manera podría decirse que en el momento de establecer el rango mínimo y máximo de este parámetro no se tuvo en cuenta los factores anteriormente mencionados y por consiguiente este parámetro rechaza la hipótesis nula para todos los años (Tabla 13).

La diferencia significativa entre los porcentajes de cada año se atribuye al error sistemático al momento de ingresar la información en la base de datos, ya que se encontraron valores de temperatura de hasta 277°C los cuales afectan de manera significativa el cálculo de la desviación estándar y por consiguiente el cálculo de probabilidad para aprobar o rechazar la hipótesis nula.

Tabla 13. *Porcentajes de probabilidad para Temperatura*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA TEMPERATURA								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
EDI	25,00	33,00	6,46%	R	68,86%	R	46,42%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Analizando la Tabla 14 se puede determinar que los sólidos en suspensión son un parámetro que a lo largo de los años y en cada etapa rechaza la hipótesis nula, sumado a esto, en el año 2015 no fue posible determinar la probabilidad de que los datos se encuentren dentro de los rangos operacionales establecidos puesto que el formato que se manejaba en ese entonces no incluía este parámetro en la etapa de agua cruda y desarenador.

Por otra parte, se ve una mejora continua de este parámetro en la etapa de clarificación y filtración a través de los años, pero no la suficiente para lograr aceptar la hipótesis nula dentro de un tiempo cercano.

Tabla 14. *Porcentajes de probabilidad para Sólidos en Suspensión*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA SOLIDOS EN SUSPENSION								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	0,00	20,00	-*	-*	39,36%	R	42,86%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	10,00	30,00	99,35%	R	92,37%	R	75,64%	R
FILTRACIÓN	1,00	10,00	80,79%	R	65,91%	R	53,99%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, R: Hipótesis Nula Rechazada, * Valores indeterminados, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

En cuanto al cloro libre se puede apreciar que, si bien en el tanque de neutralización se acepta la hipótesis nula en todos los años, en las etapas de salida clarificación, filtración y tanque de agua filtrada se rechaza la hipótesis nula, también es de notar que la etapa de salida de clarificación es la más alejada de la confiabilidad del sistema, incluso con un rango tan amplio en comparación con las siguientes etapas, hecho que puede darse debido a las concentraciones de cloro libre del coagulante utilizado en el proceso de clarificación (Tabla 15).

Tabla 15. *Porcentajes de probabilidad para Cloro Libre*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA CLORO LIBRE								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
SALIDA CLARIFICACIÓN	0,50	1,00	96,44%	R	90,09%	R	93,79%	R
FILTRACIÓN	0,00	0,20	39,74%	R	51,20%	R	59,10%	R
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	0,10	51,60%	R	53,98%	R	55,96%	R
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	0,00	2,00	0,00%	A	0,00%	A	0,00%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Para el caso de la alcalinidad total (Tabla 16) se determina que la probabilidad de que el STAI en las etapas de tanque de agua filtrada y tanque de neutralización sea confiable en un 95% o superior es considerablemente alta, también cabe resaltar que para el año 2016 y 2017 en la etapa de tanque de agua filtrada no se logró aceptar o rechazar la hipótesis nula porque los valores de probabilidad fueron indeterminados ya que el valor de la desviación estándar fue cero,

lo anterior, también se puede atribuir a un error sistemático aplicable a los operadores de planta por la omisión del cálculo de concentración de este parámetro reportando valores de cero.

Tabla 16. *Porcentajes de probabilidad para Alcalinidad Total*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA ALCALINIDAD TOTAL								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	10,00	0,05%	A	_*	_*	_*	_*
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	0,00	80,00	0,00%	A	0,43%	A	0,00%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, * Valores indeterminados, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Aunque los cloruros se encuentran en el formato que establece los parámetros a evaluar en cada etapa no se realizaron las rondas para este parámetro y se desconoce la razón de esto (Tabla 17).

Tabla 17. *Porcentajes de probabilidad para Cloruros*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA CLORUROS								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	0,50	_*	_*	_*	_*	_*	_*

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, * Valores indeterminados, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

A nivel general se puede indicar que el CO₂ es un parámetro que se mantiene dentro de los rangos operacionales establecidos en cada etapa (Tabla 18), a excepción del catión en los años 2015 y 2016 pero en el año 2017 presentó una mejora considerable, por lo cual se determina que la probabilidad de que la confiabilidad del STAI sea del 95% o superior es alta; sin embargo, esta mejora tan pronunciada también se debe a que en los reportes encontrados en la base de datos referente a la concentración de este parámetro alcanzan valores de hasta 114, afectando significativamente el promedio de los datos generales y por consiguiente la desviación estándar.

Tabla 18. *Porcentajes de probabilidad para CO₂*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA CO ₂									
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017		
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho	
TREN DE DESMINERALIZACIÓN									
Catión	0,00	20,00	20,33%	R	16,35%	R	0,04%	A	
Torre Desgasificadora	0,00	10,00	0,12%	A	0,00%	A	0,91%	A	
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	5,00	0,02%	A	0,00%	A	-*	-*	

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, * Valores indeterminados, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

La sílice presenta únicamente la aceptación de la hipótesis nula en solo dos años y en diferentes etapas (Tabla 19), la primera en el mixbed para el año 2016, sin embargo, se observa un cambio exagerado para el año 2017, lo cual indica que el mixbed para la remoción de este parámetro es deficiente y que la probabilidad de aprobar la hipótesis nula para los próximos años es cada vez menor.

Por otra parte, se observa que la única etapa que acepta la hipótesis nula con el pasar del tiempo y mejora constantemente es el Skid del Sprint pero que el comportamiento es anormal respecto a la probabilidad en el tanque de agua EDI la cual debería ser similar ya que el Skid del Sprint toma de manera directa el agua almacenada en el tanque; esta diferencia se debe a que al Skid del Sprint se le realiza un seguimiento constante y se reportan datos anuales de 740 para el 2015, 851 para el año 2016 y 940 para el año 2017, en relación a la cantidad de datos reportados sobre el comportamiento del tanque que oscila entre 361 y 401 datos reportados dentro de los tres años.

Tabla 19. *Porcentajes de probabilidad para Sílice*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA SÍLICE									
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017		
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho	
TREN DE DESMINERALIZACIÓN									
Anión	0,00	0,30	53,59%	R	52,39%	R	52,39%	R	
Mixbed	0,00	0,20	13,79%	R	0,00%	A	52,39%	R	
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	0,20	16,85%	R	9,34%	R	52,79%	R	

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA SÍLICE								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS	0,00	0,10	5,59%	R	42,86%	R	13,79%	R
SKID DEL SPRINT	0,00	0,10	9,34%	R	5,16%	R	2,44%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

El parámetro de conductividad en general rechaza la hipótesis nula, aunque no en gran medida, sin embargo, es apropiado destacar que con el paso de los años la frecuencia con que se rechaza la hipótesis nula va en aumento, por lo cual, si el STAI sigue operando con esta tendencia, en un futuro alcanzara un punto en el que la confiabilidad del sistema para el parámetro en cuestión sea de 0% (Tabla 20).

Tabla 20. Porcentajes de probabilidad para Conductividad

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA CONDUCTIVIDAD								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	0,00	50,00	0,00%	A	45,22%	R	50,40%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	7,00	9,00	98,61%	R	99,61%	R	98,06%	R
FILTRACIÓN	0,00	100,00	0,21%	A	0,00%	A	0,01%	A
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	100,00	43,25%	R	0,00%	A	24,81%	R
TREN DE DESMINERALIZACIÓN								
Catión	0,00	100,00	5,48%	R	18,67%	R	64,80%	R
Anión	0,00	5,00	33,72%	R	37,07%	R	70,88%	R
Mixedbed	0,00	3,00	32,28%	R	23,27%	R	14,92%	R
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	3,00	2,44%	A	0,00%	A	27,76%	R
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS	0,00	1,00	10,75%	R	1,50%	A	50,80%	R
SKID DEL SPRINT	1,00	1,00	51,60%	R	51,99%	R	50,40%	R
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	100,00	600,00	60,61%	R	62,41%	R	57,42%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Para el caso del potencial de hidrógeno (Tabla 21) hay una clara tendencia al rechazo de la hipótesis nula desde el año 2015 al 2017, siendo este último el año con la menor probabilidad de que la confiabilidad del sistema sea por lo menos del 95%. Es necesario anotar que el anión en la etapa del tren de desmineralización presenta una tendencia direccionada a la aceptación de la hipótesis nula, aunque dentro de los años estudiados no lo haga, caso contrario a la fase

inmediatamente posterior al anión dentro de la etapa del tren de desmineralización, que el rechazo de la hipótesis nula va en aumento vertiginosamente, siendo en el último año 0% probabilidad de que el mixbed tenga una confiabilidad si quiera del 95%.

Tabla 21. *Porcentajes de probabilidad para pH*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA pH								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	4,00	6,00	29,65%	R	79,31%	R	91,74%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	7,00	9,00	97,61%	R	78,72%	R	99,02%	R
FILTRACIÓN	7,00	9,00	60,74%	R	77,47%	R	28,38%	R
PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA pH								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
TANQUE DE AGUA FILTRADA	7,00	9,00	47,89%	R	100,00%	R	87,29%	R
TREN DE DESMINERALIZACIÓN								
Catión	3,00	5,00	97,62%	R	82,25%	R	97,62%	R
Anión	6,00	8,00	85,94%	R	77,56%	R	72,50%	R
Mixbed	6,00	8,00	5,40%	R	20,23%	R	100,00%	R
TANQUE DE AGUA DEMI	6,00	8,00	4,06%	A	13,70%	R	98,41%	R
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS	6,00	9,00	1,62%	A	98,01%	R	7,03%	R
SKID DEL SPRINT	6,00	8,00	9,61%	R	9,96%	R	68,39%	R
TANQUE NEUTRALIZACIÓN	6,50	7,50	39,02%	R	28,42%	R	83,87%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

El hierro total (Tabla 22) también expone una tendencia a lo largo de los años a rechazar la hipótesis nula, aunque cabe resaltar que de manera independiente la etapa de filtración fue la única que mantuvo una tendencia hacia la aceptación de la hipótesis nula con una gran probabilidad de que la confiabilidad de dicha etapa para el caso del hierro total sea superior al 95%, por otro lado, el tanque de agua electrodesionizada o tanque de agua EDI es el que presenta mayor probabilidad y tendencia a lo largo de los años de que la etapa tenga una confiabilidad muy inferior al 95%.

Tabla 22. *Porcentajes de probabilidad para Hierro Total*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA HIERRO TOTAL								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	0,00	5,00	0,00%	A	0,00%	A	31,56%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	0,00	0,20	0,05%	A	0,00%	A	42,86%	R
FILTRACIÓN	0,00	0,20	0,23%	A	0,08%	A	0,00%	A
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	0,20	18,41%	R	36,32%	R	0,00%	A
TANQUE DE AGUA DEMI	0,00	0,01	58,32%	R	80,51%	R	81,86%	R
TANQUE DE AGUA EDI - 800 BLS	0,00	0,01	64,80%	R	80,51%	R	88,49%	R
TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN	100,00	600,00	1,62%	A	0,00%	A	0,00%	A

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Aunque la probabilidad de que la confiabilidad de las etapas correspondientes al parámetro de turbiedad no se encuentra tan alejado del ideal, si presenta una tendencia al rechazo de la hipótesis nula respecto al paso de los años (Tabla 23), situación que afectara la confiabilidad del sistema en general con el paso del tiempo si sigue la tendencia de los años estudiados.

Tabla 23. *Porcentajes de probabilidad para Turbiedad*

PORCENTAJE DE PROBABILIDAD PARA TURBIEDAD								
ETAPA	NIVELES		2015		2016		2017	
	BAJO	ALTO	P	Ho	P	Ho	P	Ho
AGUA CRUDA Y DESARENADOR	0,00	50,00	2,17%	A	33,72%	R	53,19%	R
SALIDA CLARIFICACIÓN	0,00	3,00	42,86%	R	54,78%	R	51,99%	R
FILTRACIÓN	0,00	1,00	15,62%	R	50,40%	R	52,79%	R
TANQUE DE AGUA FILTRADA	0,00	1,00	24,83%	R	51,60%	R	57,53%	R
TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN	0,00	50,00	0,00%	A	0,00%	A	10,93%	R

Nota: P: % de Probabilidad, Ho: Hipótesis Nula, A: Hipótesis Nula Aprobada, R: Hipótesis Nula Rechazada, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

A nivel general se puede determinar que los parámetros con mayor probabilidad de confiabilidad de acuerdo al comportamiento de los tres años estudiados son alcalinidad, sulfatos, dureza y hierro total, resultando ser un punto crítico ya que a nivel global se hace seguimiento a 14 parámetros; además, con el paso del tiempo la frecuencia con que se rechaza la hipótesis nula aumenta, esto se traduce en que con el paso del tiempo la probabilidad de que los datos de los años subsiguientes se encuentren dentro de los rangos establecidos estará decreciendo respecto al

transcurso de los años, aunado a esto, el número de veces que se rechazó la hipótesis nula fue superior al doble de las veces que se aceptó la misma en el año 2015 y finalmente en el año 2017 la hipótesis alternativa supero a la hipótesis nula con una relación superior a 5:1.

