



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS
PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO**

Fernando Arturo Tobar Vargas

Asesorado por el Ing. Ribelino Martín Santos Monterroso

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS
PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FERNANDO ARTURO TOBAR VARGAS

ASESORADO POR EL ING. RIBELINO MARTÍN SANTOS MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

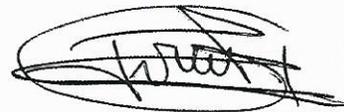
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS
PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de noviembre de 2011.



Fernando Arturo Tobar Vargas

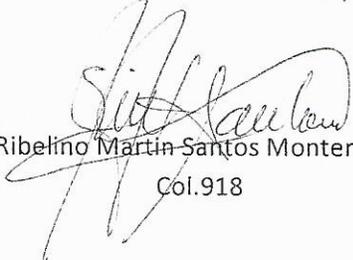
Guatemala, 27 de Octubre de 2014

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdés
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado ingeniero Monzón:

Sirva la presente como constancia que asesoré, revisé y aprobé el informe final a de trabajo de graduación titulado "ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO", el cual será presentado por el estudiante Fernando Arturo Tobar Vargas carné 200412303.

Agradeciendo su atención con la presente


Ribelino Martin Santos Monterroso
Col.918

Ribelino Santos Monterroso
INGENIERO QUÍMICO
COLEGIADO No. 918



Guatemala, 19 de enero de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.006.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **086-2010** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Fernando Arturo Tobar Vargas**.
Identificado con número de carné: **2004-12303**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

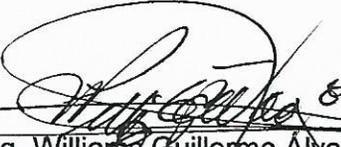
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Ribelino Martin Santos Monterroso**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.028.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **FERNANDO ARTURO TOBAR VARGAS** titulado: "**ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO A NIVEL LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE IMPUREZAS PARA EL AGUA DE UN CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO EN UNA LÍNEA DE GALVANIZADO**, presentado por el estudiante universitario: **Fernando Arturo Tobar Vargas**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, marzo de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad de lograr esta meta.
Mis padres	Arturo Tobar y Magda Vargas de Tobar, por su paciencia, amor y apoyo incondicional, su dedicación es mi mayor ejemplo.
Mi esposa	Norma Sagastume de Tobar, por acompañarme durante mi carrera y mi vida, gracias por ser mi compañera.
Mi hermana	Flor de María Tobar Vargas, por aguantarme y enseñarme lo bonito de la enseñanza.
Mis abuelos	Manuel y Marina Tobar, Hipólito y Marta Siliezar, gracias por su cariño y fe.
Mis tíos	Carlos, César, Luis, Verónica y Liliana Tobar, Rolando y Verónica Siliezar, por compartir sus vivencias conmigo.
Mi asesor	Ribelino Santos, por ser mi guía durante el trabajo y amigo en el proceso.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme el acceso a la educación superior.

Facultad de Ingeniería

Por permitirme llevar un poco de su conocimiento y aplicarlo en mi vida laboral.

**Mis amigos de la
Facultad**

Manuel Cazali, William Fagiani, Marleny Blanco, y demás compañeros de cursos por las experiencias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Diferentes tipos de mezclas acuosas y su manejo.....	7
2.1.1 Disolución.....	7
2.2. Sólidos suspendidos totales.....	8
2.3. Intercambio iónico para el acondicionamiento de las aguas industriales.....	9
2.3.1 Generalidades.....	9
2.3.2 Equipo	10
2.3.3 Ventajas	11
2.3.4 Desventajas	11
2.4. Coagulación y floculación	12
2.4.1 Modelos teóricos de la coagulación y de la floculación .	12
2.5. Procesos con membranas	13
2.5.1 Técnicas con membranas cuya fuerza..... impulsora es la presión	14
2.5.2 Tipos de membranas.....	15