La determinación de estas probabilidades permite vislumbrar que el sistema general de tratamiento de agua industrial requiere con suma urgencia un cambio que permita aumentar la eficiencia en el tratamiento del agua industrial bajo las condiciones requeridas para garantizar un agua ultra pura.

Tratamientos Experimentales

Con el fin de juzgar la hipótesis previamente establecida en la que se cuestiona el hecho de que las medias poblacionales para la concentración de los parámetros fisicoquímicos evaluados en este estudio se mantengan iguales a pesar de haber variado las condiciones de operación del sistema de Intercambio Iónico, vs. que exista diferencia en las variables de respuesta respecto a la variación de caudal y presión, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico de dos vías, en el que se determinó el escenario más favorable para el Sistema de Intercambio Iónico con base en los rangos operativos establecidos en el manual, adicionalmente, se utilizó la metodología del test de Duncan para identificar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos.

Para el desarrollo de esto se utilizó el software InfoStat, sin embargo, debido a la gran cantidad de tablas generadas por el mismo solo se mostrará la información más relevante a criterio de los investigadores.

Sílice.

Es pertinente tener en cuenta que el factor de riesgo principal son las concentraciones de sílice presentes en el agua (ya que es un compuesto de difícil remoción), y es la principal fuente de daños por formación de incrustaciones dentro de los ductos y demás componentes de esta y otros equipos comprometidos en el proceso de generación de energía eléctrica (González, 2014).

Para el ANOVA, el R^2 y R^2 ajustado del comportamiento de la sílice se hizo énfasis en el Mixbed ya que es la etapa final del Sistema de Intercambio Iónico, donde se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Tabla 24 y Tabla 25):

Tabla 24. R^2 y R^2 ajustado para sílice

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Mixed	24	0,7	0,54	29,59

Nota: N: Numero, CV: Coeficiente de variación, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

De acuerdo con los resultados del R^2 se indica que la dispersión de la distribución de los datos es despreciable y el coeficiente de variación (CV) sustenta lo dicho anteriormente al presentar una variación inferior al 30%, sin embargo, el R^2 ajustado expone que el modelo no sirve para realizar predicciones del comportamiento de este parámetro resultante de las variaciones de caudal y presión, esto debido a que la significancia del factor presión no es determinante dentro del modelo y por consiguiente la interacción de este con el factor caudal tampoco.

Tabla 25. ANOVA para sílice

F.V.	SC	gol	CM	F	Valor p
Modelo	0,01	8	7,20E-04	4,43	0,0064
Caudal	4,00E-03	1	4,00E-03	24,75	0,0002
Presión	1,80E-05	1	1,80E-05	0,11	0,7416
REP	1,40E-03	5	2,80E-04	1,73	0,1877
Caudal*Presión	3,20E-04	1	3,20E-04	1,94	0,1843
Error	2,40E-03	15	1,60E-04		
Total	0,01	23			

Nota: SC: Suma de cuadrados, gol: Grados de libertad, CM: Cuadrados medios, F: Varianza, Valor p: Significancia, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

En este ANOVA se observa que el modelo en general de la sílice en este punto de muestreo es significativo ($p < 0,05$) por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa. Es decir, existe diferencia significativa entre uno o algunos de los tratamientos estudiados vs. la concentración de sílice; sin embargo, el único factor que presenta un nivel de significancia importante es el factor caudal con un 0,0002.

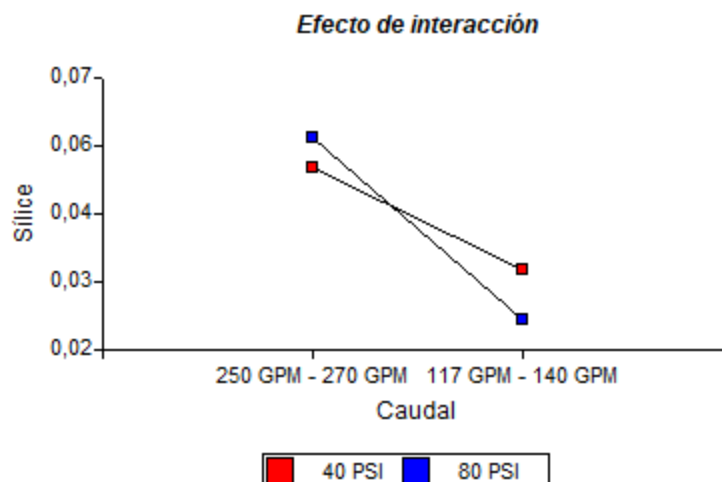


Figura 9. Efecto de interacción para sílice, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Aunque de acuerdo con ANOVA el único factor determinante es el caudal, es necesario analizar la gráfica de interacciones, puesto que la interacción prima con respecto a los efectos principales. De la Figura 9 se puede interpretar que se obtiene una concentración más baja si el sistema de intercambio iónico opera con un bajo caudal, independientemente de la presión que maneje. Sin embargo, el mejor escenario es en el que se opera con un caudal bajo y una presión alta.

Respecto a las comparaciones múltiples de media implementando la metodología del Test de Duncan se observó que; aunque no hay diferencia significativa entre los tratamientos con menor caudal, hay una mayor eficiencia de remoción en el tratamiento con menor caudal y mayor presión teniendo en cuenta la concentración de sílice con que ingresa al sistema de intercambio iónico (Ver Tabla 26). Por otra parte, se evidencia que los valores de todos los tratamientos se encuentran dentro de los rangos operacionales establecidos en el manual, pero se podría comparar y tener una mayor preferencia de tratamiento a utilizar teniendo en cuenta otro tipo de factores como la frecuencia con que se deba regenerar el tren de desmineralización operándolo bajo ciertos criterios.

Tabla 26. Comparaciones múltiples para Sílice - Test de Duncan

TRATAMIENTO	SÍLICE									
	TANQUE DE AGUA FILTRADA		CATION		ANION		MIXBED		TANQUE DE AGUA DEMI	
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	1,61	C	1,49	B	0,05	A	0,03	A	0,04	A
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	1,65	C	1,41	B	0,1	A	0,06	B	0,08	B
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	1,23	B	1,28	B	0,23	B	0,05	B	0,07	B
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	0,79	A	0,8	A	0,02	A	0,03	A	0,05	A B
RANGOS OPERATIVOS	N/A		N/A		0-0,3 ppm		0-0,2 ppm		0-0,1 ppm	

Nota: Diferencias significativas entre tratamientos, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Hierro.

En el caso del hierro se encontró que el modelo en general de este parámetro a la salida del Sistema de Intercambio Iónico es significativo ($p < 0,05$) por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa (Tabla 28). Es decir, existe diferencia significativa entre uno o algunos de los tratamientos estudiados vs. la concentración de hierro. Sin embargo, el único factor que presenta un nivel de significancia importante es el factor presión con un 0,0157.

Tabla 27. R^2 y R^2 ajustado para hierro

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Mixbed	24	0,59	0,36	96,81

Nota: N: Numero, CV: Coeficiente de variación, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Respecto a los resultados del R^2 se expone que la distribución de los datos presenta una gran dispersión, el coeficiente de variación (CV) sustenta lo dicho anteriormente al presentar una variación aproximada al 100%, indicando que los datos no siguen un comportamiento relativamente estable, esto atribuible a la recalibración del equipo de medición efectuada por parte de los operarios de la empresa después de la realización del segundo experimento, esto se ve reflejado en el R^2 ajustado al presentar un coeficiente de determinación inferior al 40% y en la significancia de la interacción de los factores estudiados al ser superior al 0,05.

Tabla 28. ANOVA para hierro

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	5,80E-04	8	7,30E-05	2,65	0,0493
Caudal	1,00E-04	1	1,00E-04	3,79	0,0706
Presión	2,00E-04	1	2,00E-04	7,42	0,0157
REP	2,70E-04	5	5,40E-05	1,97	0,142
Caudal*Presión	4,20E-06	1	4,20E-06	0,15	0,7026
Error	4,10E-04	15	2,80E-05		
Total	1,00E-03	23			

Nota: SC: Suma de cuadrados, gl: Grados de libertad, CM: Cuadrados medios, F: Varianza, Valor p: Significancia, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

En cuanto a la gráfica de interacciones (Figura 10) se pudo apreciar que no existe interacción alguna entre el factor caudal y el factor presión y aunque siempre habrá menor concentración de hierro con una presión alta independientemente del caudal, las concentraciones de hierro son considerablemente menores con un caudal máximo y una presión máxima.

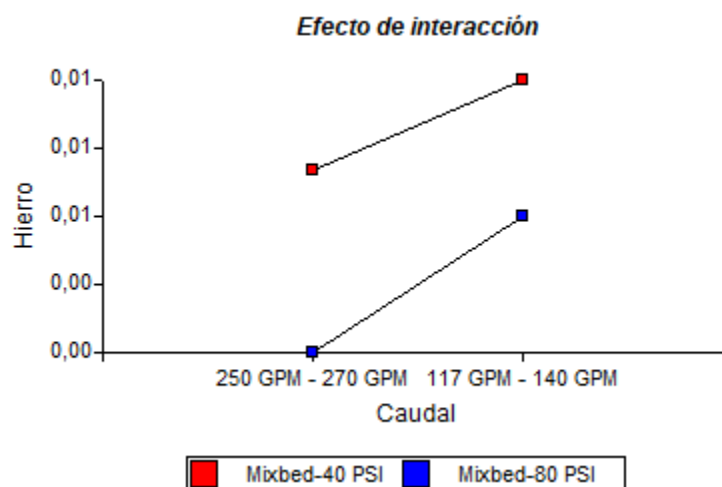


Figura 10. Efecto de interacción para hierro, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Corroborando lo anterior, se observa que en cualquiera de los tratamientos en todos los puntos de control las concentraciones de hierro se encuentran dentro de los rangos operacionales establecidos por el manual, pero tiene un comportamiento mejor en los valores máximos de los dos factores. (Ver Tabla 29).

Tabla 29. Comparaciones múltiples para Hierro - Test de Duncan

HIERRO										
TRATAMIENTO	TANQUE DE AGUA FILTRADA		CATIÓN		ANIÓN		MIXBED		TANQUE DE AGUA DEMI	
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	0,01	A	1,70E-03	A	0,01	A	0,01	A B	1,70E-03	A
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	3,30E-03	A	1,70E-03	A	3,30E-03	A	0	A	0	A
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	0,01	A	0,01	A B	0,01	A	0,01	A B	0,01	B
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	0,01	A	0,01	B	0,01	A	0,01	B	0,01	B
RANGOS OPERATIVOS	0-0,2 ppm		N/A		N/A		N/A		0-0,01 ppm	

Nota: Diferencias significativas entre tratamientos, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Turbiedad.

El ANOVA referente al comportamiento de la turbiedad a la salida del Sistema de Intercambio Iónico indica un rechazo de la hipótesis nula con una significancia de 0,0009 del modelo en general, y unos niveles de significancia importantes para el factor Caudal y la interacción de los Factores de Caudal*Presión, siendo 0,0001 para el primero y 0,0003 para el segundo. (Ver Tabla 31)

Tabla 30. R^2 y R^2 ajustado para turbiedad

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Mixed	24	0,78	0,66	48,77

Nota: N: Numero, CV: Coeficiente de variación, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Conforme a los resultados del R^2 se puede indicar que la dispersión de la distribución de los datos es despreciable y el R^2 ajustado sustenta lo anteriormente dicho al exponer que el modelo es efectivo para la realización de predicciones del comportamiento de este parámetro resultante de las variaciones de caudal y presión en un 66%, sin embargo, el coeficiente de variación (CV) exhibe una variabilidad a considerar, esto atribuible a que la significancia del factor presión supera en gran medida al límite de aceptación de 0,05, demostrando que este no es determinante para la variación de las concentraciones de turbiedad, sin embargo, este en interacción con el factor caudal si influye en la variación de las concentraciones de turbiedad.

Tabla 31. ANOVA para turbiedad

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	1,15	8	0,14	6,6	0,0009
Caudal	0,58	1	0,58	26,57	0,0001
Presión	1,20E-03	1	1,20E-03	0,06	0,8175
REP	0,11	5	0,02	1	0,4522
Caudal*Presión	0,46	1	0,46	21,17	0,0003
Error	0,33	15	0,02		
Total	1,48	23			

Nota: SC: Suma de cuadrados, gl: Grados de libertad, CM: Cuadrados medios, F: Varianza, Valor p: Significancia, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

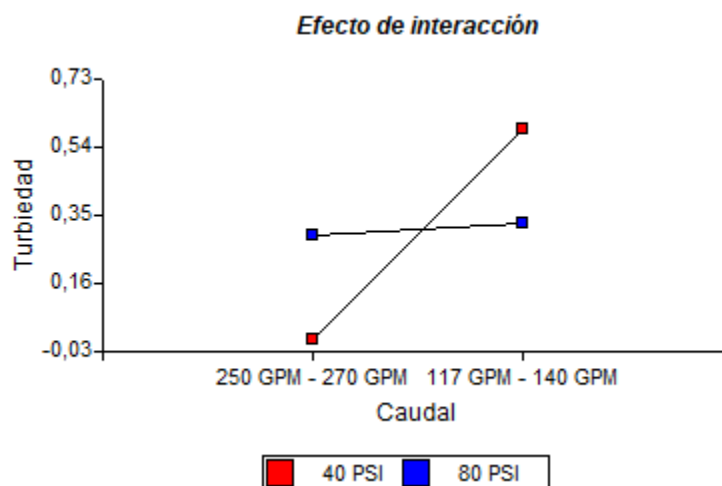


Figura 11. Efecto de interacción para turbiedad, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

El gráfico de interacción (Figura 11) expone unos valores de Turbiedad bajos en el caudal máximo independientemente de la presión. Sin embargo, el escenario más óptimo es el correspondiente a máximo caudal y mínima presión; por otra parte, aunque el modelo general de ANOVA muestra una significancia considerable entre la interacción de caudal y presión, la segunda en su nivel máximo no tiene mayor influencia en las concentraciones de dicho parámetro.

La Tabla 32 resultante del Test de Duncan para la Turbiedad, muestra que cualquiera de los escenarios obedece a las restricciones de operación en cualquiera de los puntos de muestreo tenidos en cuenta, además se evidencia diferencias estadísticas significativas entre los escenarios con menor presión vs mayor presión. No obstante, la diferencia estadística significativa más

relevante es para el tratamiento con menor presión vs mayor caudal en todo el sistema de intercambio iónico, haciendo posible que, si en determinado momento se requiere unos rangos operativos mucho más exigentes, este escenario sería el indicado y de la misma manera haría disminuir el tiempo de funcionamiento del Sistema de Intercambio Iónico requerido para llenar el tanque de agua desmineralizada.

Tabla 32. Comparaciones múltiples para Turbiedad - Test de Duncan

TURBIEDAD											
TRATAMIENTO	TANQUE DE AGUA FILTRADA		CATIÓN		ANIÓN		MIXBED		TANQUE DE AGUA DEMI		
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	0,48	B	0,3	B	0,36	B	0,33	B	0,34	B	
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	0,55	B	0,33	B	0,34	B	0,29	B	0,37	B	
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	0,01	A	3,30E-03	A	0,01	A	1,70E-03	A	3,30E-03	A	
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	1,13	C	1,14	C	0,49	B	0,59	C	0,52	B	
RANGOS OPERATIVOS	0-1 NTU		N/A		N/A		N/A		N/A		

Nota: Diferencias significativas entre tratamientos, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Conductividad.

La Tabla 34 referente al ANOVA de la conductividad a la salida del Sistema de Intercambio Iónico muestra un modelo general con un valor de significancia por debajo del 0,0001, efectuando así un rechazo de la hipótesis nula y aceptación de la hipótesis alternativa; adicionalmente muestra que valor de significancia de este modelo se debe a que los niveles de significancia en cuanto a cada factor y la interacción de los mismos también se encuentran por debajo del mismo valor, es decir, dichos factores y la interacción de estos influyen en el comportamiento de las concentraciones de conductividad.

Tabla 33. R^2 y R^2 ajustado para conductividad

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Mixbed	24	1	1	5,64

Nota: N: Numero, CV: Coeficiente de variación, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

De acuerdo con los resultados del R^2 , el R^2 ajustado y el coeficiente de variación (CV) se determina que el modelo es perfecto al alcanzar valores de 1 en los dos primeros e inferiores al 30% para el ultimo, esto debido a que, según la significancia del modelo al ser inferior al 0,05, la

variabilidad de los dos factores estudiados y la interacción de los mismos son determinantes en las variaciones de conductividad.

Tabla 34. ANOVA para conductividad

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	675,97	8	84,5	1089,51	<0,0001
Caudal	230,58	1	230,58	2973,12	<0,0001
Presión	180,57	1	180,57	2328,26	<0,0001
REP	0,22	5	0,04	0,57	0,7217
Caudal*Presión	264,6	1	264,6	3411,86	<0,0001
Error	1,16	15	0,08		
Total	677,13	23			

Nota: SC: Suma de cuadrados, gl: Grados de libertad, CM: Cuadrados medios, F: Varianza, Valor p: Significancia, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

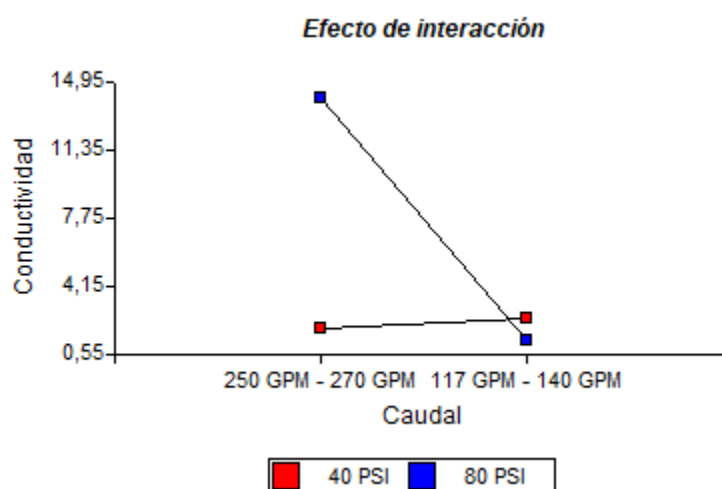


Figura 12. Efecto de interacción para conductividad, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

En el gráfico de interacción correspondiente a la Figura 12 se afirma que con una presión baja no hay gran significancia respecto a las concentraciones de conductividad, por el contrario, con una presión alta las concentraciones varían de manera significativa, sin embargo, por la interacción entre el factor caudal y el factor presión se denota un mejor comportamiento de la variable de respuesta en el escenario con un caudal mínimo y una presión máxima, pero dado el caso en que los equipos no soporten una presión tan alta y se requiera unas concentraciones similares, se podría aumentar en esta fase el caudal y disminuir la presión ya que a baja presión y a bajo caudal los valores están un poco por encima del escenario ideal.

Analizando la Tabla 35 de comparaciones múltiples para la conductividad se evidencia que, las variaciones de concentraciones entre los puntos de muestreo y los tratamientos planteados tienen variaciones significativas en la mayoría de los casos, sin embargo, en las etapas iniciales del Sistema de intercambio iónico los escenarios que presentan mayores concentraciones tienen un mejor comportamiento en el producto final. Por otra parte, es de aclarar que, aunque el agua producto del proceso de desmineralización en tres de los cuatro tratamientos realizados se encuentran dentro del rango operacional, ninguno de los cuatro tratamientos en las tres etapas anteriores obedece a los rangos operativos para ellos, pudiendo así ocasionar un mayor gasto en químicos y tiempo requerido para la regeneración de las resinas (González, 2014).

Tabla 35. *Comparaciones múltiples para Conductividad - Test de Duncan*

CONDUCTIVIDAD										
TRATAMIENTO	TANQUE DE AGUA FILTRADA		CATION		ANION		MIXBED		TANQUE DE AGUA DEMI	
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	59,03	B	157,15	C	8,83	A	1,26	A	2,03	A
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	53,62	A	117,22	A	23,22	B	14,1		D	10,72 B
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	63,52	C	135,62	B	23,87	B	1,98	B	2,08	A
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	69,38	D	134,2	B	33,58	C	2,42	C	2,03	A
RANGOS OPERATIVOS	0-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$		0-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$		0-5 $\mu\text{S}/\text{cm}$		0-3 $\mu\text{S}/\text{cm}$		0-3 $\mu\text{S}/\text{cm}$	

Nota: Diferencias significativas entre tratamientos, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

pH.

En cuanto al comportamiento del potencial de hidrógeno a la salida del Sistema de Intercambio Iónico, la Tabla 37 expone el modelo con una significancia $<0,0001$, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se aprueba la hipótesis alternativa, también se debe hacer mención a que cada factor y la interacción de los mismos presentan también una significancia $\leq 0,0001$, esto nos quiere decir que tanto los factores como la interacción de los mismos presentan diferencias significativas, aunado a esto se observa que el valor F del factor presión es mayor, esto quiere decir que la varianza del pH es generada por el factor más que por la variable.

Tabla 36. R^2 y R^2 ajustado para pH

Variable	N	R^2	$R^2\text{Aj}$	CV
Mixbed	24	0,95	0,92	5,81

Nota: N: Numero, CV: Coeficiente de variación, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

De acuerdo con los resultados del R^2 , el R^2 ajustado y el coeficiente de variación (CV) se determina que el modelo es perfecto al alcanzar valores cercanos a 1 en los dos primeros e inferiores al 30% para el último, esto debido a que, según la significancia del modelo al ser inferior al 0,05, la variabilidad de los dos factores estudiados y la interacción de los mismos son determinantes en las variaciones de pH.

Tabla 37. ANOVA para pH

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	45,71	8	5,71	35,65	<0,0001
Caudal	4,82	1	4,82	30,1	0,0001
Presión	35,62	1	35,62	222,28	<0,0001
REP	0,74	5	0,15	0,93	0,4918
Caudal*Presión	4,52	1	4,52	28,23	0,0001
Error	2,4	15	0,16		
Total	48,12	23			

Nota: SC: Suma de cuadrados, gl: Grados de libertad, CM: Cuadrados medios, F: Varianza, Valor p: Significancia, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Respecto a la gráfica de interacción (Figura 13) se puede observar que; aunque no existe interacción entre los factores el mejor modelo de acuerdo a los rangos operacionales es el de bajo caudal y alta presión, sin embargo, fuera de este no hay posibilidad de contar con un pH entre 6 y 8, como es lo requerido por el Mixbed.

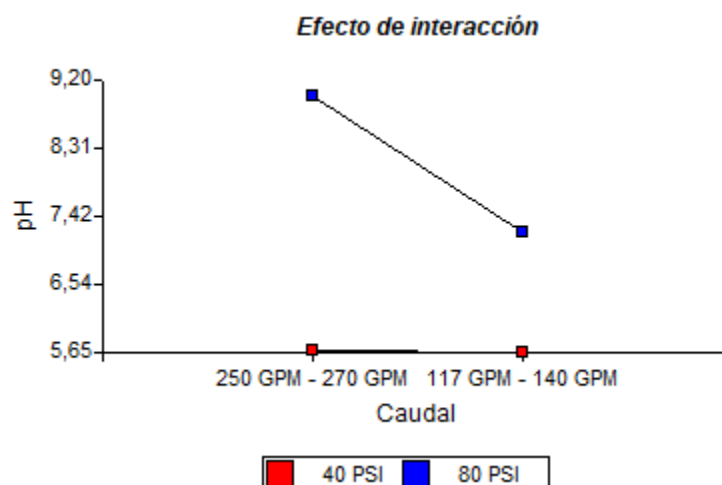


Figura 13. Efecto de interacción para pH, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Corroborando lo anteriormente mencionado se encuentra la Tabla 38 que, si bien el pH se encuentra fuera de los rangos operacionales en el tanque de agua filtrada y en el anión, en el Mixbed y el tanque de agua desmineralizada si se encuentra dentro de los rangos, cosa contraria a los demás tratamientos, por tanto, el tratamiento con diferencia estadística significativa es el compuesto por bajo caudal y alta presión. Sin embargo, la aplicación de este tratamiento implicaría un mayor tiempo de operación, por lo cual sería apropiado analizar cómo reaccionan las resinas a este tratamiento, es decir, cada cuanto tiempo se requeriría realizar una regeneración de las mismas y por qué razón. Por otro lado, es de anotar que el catión tiene una diferencia significativa en los tratamientos con baja presión, aunque, el pH no se encuentra fuera del rango en ningún tratamiento.

Tabla 38. Comparaciones múltiples para pH - Test de Duncan

TRATAMIENTO	Ph									
	TANQUE DE AGUA FILTRADA		CATIÓN		ANIÓN		MIXBED		TANQUE DE AGUA DEMI	
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	5,67	A	3,09	A	8,76	A	7,23	B	7,98	B
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	5,81	A	3,03	A	9,1	B	8,99	C	8,77	C
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	7,31	B	3,91	B	10,08	C	5,69	A	5,89	A
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	7,75	C	3,97	C	10,23	C	5,66	A	5,94	A
RANGOS OPERATIVOS	7-9		3-5		6-8		6-8		6-8	

Nota: Diferencias significativas entre tratamientos, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

A manera general se pudo observar que, mediante el ANOVA, en el agua producto del proceso de desmineralización, todos los escenarios rechazan la hipótesis nula y aceptan la hipótesis alternativa con unos niveles de significancia que oscilan entre unos valores de 0,0493 y por debajo de 0,0001.

De acuerdo con los resultados de las comparaciones múltiples se logró determinar que; cualquiera de los tratamientos para los parámetros de sílice y hierro arrojaron resultados comprendidos dentro de los rangos operacionales, además, el mejor escenario para los dos parámetros es el de la interacción entre mayor presión y menor caudal, sin embargo, cabe destacar que respecto al comportamiento de la turbiedad aplicaría también el mismo escenario ya

que el manual de operaciones no establece rangos mínimos y máximos para este, lo cual hace que obviemos este parámetro durante el proceso de desmineralización.

Adicionalmente, obedeciendo a las comparaciones del comportamiento de la conductividad se observa que durante la fase inicial del proceso de desmineralización (tanque de agua filtrada, catión, anión) los valores están por fuera de los rangos establecidos, sin embargo el agua producto final del proceso si obedece a los requerimientos estipulados en el manual y nuevamente tiene un mejor comportamiento el escenario de caudal mínimo y presión máxima, pero se reitera una vez más que podría ser el escenario en que se sature más rápido los reactores aniónico y catiónico ya que los valores obtenidos a la salida de los mismos en dicho escenario son los más altos respecto a los demás.