3.	DISEÑO METODOLÓGICO	19
3.1.	Variables	19
3.1.1.	Tiempo	19
3.1.1.1	Tiempo entre toma de muestras	19
3.1.1.2	Tiempo de sedimentación	20
3.1.2.	Sólidos suspendidos.....	20
3.1.3.	Sólido retenido	20
3.1.4.	Líquido permeado	20
3.1.5.	pH.....	20
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	20
3.2.1.	Tipo de estudio y diseño general.....	21
3.3	Recursos humanos disponibles.....	21
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	21
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	22
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	23
3.6.1.	Descripción metodológica	24
3.7.	Tabulación, ordenamiento	
	y procesamiento de la información.	25
3.8.	Análisis estadístico.....	25
3.8.1.	Media aritmética	26
3.8.2.	Desviación estándar muestral	26
3.8.3.	Incertidumbre de medición	27
4.	RESULTADOS	29
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35

CONCLUSIONES	37
RECOMENDACIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	41
APÉNDICES	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Conos de sedimentación.....	22
2.	Diagrama de flujo	23
3.	Medición del tiempo promedio de sedimentación	29
4.	Medición de sólidos retenidos con membrana de 20 micrómetros.....	30
5.	Medición de la concentración de metales en agua tratada	31
6.	Medición de sólidos totales & pH	32
7.	Medición de sólidos suspendidos.....	33
8.	Medición de turbidez	34

TABLAS

I.	Contaminantes y métodos de purificación.....	7
II.	Clasificación de las membranas.....	16
III.	Descripción de variables involucradas	19

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Cantidad de muestras
x_i	Dato puntual
U_k	Incertidumbre de medición
IO	Intercambio iónico
L	Litro
MF	Microfiltración
μm	Micrómetro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
NF	Nanofiltración
RO	Ósmosis inversa
$[\text{H}^+]$	Potencial de hidrógeno
T	Tolerancia
UF	Ultrafiltración
UFC	Unidad formadora de colonias

GLOSARIO

Ácido	Un ácido es considerado tradicionalmente como cualquier compuesto químico que cuando se disuelve en agua, produce una solución con una actividad de catión hidronio mayor que el agua pura, esto es un pH menor que 7.
Acuosa (disolución)	Es una disolución siempre que el disolvente (o el disolvente mayoritario, en el caso de una mezcla de disolventes) sea agua.
Anión	Un anión es un átomo o ión con carga eléctrica negativa. Los aniones monoatómicos se describen con un estado de oxidación negativo.
Balanza	La balanza analítica es un instrumento utilizado en el laboratorio que sirve para medir la masa. Su característica más importante es que poseen muy poca incertidumbre, lo que las hace ideales para utilizarse en mediciones muy precisas.
Base	En química una base es una sustancia que en disolución acuosa brinda iones OH al medio.
Catión	Un catión es un ión (átomo o molécula) con carga eléctrica positiva.

Coagulación	Es el proceso de desestabilización química de partículas coloidales realizadas por adicción de un coagulante al agua, el cual neutraliza las cargas responsables de la estabilidad de las partículas cargadas que generan fuerzas de repulsión superficial, las cuales están impidiendo la sedimentación por gravedad.
Coloide	Es un sistema formado por dos o más fases, principalmente: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas.
Cronógrafo	Es un reloj que mediante algún mecanismo de complicación, permite la medición independiente de tiempos.
Filtración	Se denomina filtración al proceso unitario de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido.
Floculación	Es el proceso hidrodinámico en el que se efectúan las colisiones de partículas desestabilizadas favoreciendo la agregación (cohesión) entre ellas.
Floculante	Un floculante es una sustancia química que aglutina sólidos en suspensión, provocando su precipitación.