De igual manera, se observó que para el comportamiento del pH el mejor escenario es el correspondiente a mayor presión y menor caudal, puesto que el agua producto del proceso de desmineralización es el único que obedece a los rangos operacionales establecidos, sin embargo, es importante aclarar que todos los escenarios en la salida del catión estaban dentro de los rangos de aceptación, pero en el anión todos los valores se encontraban por fuera.

Por todo lo anterior, se puede concluir que el escenario más relevante y confiable para cumplir con los requerimientos operacionales exigidos a la salida del proceso de desmineralización es el de menor caudal y mayor presión. Sin embargo, se recomienda profundizar más en este escenario a manera técnico-experimental teniendo en cuenta la relación costo beneficio referente a la frecuencia de regeneración de las resinas utilizadas en el tren (una vez cada dos semanas), el reemplazo de las mismas (cada 5 años) y el tiempo de funcionamiento requerido para satisfacer el volumen de agua demandado por la actividad de la industria.

Comparación del mejor escenario con el escenario de control.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el escenario que tuvo un mejor comportamiento respecto a las recomendaciones operacionales establecidas en la etapa del tren de desmineralización fue el de caudal mínimo (117 GPM - 140 GPM) y presión máxima (80 PSI); el cual fue evaluado en contraste con el escenario de control, que operó bajo unas condiciones de presión oscilante entre 64 PSI y 73 PSI, y un caudal entre 274 GPM y 278 GPM, con el objetivo de determinar cuál presentó un mejor desempeño:

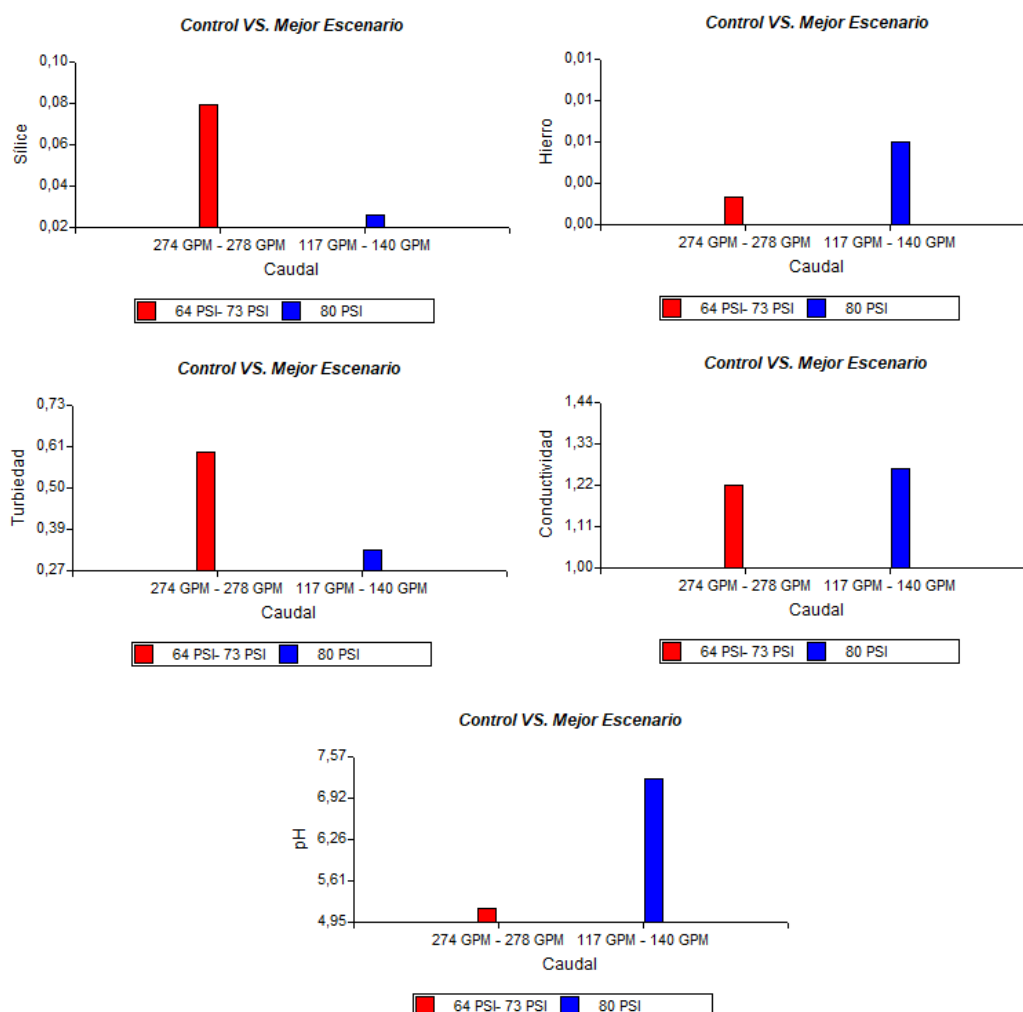


Figura 14. Comportamiento de parámetros con el mejor escenario y el usual, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Con los experimentos realizados y los análisis de laboratorio fue posible determinar las concentraciones de los parámetros de sílice, hierro, turbiedad, conductividad y pH, donde se destacó el escenario de máxima presión y mínimo caudal sobre el de control, ya que las concentraciones de sílice y turbiedad son considerablemente bajas, lo cual favorece a los procesos posteriores a esta etapa, además, aunque los parámetros de hierro y conductividad presentan un comportamiento menos favorable que en el escenario de control, estos aún se encuentran dentro de los rangos operacionales establecidos en el manual y la diferencia entre ambos no es significativa; por otra parte, los requerimientos para pH solo se cumplió en el escenario de máxima presión y mínimo caudal ya que en el de control los valores están por debajo del rango exigido (Figura 14).

En consecuencia, es evidente que operar el Tren de Intercambio Iónico en unas condiciones de máxima presión y mínimo caudal es el más propicio para cumplir con los requerimientos operacionales de esta etapa.

Comparación de tratamientos de acuerdo con el porcentaje de remoción.

Como se puede observar en la Tabla 39, el sistema de intercambio iónico con que cuenta la termoeléctrica presenta una efectividad de remoción alta para el control de sílice y conductividad casi en la totalidad de los tratamientos realizados, sin embargo, para el caso de la turbiedad solo se podría considerar favorable uno de los cinco tratamientos ya que los demás no alcanzan siquiera una efectividad del 50%, además, para la reducción o eliminación de hierro presente en el agua solo uno de los cinco tratamientos fue significativo en un 100% y la efectividad de remoción en los otros tratamientos fue absolutamente nula.

Tabla 39. % de remoción en el sistema de intercambio iónico

TRATAMIENTO	Sílice	Hierro	Turbiedad	Conductividad
117 GPM - 140 GPM & 80 PSI	98,14	0,00	31,25	97,87
250 GPM - 270 GPM & 80 PSI	96,36	100,00	47,27	73,70
250 GPM - 270 GPM & 40 PSI	95,93	0,00	83,00	96,88
117 GPM - 140 GPM & 40 PSI	96,20	0,00	47,79	96,51
274 GPM - 278 GPM & 64 PSI- 73 PSI	94,94	0,00	40,00	97,97

Nota: Porcentajes de remoción por parámetro, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Es importante aclarar que para esta etapa del STAI dentro del manual operacional con que cuenta la termoeléctrica solo se contemplan los parámetros de sílice, pH y conductividad, haciendo que se omita el comportamiento del hierro y la turbiedad, permitiendo determinar que las condiciones de operación más recomendables para este sistema en relación a las necesidades de la industria son a un caudal bajo y una presión máxima ya que el parámetro de sílice es el factor de riesgo más importante y presenta una efectividad de remoción del 98,14% en dichas condiciones, no obstante, aunque el porcentaje de remoción para la conductividad sea el segundo más significativo, solo tiene una diferencia del 0,1% con respecto al primero y como se muestra en la Figura 13. Efecto de interacción para pH, este escenario es el único que cumple los requerimientos para pH por mantener las concentraciones entre un rango de 6,0 y 8,0.

Modificaciones

Para esta última fase se llevó a cabo una reunión con los profesionales del área operativa, con el fin de desarrollar un taller a manera de debate, donde se definió inicialmente los atributos y criterios a tener en cuenta para la selección de la tecnología más apropiada que satisfaga las necesidades de la empresa; seguidamente, se identificaron los criterios de mayor y menor relevancia, asignándoles en común acuerdo, un peso de importancia a cada uno desde los diferentes puntos de vista de los asistentes al taller (Ver Anexo 12) en base a la experiencia adquirida con los años, de acuerdo a su profesión y el cargo desempeñado en la empresa (Tabla 40):

Tabla 40. *Matriz de decisión*

Atributo	Criterio	Peso de importancia	II	OI	EDI	OI & EDI
Técnico	Confiabilidad	30,0%	15,00%	18,00%	0,00%	27,00%
	Viabilidad	2,0%	1,96%	1,96%	0,60%	1,20%
	Flexibilidad	0,5%	0,15%	0,40%	0,30%	0,45%
	Complejidad	0,5%	0,15%	0,40%	0,45%	0,43%
	Accesibilidad ocupacional (Salud)	1,0%	0,10%	0,80%	0,90%	0,90%
	Requerimientos de análisis y controles	5,0%	1,00%	4,50%	1,50%	4,75%
	Tratamiento y manejo de subproductos (Salud Ocupacional)	5,0%	0,00%	4,00%	4,00%	4,00%
Económico	Costos (inversión, operación y mantenimiento)	20,0%	2,00%	14,00%	10,00%	12,00%
	Requerimiento de área	5,0%	0,00%	4,00%	4,50%	4,00%
	Empleo de energía eléctrica	0,5%	0,15%	0,40%	0,25%	0,35%
	Disposición Final Tratamiento	0,5%	0,10%	0,45%	0,45%	0,40%
	Requerimiento de personal calificado	10,0%	1,00%	8,00%	9,00%	8,50%

Atributo	Criterio	Peso de importancia	II	OI	EDI	OI & EDI
Ambiental	Impactos ambientales (Residuos/Contaminación)	20,0%	0,00%	18,00%	18,00%	18,00%
	*ITO_{STAI}	100,00%	21,61%	74,91%	49,95%	81,98%

Nota: *índice de Tecnología Óptima, II: Intercambio Iónico, OI: Ósmosis inversa, EDI: electrodiálisis, OI & EDI: Ósmosis Inversa y Electrodiálisis, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

La matriz de decisión resultante del taller muestra que para el personal de la empresa los criterios más relevantes para la selección de una tecnología para el tratamiento de agua obedecen a tres atributos generales basados en un diagnóstico técnico, económico y ambiental, donde el primero representa el 44%, seguido del económico con un 36% y por último el componente ambiental con un 20%.

Los criterios con mayor peso de importancia obedeciendo al diagnóstico planteado inicialmente son Confiabilidad, Costos de inversión, operación y mantenimiento, Impactos ambientales generados por Residuos y requerimiento de personal calificado.

Al criterio de confiabilidad se le asignó el mayor peso de importancia con un 30%, justificándolo en que a mayor presencia de anomalías se genera un aumento en los tiempos y costos para la identificación y solución de problemas. En segundo lugar, con un peso del 20% se encuentran los criterios de costos de inversión, operación y mantenimiento y los impactos ambientales ocasionados por la generación de residuos; la relevancia de estos dos criterios radica en que, para el primero a nivel empresarial, una mayor demanda de recursos financieros para el mantenimiento de los diferentes procesos, reduce significativamente las utilidades de cualquier empresa pudiendo llevar a la toma de decisiones como recortes de personal entre otras, y para el segundo, por la creciente percepción de conservación y protección del medio ambiente a nivel general, así como también una estrategia de competitividad a nivel empresarial para mejorar la imagen de la empresa, aumentar las ventas, incrementar la satisfacción de los empleados y otros actores, reducción de costos, así como también el cumplimiento de la legislación ambiental, entre otros.

Finalmente, dentro de los criterios más relevantes y con un peso del 10% se encuentra el requerimiento de personal calificado, siendo un peso atribuido a la aparición de ciertos eventos que han sido difíciles de controlar o solucionar, ya que por el tipo de actividad de la industria y el perfil del personal requerido en la misma han tenido que optar por la contratación de otros profesionales con un perfil diferente al que demanda la empresa ya que los procesos que involucra una planta de agua requiere personal con ciertas aptitudes específicas.

Por otra parte, es trascendente aclarar que se definieron otros criterios importantes para el personal que deben ser tenidos en cuenta al momento de desarrollar el diagnóstico, sin embargo, los criterios con menor relevancia en un peso de importancia del 0,5% son flexibilidad y complejidad en el aspecto técnico y para el aspecto económico por los costos asociados al empleo o demanda de energía eléctrica requerida por la tecnología y los costos asociados al tratamiento de residuos generados por la misma.

La justificación de los bajos pesos de importancia para estos criterios de acuerdo con los participantes del taller es que; para el caso de la flexibilidad, las empresas con quienes realizan las cotizaciones y contrataciones para la implementación de una nueva tecnología a utilizar les exige inicialmente los requerimientos que demanda la empresa o las condiciones que debe garantizar la tecnología, así como también se les exige toda la información de los procesos previos y posteriores con que cuenta ya la empresa, haciendo que el diseño de la tecnología a implementar les sugiera la modificación de otras etapas del proceso, como también contempla la eventualidad o aparición de sucesos extraños para poder garantizarle a la industria un agua con las condiciones requeridas, es decir, la empresa encargada de diseñar y suministrar la nueva tecnología contempla todos los factores posibles para que dicha tecnología no les genere inconvenientes.

Respecto a la complejidad, asignaron un bajo porcentaje (0,5%) ya que todas las empresas con las que contratan para la implementación de cualquier tipo de tecnología les proporciona su respectivo manual de operación además de capacitaciones para manipularlo correctamente.

La baja relevancia asignada al criterio de costos asociados o generados por el consumo de energía eléctrica requerida por la tecnología (0,5%), se debe a que es realmente insignificante respecto a la cantidad de energía que la misma empresa genera por el tipo de actividad industrial

que desarrolla. Es decir, es auto sustentable y no les genera un consumo significativo y mucho menos un gasto pecuniario.

El último criterio de baja importancia fue el de los costos asociados al tratamiento de residuos generados por el tipo de tecnología (0,5%), esto se debe a que la misma empresa se encarga de realizar el tratamiento de estos residuos haciendo que los costos sean mucho menores.

Después de haber identificado los atributos, los criterios y los pesos de importancia de cada uno, se les mostró tres tipos de tecnología más utilizados para la obtención de agua ultra pura y se les indico asignar porcentajes de cumplimiento de cada una obedeciendo a los diferentes criterios y los porcentajes de importancia asignados por ellos anteriormente; sin embargo, los mismos sugirieron adicionar una nueva columna en la matriz en donde se calificara la interacción entre la tecnología de Ósmosis inversa y Electrodesionización.

De acuerdo con la matriz de decisión se pudo determinar que la tecnología que menos satisface las necesidades de la empresa fue la de intercambio iónico, ya que, si bien la viabilidad para adquirir la tecnología y los repuestos presenta una velocidad de respuesta relativamente alta al contar con una empresa prestadora de dichos servicios con sede en Bogotá, los impactos generados por los residuos contaminantes del proceso de intercambio iónico correspondiente al agua de rechazo y el producto del retrolavado y la regeneración realizada con soda y ácido es muy alta si no se efectúa una correcta disposición final, que dada la relevancia del mismo genera unos costos de tratamiento muy elevados en comparación con las otras tecnologías.

En cuanto a la confiabilidad del tren de desmineralización se pudo comprobar en la fase 1 correspondiente al análisis de confiabilidad que los parámetros evaluados en dicha etapa se encontraban por fuera de los rangos operacionales óptimos del sistema resolviendo que este no era confiable, también es de anotar que no es un sistema flexible ya que exige un operario altamente capacitado que tenga criterio de decisión al momento de enfrentarse a las anomalías que se presentan cotidianamente con este sistema, por lo que se hace imprescindible unos análisis y controles constantes de los parámetros evaluados en esta etapa, lo cual implica que sea una tecnología con alta complejidad.

Adicionalmente, la accesibilidad y el tratamiento y manejo de subproductos del tren de desmineralización genera inconvenientes a nivel de salud ocupacional al ser una estructura de gran tamaño que complica la toma de muestras al requerir la utilización de escaleras, la

maquinaria adecuada para el recibo de soda y ácido, subproductos necesarios para la regeneración de las resinas utilizadas, sin contar con los EPI (Elementos de Protección Individual) que deben tener los operarios al estar en contacto con sustancia corrosivas y gases tóxicos que amenazan la integridad de los trabajadores y la generación de ruido por parte de las bombas de alimentación. Por otra parte, los costos en que se incurre con la adquisición de esta tecnología como de los subproductos, como la soda y el ácido en gran cantidad ya que al ser una tecnología tan antigua requiere ser regenerada cada 15 días y el consumo de energía eléctrica en comparación con las demás tecnologías es elevado.

Por otra parte, la tecnología de electrodesionización, aunque tiene un porcentaje un poco por encima del doble respecto a la tecnología de intercambio iónico no es la más conveniente a implementar para obtener agua con características de alta pureza si la misma trabaja sola, es decir, la implementación de una electrodesionización es buena y realmente efectiva para disminuir concentraciones de algunos parámetros presentes en el agua siempre y cuando estos se presenten en unas concentraciones realmente bajas, ya que si el afluente que alimenta esta tecnología presenta características de un agua tratada mediante un proceso convencional de clarificación y filtración se saturaría rápidamente ocasionando una mayor demanda de tiempo y costos asociados al mantenimiento y reparación de los componentes de este equipo, además la calidad del efluente generado por la misma no estaría comprendida como un agua de alta pureza.

Por lo anterior, los participantes del taller de diagnóstico técnico-económico-ambiental asignaron un valor de 0% para el criterio de mayor importancia (confiabilidad) a nivel técnico en la electrodesionización; sin embargo, esto no afecta de manera significativa el valor total del porcentaje calculado para el índice del peso de importancia de esta tecnología, ya que la electrodesionización obtuvo un valor del 49,95% y el intercambio iónico un 21,61%, es decir, una diferencia un poco mayor al 100% de la primera respecto a la segunda; esto se debe a que los trabajadores asignaron mayores pesos de importancia a los criterios de accesibilidad, tratamiento y manejo de subproductos, requerimiento de área, requerimiento de personal e impactos ambientales asociados a los residuos generados ya que la electrodesionización es mucho más compacta, demanda una menor cantidad de productos químicos y en menores concentraciones para el mantenimiento de sus componentes estimulando una menor generación de residuos y facilitando de igual manera los procesos de tratamiento de los mismos, además, no requiere de

personal estrictamente capacitado para el mantenimiento de sus unidades o módulos y es menos nocivo respecto a la salud de sus trabajadores.

Aunque la electrodesionización muestre un mejor índice de peso de importancia frente al intercambio iónico, esta no es la mejor ya que el porcentaje calculado para la Osmosis Inversa fue del 74,91%, indicando que esta es la más favorable para implementar en los procesos de la empresa de acuerdo con el conocimiento y experiencia adquirida en el ámbito laboral por parte de los participantes del taller.

De acuerdo con las justificaciones planteadas por los participantes en el desarrollo del diagnóstico, los criterios más destacados para la Osmosis inversa frente a las otras dos tecnologías fueron la confiabilidad del sistema, sin embargo, dentro de un valor máximo del 30% para este criterio, la osmosis inversa tuvo asignado un 18% ya que si bien es una tecnología muy eficiente por la cantidad de parámetros y la significativa reducción de concentraciones de cada uno y que la calidad del efluente es realmente buena, esta no alcanza a cumplir con los requerimientos de la termoeléctrica en ciertos parámetros como es el caso de la sílice ya que es un compuesto de difícil remoción; es importante aclarar, que la reducción de las concentraciones de sílice son buenas, pero las necesidades de la industria son aún más exigentes. Por otra parte, otros criterios que se destacan en la osmosis inversa en comparación con las demás, fueron los de requerimientos de análisis y controles, costos de inversión, operación y mantenimiento y el consumo de energía eléctrica demandado para la operación de la misma; lo cual se debe a que generalmente la osmosis inversa comprende un robusto conjunto de sensores en línea, los cuales se encargan de mostrar las concentraciones de parámetros puntuales disminuyendo tiempos en análisis de laboratorio y costos de reactivos para la realización de estos, además, el mantenimiento de esta tecnología según los trabajadores de la termoeléctrica, es menos frecuente y demanda menos cantidad de productos químicos para efectuarlo y el cambio de los cartuchos usados por la osmosis inversa se efectúa entre cada 16 y 18 meses aproximadamente, siendo rentable por el tiempo de vida útil que ofrece.

Respecto a los criterios de tratamiento y manejo de subproductos, disposición final de residuos generados e impactos ambientales asociados, se le asignaron los mismos valores que se le asignaron a la electrodesionización, los cuales son mayores en comparación con el intercambio iónico, pero para el caso de viabilidad, se asignaron valores iguales entre intercambio iónico y

osmosis inversa los cuales son mayores respecto a la electrodesionización debido a que a nivel nacional se encuentran distintos proveedores de este tipo de tecnologías y para la electrodesionización los proveedores más confiables se encuentran en Brasil y México.

En cuanto a la tecnología que más se adapta a los requerimientos de la Termoeléctrica, la Osmosis inversa parece ser la mejor alternativa, sin embargo, al evaluar la operación en conjunto de esta tecnología con la electrodesionización, se logró obtener un valor para el índice del peso de importancia de un 81,98%, ya que aunque ciertos criterios se ven afectados de manera negativa como es el caso de requerimiento de área y consumo energético para el funcionamiento de estas tecnologías, estas variaciones son realmente insignificantes, a diferencia de un aumento considerable de ciertos criterios como es el de confiabilidad y que además es el más relevante logrando tomar un valor de 27% en un rango máximo de 30%. Por esto, se concluye por parte de los participantes del taller, que lo más recomendable es contar con un sistema en línea conformado por Osmosis inversa seguido de una electrodiálisis, ya que de esta manera se lograría cumplir con todos los requerimientos que exige la termoeléctrica para el proceso de producción de agua ultra pura suministrada al sistema de generación de energía eléctrica, además que el trabajo en conjunto de estas dos tecnologías actúa como un sistema de protección para la integridad de la electrodiálisis haciendo que se le reste importancia al criterio de viabilidad para esta tecnología ya que se prolongaría la vida útil de la misma y potencializaría el porcentaje de esta en el criterio de confiabilidad mediante la implementación de un PLC (Controlador lógico programable), que se encargaría de suspender automáticamente el tratamiento de la OI si los parámetros presentan datos por fuera del rango establecido y por consiguiente el del EDI, y de la misma manera aumentar la flexibilidad de ambas tecnologías y la disminución de la complejidad de la combinación de las tecnologías por el sistema de seguridad que representa el PLC y la eficiencia de la OI, permitiéndole a los operarios centrarse en otros factores de riesgo como el cambio en las presiones que afectan la tubería en la OI y la saturación de las celdas del EDI, ya que de acuerdo con lo discutido en el taller, este tipo de problemas son los que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia pero que se pueden evitar con una vigilancia relativamente estricta.

También es importante señalar que los trabajadores afirman que el costo de inversión de estas dos tecnologías en conjunto es bastante alto, pero de acuerdo a la confiabilidad y múltiples garantías que ofrecen al operar en interacción y las utilidades que representa para esta industria energética un agua en condiciones óptimas haría que el costo de inversión pasara a segundo

plano ya que si bien el costo de las celdas de la electrodesionización es bastante alto, al contar con un sistema confiable previo a esta etapa, la vida útil de las celdas es muy amplia.

Conclusiones

El desarrollo de la revisión histórica de parámetros fisicoquímicos permitió concluir que no se realiza un estricto seguimiento al STAI, lo cual ha contribuido a un deterioro paulatino de todo el sistema ya que la confiabilidad del mismo decae a través del tiempo teniendo en cuenta que solo una de las diez etapas que conforman el STAI supera el umbral de 95% de confiabilidad con un 96,03% en el año 2015 y 95,19% para el 2016, sin embargo, para el año 2017 esta etapa solo alcanza un 91,77% de confiabilidad, mostrando una tendencia negativa al igual que las demás etapas; por otro lado, la probabilidad de que en el futuro presente un comportamiento favorable es igualmente mínima (relación 5:1 rechazando la hipótesis nula en el año 2017).

Los experimentos analizados mediante la metodología de ANOVA no paramétrico de dos vías logró demostrar que el escenario que tiene una mayor efectividad en la remoción de sílice fue el que operó bajo las condiciones de mayor presión y menor caudal (T4), siendo este más favorable para el parámetro de sílice (98,14%) siendo este parámetro el factor de riesgo más importante en el proceso de generación de energía eléctrica, sin embargo, aunque los porcentajes de remoción de los demás tratamientos (T1 95,93%, T2 96,36%, T3 96,20% y Control 94,94%) son más bajos, todos cumplen con los requerimientos establecidos en el manual de operaciones; lo cual no presenta el mismo comportamiento en relación a los demás parámetros (pH, conductividad, hierro y turbiedad), por lo tanto el tratamiento que más se ajusta a las necesidades de la industria en base al manual de operaciones de acuerdo a los valores obtenidos es el T4.

Mediante la evaluación técnico-económico-ambiental desarrollada en colaboración con los trabajadores de la Termoeléctrica de Ocoa se logró concluir que el atributo con mayor peso de importancia es el técnico con un 44% (7 criterios), seguido por el económico 36% (5 criterios) y finalmente el ambiental con un 20% (1 criterio), en donde los criterios más relevantes para el atributo técnico fue la confiabilidad (30%), en el económico fue costos asociados a la inversión, operación y mantenimiento (20%) y el requerimiento de personal calificado (10%) y el atributo ambiental con el único criterio evaluado fue impactos ambientales asociados a la contaminación por residuos (20%); en cuanto a la tecnología que más se ajusta a sus necesidades es la combinación de ósmosis inversa y electrodiálisis con pesos de importancia de 38,73%, 24,20% y 18,00% para los atributos técnico, económico y ambiental respectivamente, completando un peso de importancia de 81,98% tanto por la confiabilidad del sistema en conjunto, como por los

bajos costos de operación en comparación con los beneficios adquiridos con la implementación de estas tecnologías y el bajo impacto ambiental que se produciría con los residuos contaminantes resultantes del proceso del tratamiento.