Gravimetría	La gravimetría es un método analítico cuantitativo, que determina la cantidad de sustancia de una muestra.
Impureza	Una impureza es una sustancia dentro de un limitado volumen de líquido, gas o sólido, que difieren de la composición química de los materiales o compuestos.
Lámina galvanizada	Es una lámina de acero que tiene un recubrimiento, el cual es una aleación de metales que responden mejor a la corrosión.
Membrana	Es una barrera física que permite el paso de ciertas moléculas o partículas a través de ella.
Polímero	Son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
Presión	Es una magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie.
Sedimentación	Es el proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita.
Toxicidad	Es la capacidad de cualquier sustancia química de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo al entrar en contacto con él.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo hacer un estudio para determinar el método de remoción de impurezas más adecuado para aplicar al agua del circuito de enfriamiento en una línea de galvanizado, a fin de que la misma mejore sus condiciones cualitativas en el proceso productivo.

En el documento se detalla que se realizó la caracterización química del agua del circuito, esto con el fin de conocer las cantidades de elementos nocivos al proceso y lograr una buena selección del método de remoción de impurezas. También se seleccionó la forma más eficaz de filtración, dado que el paso siguiente del proceso se ve afectado significativamente por los contaminantes contenidos en el agua de dicho circuito.

Se aplicaron agentes acomplejantes tales como polímeros aniónicos y catiónicos y luego se hicieron pruebas de filtración a nivel laboratorio, para determinar el método físico adecuado para mejorar las condiciones del proceso industrial actual. Esperando obtener con esto, cantidades, y cualidades de cada compuesto lo que permitirá facilitar la selección del procedimiento más adecuado para la remoción.

El procedimiento experimental se realizó en el laboratorio de la empresa localizado en la planta operacional en Villa Nueva.

OBJETIVOS

General

Desarrollar a nivel laboratorio el sistema de remoción más adecuado para la separación de impurezas adquiridas por el agua, que se utiliza en el circuito de enfriamiento de una línea de galvanizado.

Específicos

1. Identificar y cuantificar las impurezas por medio de un análisis químico del agua usada en el circuito de enfriamiento.
2. Realizar un estudio de toxicidad sobre las impurezas presentes, para determinar las que son nocivas al proceso de enfriamiento de lámina galvanizada.
3. Determinar la efectividad de los métodos de filtración física.
4. Comprobar si es procedente la utilización de un floculante catiónico o aniónico para favorecer la separación de las impurezas del agua, por medio de estos métodos.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de graduación realizado trata sobre la identificación y cuantificación de las impurezas contenidas en el agua utilizada en el proceso de enfriamiento de lámina galvanizada, las cuales, son obtenidas de la misma lámina durante el proceso, por lo que se buscaron las posibles mejoras en el aprovechamiento del agua, además de proporcionar una caracterización de las impurezas para poder establecer los perfiles de aumento de concentración de las mismas, relacionada con el consumo de agua.

La confirmación de que el uso eficiente del agua genera beneficios económicos y ambientales, a estimulado la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para obtener mejores rendimientos en el uso de la misma. Al mismo tiempo, la búsqueda constante de la eficiencia en todos aquellos procesos que utilizan agua, tiene un carácter estratégico al propiciar la reducción del consumo, la mejora de garantías y calidad de suministro dentro de la idea de desarrollo sostenible.

Detectar las oportunidades que brinda la cuantificación de las impurezas contenidas en el agua requiere de evaluaciones del estado de los equipos o procesos que la utilicen y que se puedan ver afectados por dichas impurezas; todo relacionado a la valoración y cuantificación del potencial técnico y económico de ahorro de agua.

La mejora de la eficiencia respecto a algún insumo suele ir asociada con algún tipo de innovación en el propio proceso, la maquinaria o los procedimientos de trabajo. El trabajo de graduación pretende también dejar

abierta la posibilidad de analizar mejoras ligadas a alguna innovación tecnológica, aunque la mayoría de las mejoras en proceso que se consideren tendrán un contenido más convencional.