Discusión y Recomendaciones

Es pertinente resaltar que este estudio tuvo un trasfondo más allá de evaluar la efectividad de remoción de sílice mediante intercambio iónico. Es decir, buscó ser una pieza clave de información para termocoa, permitiéndoles identificar a tiempo los posibles factores de riesgo a tener en cuenta en la toma de decisiones y así reducir la probabilidad de ocurrencia de sucesos que amenacen la integridad del sistema y de todas aquellas máquinas y equipos que pueden ser piezas claves dentro del proceso, como en este caso en concreto es resguardar los componentes de la turbina encargada de la generación de energía eléctrica ya que podría decirse que es el corazón del sistema; por tal motivo se atreve a señalar que el diseño de la planta no se realizó teniendo una proyección tan amplia como el tiempo que lleva en operación la termoeléctrica, además de omitir o menospreciar cambios en variables que no se pueden controlar como diversos tipos de fenómenos naturales y/o antrópicos que puedan presentarse aguas arriba del punto de captación de agua con que se abastece el sistema, los cuales pueden ocasionar cambios progresivos en la calidad del recurso; por otra parte, también es importante apuntar que las modificaciones realizadas durante la actividad de la industria en todo este tiempo han sido con un enfoque de satisfacer el crecimiento de la demanda de energía eléctrica sin tener en cuenta el sistema a nivel global, es decir, se ha hecho inversión en mejoras en otras áreas del proceso de generación de energía eléctrica obviando el STAI y el deterioro del mismo a través del tiempo.

Dotar todo el STAI con sensores conectados a un ordenador que almacene y muestre la trazabilidad de los parámetros analizados para evitar de esta forma los errores sistemáticos por parte de los operarios al momento de ingresar los datos y facilitar la identificación de comportamientos anormales dentro del sistema para corregir fallas en el menor tiempo posible.

Sustituir el Tren de Desmineralización por un sistema conjunto de osmosis inversa y electrodiálisis para garantizar la producción de agua ultra pura y adicionalmente reducir la probabilidad de ocurrencia de fallas, el volumen de agua de rechazo y el consumo de energía eléctrica.

Es recomendable formular un manual operativo de acuerdo con las nuevas condiciones de diseño que contemplaría la inclusión del conjunto de las tecnologías de osmosis inversa y electrodiálisis.

Rediseñar el STAI en las etapas previas a la ósmosis inversa para optimizar y satisfacer las necesidades de la industria, teniendo en cuenta la proyección de la demanda de energía eléctrica. Adicionalmente, se recomienda la implementación de ciertas tecnologías en paralelo que respalden el tratamiento de agua de manera continua.

Respecto a la metodología implementada en esta investigación Se recomienda ampliar la cantidad de datos utilizados para la revisión histórica de los parámetros fisicoquímicos, puesto que a mayor número de datos más precisión en los resultados de confiabilidad, representatividad y probabilidades futuras.

Referente a los tratamientos experimentales se recomienda ampliar la cantidad de parámetros a evaluar y los factores controlables en el tren de desmineralización para identificar verazmente el escenario que más se ajuste a las necesidades de cada industria. Adicionalmente, es conveniente incrementar el número de repeticiones de los experimentos para una mayor precisión del modelo estadístico.

También es apropiado evaluar el tiempo de efectividad que puede mantener el sistema de intercambio iónico en cada escenario evaluado antes de que las resinas requieran una regeneración, de tal manera que pueda ser un punto relevante en el diagnóstico técnico-económico-ambiental. Paralelamente se recomiendan estudios de laboratorio de las técnicas acopladas en los cuales se puedan variar materiales de cátodo y ánodo además de los tiempos de retención para optimizar el proceso.

En cuanto al diagnóstico técnico-económico-ambiental desarrollado se sugiere aplicar conceptos de ingeniería económica al mercado actual de las tecnologías evaluadas para conocer la rentabilidad de cada una.

Finalmente se espera compartir esta investigación con las diferentes termoeléctricas existentes en el país para enriquecer dicha industria con los aportes aquí mencionados.

Referencias Bibliográficas

- Cabezas, J. (2012). Obtención de agua ultrapura en la industria mediante intercambio iónico. *Paradigmas*, 4(1), 59-70.
- Cyclus ID S.L. (s.f.). *Tratamiento Terciario*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/>
- De la Cruz, M., Nápoles, M., & Santana, C. (2012). Evaluación de la planta de tratamiento de agua para los generadores de vapor en la central termoeléctrica 10 de octubre de Nuevitas. *Tecnología Química*, XXXII(3), 265-274.
- Decreto 1541 de 1978 [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. (26 de Julio de 1978).
- Decreto 155 de 2004 [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones (22 de Enero de 2004).
- Decreto 2811 de 1974 [con fuerza de Ley]. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (18 de Diciembre de 1974). D.O.N°34243.
- Del Vigo, F., Gallego, S., Ordóñez, A., Shang, J., & Valdivia, D. (s.f.). Evaluación de diferentes estrategias para la optimización de la operación en sistemas de ósmosis inversa con altas concentraciones de Sílice (SiO_2) en la Planta Desaladora de Arica (Chile). Las Rozas, Madrid: Genesys International.
- Díaz, G., & Enma, C. (2004). *Influencia de las concentraciones de los sólidos solubles std (Ca, Mg, y SiO_2) en la calidad del agua utilizada en las calderas de la central termoeléctrica trinitaria*. Tesis Doctoral, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Químicas, Guayaquil.

Dunne, M., Norris, R., & Mathewson, D. (2006). Detección en seco, deshidratación y tratamiento del agua de costo efectivo. *3ª Conferencia Internacional sobre Procesamiento Sostenible de Minerales*. Newcastle.

Equipos y laboratorio de colombia. (s.f.). *Qué es y usos del espectrofotómetro*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=1311

García, C., Pardo, J., & Rodríguez, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>

Gélover, S., Gutiérrez, A., & Martín, A. (2016). *Remoción de sílice, en agua, mediante electrogeneración de aluminio*. Recuperado el 28 de Junio de 2018, de <https://testlapallitesoem.wordpress.com/2016/05/13/remocion-de-silice-en-agua-mediante-electrogeneracion-de-aluminio/>

Gomez, F., & Sabugal, S. (2006). *Centrales térmicas de ciclo combinado: teoría y proyecto*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

González, G. (2014). *Influencia de la calidad del agua en plantas de potencias de turbinas de vapor*. Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Sevilla.

Guerrero, L., Roca, M., & Sanz, J. (2006). *Producción de Agua de Alta Pureza: Electrodesionización en Continuo (CEDI)*. Recuperado el 28 de Junio de 2018, de <http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17801,Febrero2006.pdf>

Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2012). Diseños factoriales 2^k . En *Análisis y diseño de experimentos* (págs. 150-196). Mexico DF: Mc Graw Hill.

IBM Knowledge Center. (s.f.). R^2 ajustado. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SS4QC9/com.ibm.solutions.wa_an_overview.2.0.0.doc/rsquared_adjusted.html

- International Organization for Standardization. (2004). *Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Lenntech. (s.f.). *Agua ultra pura*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de <https://www.lenntech.es/agua-pura-de-ultra.htm#ixzz57c6OFAqY>
- Lenntech. (s.f.). *Conductividad del agua*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>
- Martínez, O. (2009). *Técnicas estadísticas y diseño de experimentos para la investigación agropecuaria* (Primera ed.). Produmedios.
- Mecanicos Asociados - MASA A STORK COMPANY. (s.f.). *Manual de operación y control planta Termoeléctrica de Ocoa*. Villavicencio: MASA.
- Medina, J. (2000). *Desalacion de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Mendez, R. (22 de agosto de 2017). *Historia de la Termoeléctrica Termocoa*. (E. Linares, & L. Rodriguez, Entrevistadores)
- Menéndez, C., & Pire, S. (25 de Noviembre de 2015). *Tratamiento de Agua y Gestión y Tratamiento de Residuos*. Recuperado el 28 de Junio de 2018, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Menendez_Gutierrez/publication/284188773_Tratamiento_de_Agua_y_Gestion_y_Tratamiento_de_Residuos/links/5655bda308aefe619b1b68d2/Tratamiento-de-Agua-y-Gestion-y-Tratamiento-de-Residuos.pdf
- Nevárez, M. (2009). *Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de la refinería estatal Esmeraldas – Ecuador*. Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Riobamba.
- Osmosis Inversa. (s.f.). *Osmosis Inversa en la Industria*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de <http://osmosisinversa.mx/osmosis.html>

Puretec Industrial Water. (n.d.). *Basics of deionized water by ion exchange*. Retrieved July 28, 2018, from <https://puretecwater.com/downloads/basics-of-ion-exchange.pdf>

Resolución 0631 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (18 de Abril de 2015). D.O.N°49486.

Torrez, M. (2011). Diagnostico de fallos en el generador de vapor BKZ-340-140-29 M de la central Termoeléctrica "Máximo Gómez". *RIELAC*, 32(2), 31-41.

Universidad Autónoma de México. (07 de Abril de 2017). *Matriz de decisiones*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de SUAyED: http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624_u9_Matriz_de_decisiones.pdf

Universidad Nacional Autónoma de México. (01 de Mayo de 2011). *Distribución normal*. Recuperado el 28 de Julio de 2018, de Medwave: <http://paginas.facmed.unam.mx/deptos/sp/wp-content/uploads/2013/12/Quevedo-F.-Distribucion-normal.-Medwave-2011-May-1105.pdf>

Anexos

Anexo 1. Parámetros evaluados por etapa

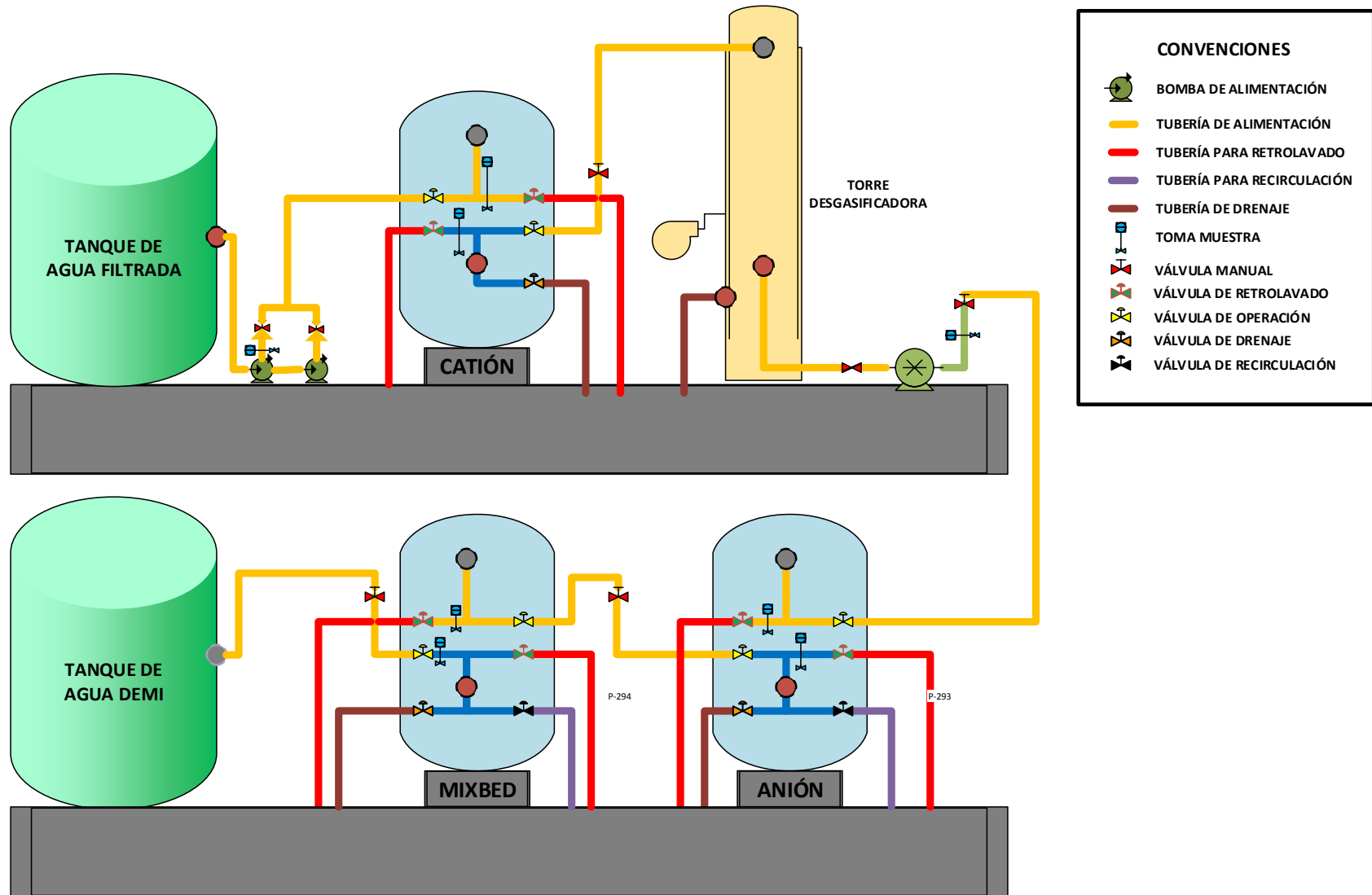
PARAMETROS REGISTRADOS		Unidad	Rango mínimo	Rango máximo
AGUA CRUDA Y DESARENADOR				
Turbiedad	Laboratorio	NTU	0,00	50,00
pH	Laboratorio	N/A	4,00	6,00
Conductividad	Laboratorio	μS/cm	0,00	50,00
Color real	Laboratorio	U. Pt-Co	0,00	10,00
Sólidos en suspensión	Laboratorio	ppm	0,00	20,00
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	5,00
SALIDA CLARIFICACIÓN				
Color real	Laboratorio	U. Pt-Co	10,00	30,00
Turbiedad	Laboratorio	FTU	0,00	3,00
Sólidos en suspensión	Laboratorio	ppm	10,00	30,00
Cloro Libre	Laboratorio	ppm	0,50	1,00
Conductividad	Laboratorio	N/A	7,00	9,00
pH	Laboratorio	N/A	7,00	9,00
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	0,20
FILTRACIÓN				
Color real	Laboratorio	U. Pt-Co	0,00	5,00
pH	Laboratorio	N/A	7,00	9,00
Turbiedad	Laboratorio	NTU	0,00	1,00
Conductividad	Laboratorio	μS/cm	0,00	100,00
Cloro Libre	Laboratorio	ppm	0,00	0,20
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	0,20
Sólidos en suspensión	Laboratorio	ppm	1,00	10,00
TANQUE DE AGUA FILTRADA				
Turbiedad	Laboratorio	NTU	0,00	1,00
Cloro Libre	Laboratorio	ppm	0,00	0,10
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	0,20
pH	Laboratorio	N/A	7,00	9,00
Conductividad	Laboratorio	μS/cm	0,00	100,00
Dureza Ca / Mg	Laboratorio	ppm	0,00	3,00
Alcalinidad Total	Laboratorio	ppm	0,00	10,00