1. ANTECEDENTES

El 80 por ciento del planeta Tierra es agua, de la cual solo el 10 por ciento es de utilidad al ser humano, tanto para consumo como para su utilización en la mayoría de procesos industriales que requieren de este elemento.

El agua se utiliza en innumerables procesos dentro de la industria como materia prima y como herramienta de limpieza. Pero al utilizar el agua como ente para la remoción de impurezas se genera, como resultado, un problema para el medio ambiente, dado que es un desperdicio que dependiendo de sus contenidos puede ser nocivo para el lugar donde es desechada.

El agua en el circuito de enfriamiento de lámina galvanizada afecta de manera significativa el resultado del proceso productivo. Por lo que fue necesario realizar un estudio que describa las principales impurezas que este proceso genera y encontrar la mejor manera de retirarlos. Esto debido a que se cambió la tecnología de tratamiento de aguas de la empresa y se requiere cumplir el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

2. MARCO TEÓRICO

El agua a nivel industrial tiene usos diversos que van desde materia prima hasta su aplicación como parte importante en los sistemas de producción, como por ejemplo los sistemas de enfriamiento. Se ha calculado que el agua consumida en usos industriales en los Estados Unidos suma unos 280 mil millones de litros al día y se presume que alcanzará unos 860 mil millones de litros dentro de dos años. Actualmente en la empresa se utilizan 4 200 litros diarios únicamente en la fabricación de los productos cosméticos, sin tomar en cuenta el agua que se usa en los procesos de calentamiento, enfriamiento y para los servicios sanitarios.

Los estudios de cuantificación de impurezas en el agua de algún un proceso, actividad industrial o actividad educativa, constituyen una herramienta para la optimización y comprenden el primer paso en la planificación para el mejoramiento de los mismos. Permiten determinar las áreas críticas en función de contaminación y hacen posible un estudio futuro, para lograr disminuir o erradicar las impurezas para aumentar la eficiencia del proceso en si. La optimización de recursos siempre es el aspecto primordial al realizar cuantificaciones de insumos de un proceso, actividad industrial o actividad educativa.

Estudios anteriores se han enfocado en obtener ahorros sobre el consumo de agua, proponiendo ciertos cambios en los procesos y procesos de limpieza del agua por medio de membranas de filtración.

Actualmente no existen estudios de cuantificación de impurezas de este circuito en este tipo de industria, por lo que se tratará de tomar alguna adaptación de los procesos actuales alternos que funcionan bajo el mismo principio.

El trabajo de graduación propuesto se realizará con la intención de obtener una caracterización y una fuente de información del mismo, para proponer mejoras futuras en el proceso de enfriamiento de lámina.

A nivel industrial el agua se clasifica en:

- Agua cruda
Se le asigna el término agua cruda, al agua que se obtiene de fuentes naturales como ríos, lagos, nacimientos o pozos, la cual no ha sufrido ningún tratamiento.
- Agua potable
Es la que llena un grado de calidad, establecido por especificaciones sobre niveles y tipos de contaminación permitidos, que la hacen apta para el consumo humano. Esto se logra por el tratamiento del agua cruda por diversos procesos físicos y químicos, tales como filtración, floculación y clorinación, dependiendo de las condiciones iniciales del agua.
- Agua suave
Es aquella a la cual los cationes (carga positiva) de calcio y magnesio que conforman la denominada dureza, son removidos por sustitución con iones de sodio, logrando por intercambio iónico con zeolitas.

- Agua para uso cosmético

El agua es la materia prima de mayor importancia dentro de la industria cosmética, ya que forma parte de la mayoría de los productos cosméticos elaborados. Hay solo dos tipos de agua para ser producidos para este tipo de industria: el agua purificada y, en menor grado de utilización, el agua para inyección.

- Agua para inyección

Es agua purificada esterilizada y empacada para preservar estas características. No debe contener ningún tipo de microorganismo o pirógenos. En la industria cosmética este tipo de agua es utilizada en los productos que se encuentran en contacto con mucosas, como en el caso de las máscaras para ojo o delineadores líquidos. También en productos que cuentan con algún tipo de principio activo farmacológico, tales como los tratamientos cosméticos para el acné.