PARAMETROS REGISTRADOS		Unidad	Rango mínimo	Rango máximo
TREN DE DESMINERALIZACIÓN				
Catión	pH sald- Laboratorio	N/A	3,00	5,00
	Cond sald- Laboratorio	μS/cm	0,00	100,00
	CO2 sald- Laboratorio	ppm	0,00	20,00
Torre Desgasificadora	CO2 sald- Laboratorio	ppm	0,00	10,00
Anión	pH sald- Laboratorio	N/A	6,00	8,00
	Cond sald- Laboratorio	μS/cm	0,00	5,00
	Sílice sald- Laboratorio	ppm	0,00	0,30
Mixedbed	pH sald- Laboratorio	N/A	6,00	8,00
	Cond sald- Laboratorio	μS/cm	0,00	3,00
	Sílice sald- Laboratorio	ppm	0,00	0,20
TANQUE DE AGUA DEMI				
pH	Laboratorio	N/A	6,00	8,00
Conductividad	Laboratorio	μS/cm	0,00	3,00
Sílice	Laboratorio	ppm	0,00	0,20
CO2	Laboratorio	ppm	0,00	5,00
Cloruros	Laboratorio	ppm	0,00	0,50
Sulfatos	Laboratorio	ppm	0,00	0,50
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	0,01
EDI				
Resistividad	Dilute Out	MΩcm	15,00	20,00
Temperatura	EDI Feed	°C	25,00	33,00
TANQUE DE AGUA EDI				
pH	Salida EDI	N/A	6,00	9,00
Conductividad	Salida EDI	μS/cm	0,00	1,00
Sílice	Salida EDI	ppm	0,00	0,10
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	0,01
SKID DEL SPRINT				
pH	SKID SPRINT	N/A	6,00	8,00
Conductividad	SKID SPRINT	μS/cm	0,00	1,00
Sílice	SKID SPRINT	ppm	0,00	0,10
TANQUE NEUTRALIZACIÓN				
pH	Laboratorio	N/A	6,50	7,50
Conductividad	Laboratorio	μS/cm	100,00	600,00
Turbiedad	Laboratorio	FTU	0,00	50,00
Hierro Total	Laboratorio	ppm	0,00	4,00

PARAMETROS REGISTRADOS		Unidad	Rango mínimo	Rango máximo
Cloro Libre	Laboratorio	ppm	0,00	2,00
Sulfatos	Laboratorio	ppm	0,00	60,00
Dureza Total	Laboratorio	ppm	0,00	100,00
Alcalinidad Total	Laboratorio	ppm	0,00	80,00

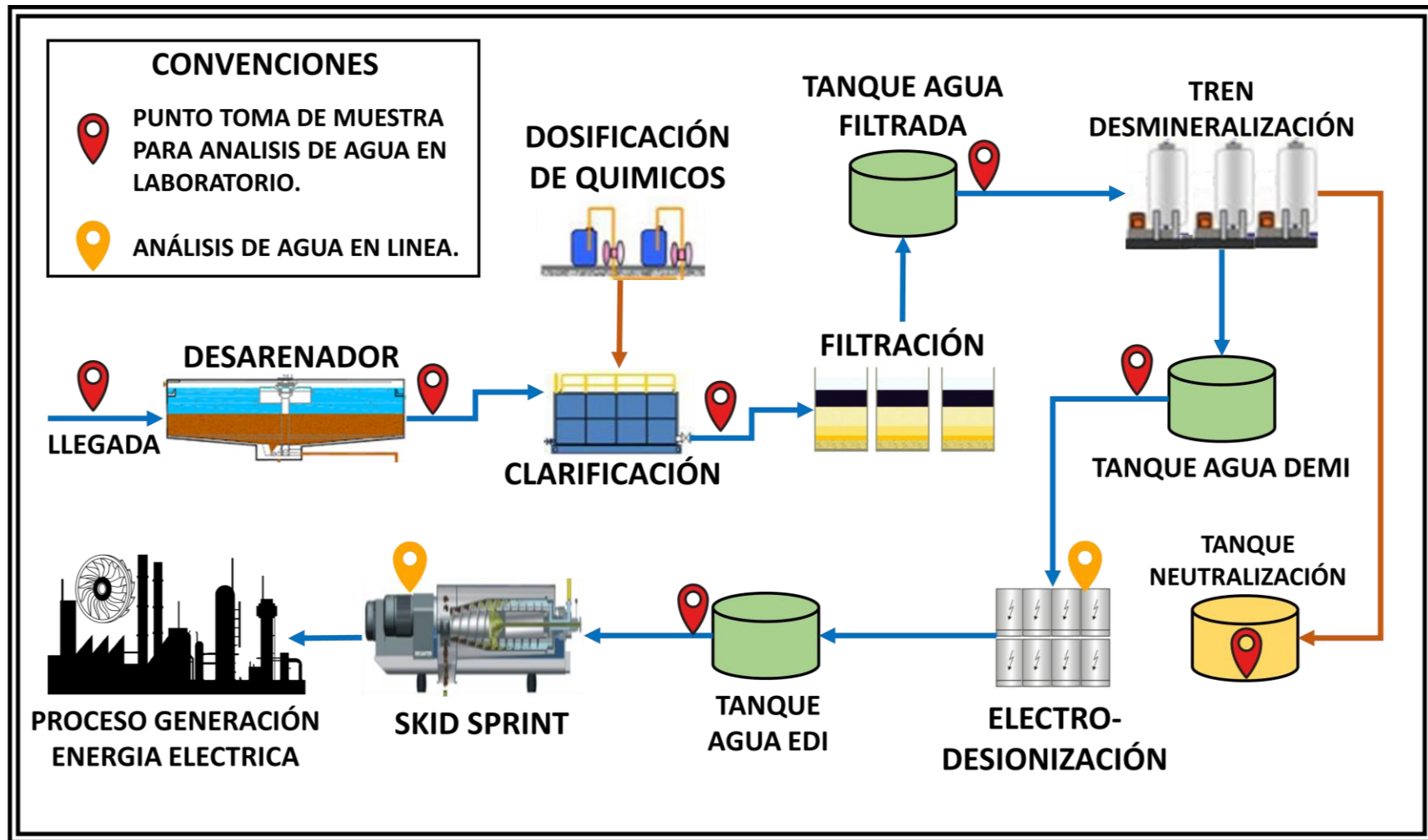
Nota: Descripción de los parámetros evaluados en el STAI y los rangos operacionales establecidos en el manual, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Anexo 2. Tren de desmineralización



Nota: Diagrama del tren de desmineralización y puntos de toma de muestra, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 3. Diagrama de proceso del STAI



Nota: Diagrama del proceso de tratamiento de agua industrial como suministro para el proceso de generación de energía eléctrica, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 4. Registro fotográfico tren de desmineralización



Nota: Vista panorámica del tren de desmineralización, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 5. Registro fotográfico toma de muestras



Nota: Toma de muestras en el tren de desmineralización, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 6. Registro fotográfico análisis de laboratorio



Nota: Pruebas de laboratorio con espectrofotómetro y medidor multiparámetro, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Anexo 7. Tablas de ANOVA para el parámetro de sílice en cada punto de muestreo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Bomba	24	0,88	0,81	13,05

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	3,14	8	0,39	13,2	<0,0001
Caudal	0,35	1	0,35	11,81	0,0037
Presión	2,33	1	2,33	78,55	<0,0001
REP	0,2	5	0,04	1,37	0,2888
Caudal*Presión	0,25	1	0,25	8,39	0,0111
Error	0,45	15	0,03		
Total	3,58	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cación	24	0,7	0,54	19,74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	2,12	8	0,27	4,39	0,0067
Caudal	0,24	1	0,24	3,9	0,067
Presión	1,02	1	1,02	16,86	0,0009
REP	0,38	5	0,08	1,24	0,3382
Caudal*Presión	0,49	1	0,49	8,14	0,0121
Error	0,91	15	0,06		
Total	3,03	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Anión	24	0,61	0,4	84,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	0,17	8	0,02	2,93	0,0349
Caudal	0,1	1	0,1	13,15	0,0025
Presión	0,02	1	0,02	2,35	0,146
REP	0,02	5	3,20E-03	0,44	0,8105
Caudal*Presión	0,04	1	0,04	5,68	0,0308
Error	0,11	15	0,01		
Total	0,28	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Mixbed	24	0,7	0,54	29,59

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	0,01	8	7,20E-04	4,43	0,0064
Caudal	4,00E-03	1	4,00E-03	24,75	0,0002
Presión	1,80E-05	1	1,80E-05	0,11	0,7416
REP	1,40E-03	5	2,80E-04	1,73	0,1877
Caudal*Presión	3,20E-04	1	3,20E-04	1,94	0,1843
Error	2,40E-03	15	1,60E-04		
Total	0,01	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Tanque DEMI	24	0,52	0,26	30,72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	0,01	8	7,20E-04	2,02	0,1151
Caudal	3,70E-03	1	3,70E-03	10,42	0,0056
Presión	1,10E-04	1	1,10E-04	0,32	0,5815
REP	1,60E-03	5	3,20E-04	0,89	0,5135
Caudal*Presión	3,40E-04	1	3,40E-04	0,95	0,345
Error	0,01	15	3,60E-04		
Total	0,01	23			

Nota: Tablas de ANOVA, R^2 y R^2 ajustado para el parámetro de sílice en cada punto de muestreo, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 8. Tablas de ANOVA para el parámetro de hierro en cada punto de muestreo

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Bomba	24	0,24	0	121,22

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	2,30E-04	8	2,90E-05	0,58	0,7767
Caudal	6,70E-05	1	6,70E-05	1,33	0,2663
Presión	6,70E-05	1	6,70E-05	1,33	0,2663
REP	8,30E-05	5	1,70E-05	0,33	0,8849
Caudal*Presión	1,70E-05	1	1,70E-05	0,33	0,5723
Error	7,50E-04	15	5,00E-05		
Total	9,80E-04	23			

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
Catión	24	0,39	0,07	107,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	2,30E-04	8	2,90E-05	1,21	0,3583
Caudal	4,20E-06	1	4,20E-06	0,17	0,6839
Presión	2,00E-04	1	2,00E-04	8,45	0,0108
REP	2,10E-05	5	4,20E-06	0,17	0,9689
Caudal*Presión	4,20E-06	1	4,20E-06	0,17	0,6839

Error	3,60E-04	15	2,40E-05
Total	6,00E-04	23	

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Anión	24	0,29	0	122,93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	2,30E-04	8	2,90E-05	0,77	0,6328
Caudal	1,70E-05	1	1,70E-05	0,44	0,5166
Presión	1,70E-05	1	1,70E-05	0,44	0,5166
REP	2,00E-04	5	4,00E-05	1,06	0,4208
Caudal*Presión	0	1	0	-2,90E-15	>0,9999
Error	5,70E-04	15	3,80E-05		
Total	8,00E-04	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Mixbed	24	0,59	0,36	96,81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	5,80E-04	8	7,30E-05	2,65	0,0493
Caudal	1,00E-04	1	1,00E-04	3,79	0,0706
Presión	2,00E-04	1	2,00E-04	7,42	0,0157
REP	2,70E-04	5	5,40E-05	1,97	0,142
Caudal*Presión	4,20E-06	1	4,20E-06	0,15	0,7026
Error	4,10E-04	15	2,80E-05		
Total	1,00E-03	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Tanque DEMI	24	0,69	0,53	88,33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	5,50E-04	8	6,90E-05	4,19	0,0082
Caudal	3,80E-05	1	3,80E-05	2,29	0,1511
Presión	3,40E-04	1	3,40E-04	20,59	0,0004
REP	1,70E-04	5	3,40E-05	2,08	0,1242
Caudal*Presión	4,20E-06	1	4,20E-06	0,25	0,6214
Error	2,50E-04	15	1,60E-05		
Total	8,00E-04	23			

Nota: Tablas de ANOVA, R^2 y R^2 ajustado para el parámetro de hierro en cada punto de muestreo, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 9. Tablas de ANOVA para el parámetro de turbiedad en cada punto de muestreo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Bomba	24	0,76	0,63	55,93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	4,24	8	0,53	5,86	0,0017
Caudal	1,66	1	1,66	18,33	0,0007
Presión	0,02	1	0,02	0,21	0,6559
REP	0,44	5	0,09	0,96	0,4711
Caudal*Presión	2,13	1	2,13	23,54	0,0002
Error	1,36	15	0,09		
Total	5,6	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Catión	24	0,89	0,83	43,39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	4,41	8	0,55	15,01	<0,0001
Caudal	1,82	1	1,82	49,42	<0,0001
Presión	0,39	1	0,39	10,62	0,0053
REP	0,17	5	0,03	0,95	0,4777
Caudal*Presión	2,03	1	2,03	55,28	<0,0001
Error	0,55	15	0,04		
Total	4,96	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Anión	24	0,59	0,38	83,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	1,36	8	0,17	2,73	0,0445
Caudal	0,38	1	0,38	6,02	0,0269
Presión	0,07	1	0,07	1,1	0,3118
REP	0,6	5	0,12	1,93	0,1488
Caudal*Presión	0,32	1	0,32	5,1	0,0393
Error	0,93	15	0,06		

Total	2,3	23		
Variable	N	R²	R²Aj	CV
Mixed	24	0,78	0,66	48,77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	1,15	8	0,14	6,6	0,0009
Caudal	0,58	1	0,58	26,57	0,0001
Presión	1,20E-03	1	1,20E-03	0,06	0,8175
REP	0,11	5	0,02	1	0,4522
Caudal*Presión	0,46	1	0,46	21,17	0,0003
Error	0,33	15	0,02		
Total	1,48	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Tanque DEMI	24	0,56	0,33	80,19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	1,18	8	0,15	2,43	0,0659
Caudal	0,36	1	0,36	5,98	0,0273
Presión	0,05	1	0,05	0,85	0,3721
REP	0,33	5	0,07	1,09	0,4069
Caudal*Presión	0,43	1	0,43	7,17	0,0172
Error	0,91	15	0,06		
Total	2,09	23			

Nota: Tablas de ANOVA, R² y R² ajustado para el parámetro de turbiedad en cada punto de muestreo, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 10. Tablas de ANOVA para el parámetro de conductividad en cada punto de muestreo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Bomba	24	1	1	0,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	806,44	8	100,81	8191,85	<0,0001
Caudal	190,97	1	190,97	15519,04	<0,0001
Presión	615,09	1	615,09	49985,05	<0,0001
REP	0,07	5	0,01	1,2	0,3564
Caudal*Presión	0,3	1	0,3	24,68	0,0002
Error	0,18	15	0,01		
Total	806,63	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Catión	24	0,99	0,98	1,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	4847,18	8	605,9	149,37	<0,0001
Caudal	2225,3	1	2225,3	548,6	<0,0001
Presión	31,05	1	31,05	7,66	0,0144
REP	26,09	5	5,22	1,29	0,3209
Caudal*Presión	2564,73	1	2564,73	632,28	<0,0001
Error	60,84	15	4,06		
Total	4908,02	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Anión	24	0,98	0,97	7,59

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	1879,27	8	234,91	81,37	<0,0001
Caudal	32,71	1	32,71	11,33	0,0042
Presión	967,99	1	967,99	335,29	<0,0001
REP	7,1	5	1,42	0,49	0,7772
Caudal*Presión	871,46	1	871,46	301,85	<0,0001
Error	43,31	15	2,89		
Total	1922,57	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Mixed	24	1	1	5,64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	675,97	8	84,5	1089,51	<0,0001
Caudal	230,58	1	230,58	2973,12	<0,0001
Presión	180,57	1	180,57	2328,26	<0,0001
REP	0,22	5	0,04	0,57	0,7217
Caudal*Presión	264,6	1	264,6	3411,86	<0,0001
Error	1,16	15	0,08		
Total	677,13	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Tanque DEMI	24	1	1	5,96

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	338,96	8	42,37	671,65	<0,0001
Caudal	114,49	1	114,49	1815	<0,0001
Presión	112,23	1	112,23	1779,17	<0,0001
REP	0,25	5	0,05	0,8	0,5639
Caudal*Presión	111,97	1	111,97	1775,05	<0,0001
Error	0,95	15	0,06		
Total	339,9	23			

Nota: Tablas de ANOVA, R² y R² ajustado para el parámetro de conductividad en cada punto de muestreo, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Anexo 11. Tablas de ANOVA para el parámetro de pH en cada punto de muestreo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Bomba	24	0,99	0,98	1,84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	20,15	8	2,52	169,45	<0,0001
Caudal	0,14	1	0,14	9,19	0,0084
Presión	19,31	1	19,31	1299,67	<0,0001
REP	0,19	5	0,04	2,52	0,076
Caudal*Presión	0,51	1	0,51	34,15	<0,0001
Error	0,22	15	0,01		
Total	20,37	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cation	24	0,99	0,99	1,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	4,68	8	0,58	237,6	<0,0001
Caudal	0,02	1	0,02	8,53	0,0105
Presión	4,66	1	4,66	1890,86	<0,0001
REP	3,00E-03	5	6,00E-04	0,25	0,9357
Caudal*Presión	3,40E-04	1	3,40E-04	0,14	0,7164
Error	0,04	15	2,50E-03		
Total	4,72	23			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Anion	24	0,96	0,93	1,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	9,53	8	1,19	40,7	<0,0001
Caudal	0,05	1	0,05	1,82	0,1976
Presión	8,97	1	8,97	306,34	<0,0001
REP	0,15	5	0,03	1,05	0,427
Caudal*Presión	0,36	1	0,36	12,22	0,0033
Error	0,44	15	0,03		
Total	9,97	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Mixed	24	0,95	0,92	5,81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	45,71	8	5,71	35,65	<0,0001
Caudal	4,82	1	4,82	30,1	0,0001
Presión	35,62	1	35,62	222,28	<0,0001
REP	0,74	5	0,15	0,93	0,4918
Caudal*Presión	4,52	1	4,52	28,23	0,0001
Error	2,4	15	0,16		
Total	48,12	23			

Variable	N	R²	R²Aj	CV
Tanque DEMI	24	0,93	0,89	6,37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	39,05	8	4,88	23,57	<0,0001
Caudal	0,83	1	0,83	4	0,0639
Presión	36,51	1	36,51	176,27	<0,0001
REP	0,66	5	0,13	0,64	0,6741
Caudal*Presión	1,06	1	1,06	5,11	0,0391
Error	3,11	15	0,21		
Total	42,16	23			

Nota: Tablas de ANOVA, R² y R² ajustado para el parámetro de pH en cada punto de muestreo, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Anexo 12. Lista de control de asistencia

	CONTROL DE ASISTENCIA	CÓDIGO CA-I
	PROYECTO EVALUACIÓN DE EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE SÍLICE MEDIANTE INTERCAMBIO IÓNICO EN LA TERMOELÉCTRICA TERMOCOA, VILLAVICENCIO	ELABORADO 14/08/2018
		VERSIÓN: 1

Fecha: 14 de agosto de 2018 Hora de inicio: 17:22 Hora de finalización: 19:22

Nº	Nombre	Cargo	Profesión	Tiempo que lleva laborando es MASA
1	Oscar E. Mendez Rios	Ingeniero Operaciones	Inq. Electronico	13 años.
2	Gonzalo Tanbana H	Operador Campo	Instrumentista	16 años
3	William G. Caceres	Sup. mecánico	Tecnólogo	9 años.
4	William Amado	Inq. Electrónico	Inq. Electrónico	3 años.
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Nota: Lista de asistencia al taller diagnóstico, estableciendo el nombre, cargo, profesión y tiempo que lleva laborando en la empresa, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Anexo 13. Registro fotográfico asistentes al taller de evaluación técnico-económico-ambiental



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Anexo 14. Instructivo de tratamientos experimentales

	INSTRUCTIVO DE TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES		
	PROYECTO EVALUACIÓN DE EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE SÍLICE MEDIANTE INTERCAMBIO IÓNICO EN LA TERMOELÉCTRICA TERMOCOA, VILLAVICENCIO		
	CODIGO TE-I	Elaborado 09/02/2018	Versión: 1

1. OBJETIVO

Definir el instructivo de tratamientos experimentales para la realización de las pruebas experimentales en el sistema de intercambio iónico.

2. CONDICIONES GENERALES

2.1 RESPONSABILIDADES

Son directos responsables de la operación del sistema del intercambio iónico los ingenieros de operaciones en turno.

Es responsabilidad de los estudiantes a cargo del proyecto la toma de muestras y el posterior análisis de laboratorio.

Es responsabilidad de todos los involucrados en los tratamientos experimentales portar los elementos de protección personal y realizar la inducción operativa sobre los procedimientos a realizar para dicha actividad.

2.2 REQUISITOS DE MATERIALES Y EQUIPOS

Para el desarrollo de los tratamientos experimentales es necesaria la disposición de los siguientes materiales y equipos correctamente calibrados en cada sesión de experimentos:

Tabla 1. *Lista de materiales y equipos*

MATERIALES Y EQUIPOS	CANTIDAD
Medidor multiparámetro	1
Espectrofotómetro	1
Reactivos	4
Elementos de protección personal	16
Vasos de precipitado de 1000ml	5
Cubetas cuadradas 25 ml Vidrio	10
Célula muestra “Square Glass” 10 ml	10
Tijeras	1

Nota: Materiales y equipos necesarios para el desarrollo de los tratamientos experimentales, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

2.3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Bata antifluidos;
- Guantes de nitrilo;
- Tapabocas;
- Tapa oídos de inserción;
- Botas de seguridad
- Pantalón de trabajo;
- Camisa de trabajo;
- Casco dieléctrico.

3. DESARROLLO

Los tratamientos experimentales se llevarán a cabo de la siguiente manera:

El sistema de intercambio iónico estará operando bajo caudales y presiones controladas máximas y mínimas permitidas, siendo así la combinación de los 5 tratamientos experimentales:

Tabla 2. *Escenarios a evaluar*

Tratamiento	Caudal (Gal/min)	Presión (Psi)
T1	250 GPM - 270 GPM	40
T2	250 GPM - 270 GPM	80
T3	117 GPM - 140 GPM	40
T4	117 GPM - 140 GPM	80
T5	274 GPM - 278 GPM	64 PSI- 73 PSI

Nota: El tratamiento 5 hace referencia a las condiciones de presión y caudal en que opera normalmente el sistema de intercambio iónico, por Linares, E. & Rodriguez, L., 2018.

Durante la etapa inicial de cada tratamiento se debe dejar un lapso de 20 minutos aproximadamente para estabilizar el sistema de intercambio iónico al caudal y presión establecido según el tratamiento experimental que se vaya a realizar.

Transcurrido el tiempo de estabilización del sistema, se procederá a realizar la toma de muestras a la entrada y salida del sistema de intercambio iónico con su correspondiente prueba testigo, siendo cada muestra de agua de 1000ml; muestras que serán llevadas a laboratorio para su posterior análisis de conductividad, pH, sílice, turbiedad y hierro. Este proceso se realizará con 6 repeticiones cada media hora y será registrado en la tabla 1. Resultados laboratorio tratamientos experimentales mostrada en anexos del instructivo.

4. CONTINGENCIAS

En caso de no poder llevar a cabo el instructivo se debe realizar un reporte especificando el porqué de la situación y agendar una nueva fecha para la realización del tratamiento experimental.

5. ANEXOS

TRAT.	CAUDAL (GAL/MIN)	PRESIÓN (PSI)	VARIEABLE	REP1	REP2	REP3	REP4	REP5	REP6
TRATAMIENTO 1	250 GPM - 270 GPM	40	CONDUCTIVIDAD						
			TURBIEDAD						
			SÍLICE						
			PH						
			HIERRO						
TRATAMIENTO 2	250 GPM - 270 GPM	80	CONDUCTIVIDAD						
			TURBIEDAD						
			SÍLICE						
			PH						
			HIERRO						
TRATAMIENTO 3	117 GPM - 140 GPM	40	CONDUCTIVIDAD						
			TURBIEDAD						
			SÍLICE						
			PH						
			HIERRO						
TRATAMIENTO 4	117 GPM - 140 GPM	80	CONDUCTIVIDAD						
			TURBIEDAD						
			SÍLICE						
			PH						
			HIERRO						
TRATAMIENTO 5	274 GPM - 278 GPM	64 PSI- 73 PSI	CONDUCTIVIDAD						
			TURBIEDAD						
			SÍLICE						
			PH						
			HIERRO						

Figura 1. Tabla de resultados laboratorio tratamientos experimentales, por Linares, E. & Rodríguez, L., 2018.

Para mayor información sobre este documento dirigirse a quien lo elaboró, en nombre de la dependencia responsable:

Elaboró: Edward Linares Peña – Luisa Fernanda Rodríguez Roldan

Teléfono: 3102436506 – 3159289858

Buzón: edwardlinares@usantotomas.edu.co – luisarodriguezr@usantotomas.edu.co