- Agua purificada

Este tipo de agua purificada se obtiene por destilación, intercambio iónico, ósmosis inversa o tratamiento similar, además debe cumplir con las especificaciones gubernamentales sobre agua purificada. Esta debe ser utilizada en la elaboración de productos farmacéuticos, cosméticos, en la elaboración de reactivos y en la realización de pruebas de ensayo.

La U.S. Pharmacopeia 2002 indica como especificaciones básicas para el agua purificada: pH entre 5,0 y 7,0, pasar las pruebas de sulfatos, amoníaco, cloruros, sustancias oxidables y sólidos totales, además no debe presentar dureza y cloro.

A nivel microbiológico el agua purificada no debe tener un conteo mayor a 100 unidades formadora de colonias (UFC)/mililitro de bacterias mesófilas, no debe presentar presencia de bacterias del grupo coliforme ni presencia de *Pseudomonas* spp.

- Sistema de purificación de agua

El diseño del sistema de agua es factor de éxito o fracaso de los productos. El diseño de un sistema de agua depende del buen conocimiento de las operaciones, la identificación de los puntos de uso en la fábrica, un programa de mantenimiento riguroso y técnicas apropiadas de muestreo y ensayo. La capacidad del sistema se calcula con base en el plan de ventas de 5 a 10 años y la producción planeada para el mismo período. Es importante que el sistema instalado no supere en más del 10 por ciento la demanda diaria del agua. El tiempo en que un sistema de purificación está parado puede ser crítico pues promueve el crecimiento de microorganismos.

El agua generalmente se trata siguiendo una secuencia lógica y por consiguiente económica. Para fines prácticos algunos autores clasifican los contaminantes en cuatro grupos e indican los métodos clásicos de purificación, como se presenta en la tabla I.

Tabla I. Contaminantes y métodos de purificación

CONTAMINANTES	REMOCIÓN POR
Sales inorgánicas disueltas, ej.: calcio, magnesio, cloruros, sulfatos.	Intercambio iónico, ósmosis inversa, combinación de ambos
Compuestos orgánicos disueltos, ej.: taninos, ligninas, otros productos de descomposición animal o vegetal	Absorción por carbón activado, resina de tipo aniónico.
Material particulado, ej.: óxidos metálicos de la tubería, "finos" de carbón y resinas, sílice y otras partículas amorfas.	Filtración, ósmosis inversa, destilación
Bacterias	Filtración, ósmosis inversa, destilación

Fuente: elaboración propia.

Los insumos principales serán los reactivos propuestos para la realización de pruebas de floculación. Así como también las posibles pruebas a realizar con membranas de filtración.

2.1. Diferentes tipos de mezclas acuosas y su manejo

Las mezclas acuosas se dividen en las siguientes categorías:

2.1.1. Disolución

También llamada solución, es una mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias que no reaccionan entre si, cuyos componentes se encuentran en proporción que varía entre ciertos límites. Frecuentemente, uno de los componentes es denominado disolvente, solvente, dispersante o medio de dispersión y los demás solutos. Los criterios para decidir cuál es el disolvente y cuáles los solutos son más o menos arbitrarios ya que no hay una razón científica para hacer tal distinción.

Se suele llamar disolvente al componente que tiene el mismo estado de agregación que la disolución y soluto o solutos, al otro u otros componentes. Si

todos tienen el mismo estado, se llama disolvente al componente que interviene en mayor proporción de masa, aunque muchas veces se considera disolvente al que es más frecuentemente usado como tal (por ejemplo, una disolución conteniendo 50 por ciento de etanol y 50 por ciento de agua, es denominada solución acuosa de etanol). Wilhelm Ostwald distingue tres tipos de mezclas según el tamaño de las partículas de soluto en la disolución:

- Dispersiones, suspensiones o falsas disoluciones: cuando el diámetro de las partículas de soluto excede de $0,1 \mu\text{m}$.
- Dispersoides, coloides o disoluciones coloidales: el tamaño está entre $0,001 \mu\text{m}$ y $0,1 \mu\text{m}$.
- Dispérsidos o disoluciones verdaderas: el tamaño es menor a $0,001 \mu\text{m}$.

Estas últimas se clasifican en:

- Disoluciones con condensación molecular: la partícula dispersa está formada por una condensación de moléculas.
- Disoluciones moleculares: cada partícula es una molécula.
- Disoluciones iónicas: la partícula dispersa es un ion (fracción de molécula con carga eléctrica).
- Disoluciones atómicas: cada partícula dispersa es un átomo.

2.2. Sólidos suspendidos totales

Es una calidad del agua de medición generalmente abreviado SST. Es catalogado como uno de contaminantes convencionales en los EE.UU. Este parámetro fue en un tiempo llamado residuo no filtrable (NFR), un término que se refiere a la medida idéntica: el peso en seco de las partículas atrapadas por un filtro, por lo general de un tamaño de poro especificado.

SST en mg / L se puede calcular como:

(Pesa de la almohadilla sucia en gramos - el peso filtro limpio en gramos) / ml de muestra * 1 000 000.

2.3. Intercambio iónico para el acondicionamiento de las aguas industriales

Las aguas sin tratar contienen impurezas que no pueden verse a simple vista, por lo que es necesario usar un método químico de remoción.

2.3.1. Generalidades

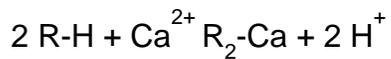
El ablandamiento de aguas con intercambio iónico (en adelante IO), es una de las herramientas más comunes en el acondicionamiento de aguas. Este puede obtener desmineralización de las aguas, por medio de resinas que hacen la eliminación de iones, que como los de calcio y magnesio del agua dura, son los que interesan en esta investigación.

El agua es pretratada para reducir los sólidos en suspensión y los TDS (sólidos disueltos totales) de la carga, en la unidad IO. Este intercambio iónico es el proceso más empleado hasta la fecha en el tratamiento de aguas para calderas. Tras el proceso de desmineralización, el agua se envía a una torre de desgasificación, con lo que se evitan problemas de corrosión en la instalación y por último se hace un ajuste del pH.

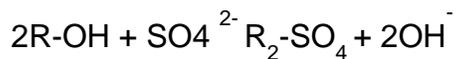
En este proceso, el agua a tratar pasa por una columna donde hay una resina sintética cambiadora de cationes, y luego por otra torre donde se encuentra una resina cambiadora de aniones. Se puede tener un lecho mixto que realice ambos procesos de IO en forma simultánea.

En el intercambio iónico los cationes como el Ca^{2+} y Mg^{2+} reemplazan, en la resina, a los iones H^+ que se pasan a la disolución y los aniones como HCO_3^- y SO_4^{2-} , son retenidos en la resina aniónica y sustituyen a los aniones OH^- que van al agua y allí se neutralizan con los H^+ que quedaron libres en el intercambio catiónico, y así se obtiene un agua neutra.

Para cationes el intercambio es:



Para aniones el intercambio es:



Este intercambio se produce hasta el agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, y se requiere regenerarla con un ácido fuerte como el sulfúrico y una base fuerte como el hidróxido sódico. Lo anterior indica que es un proceso reversible.

2.3.2. Equipo

Las unidades de tratamiento de agua consisten de prefiltración, intercambio iónico, tanques de almacenamiento, y distribución a través de tuberías.

Un ablandador normalizado tiene cuatro componentes mayores: tanque de resina, resina, tanque de salmuera y válvula de control. Sin embargo, el ablandamiento de agua no es ventajoso cuando se requiere una alta calidad, si los iones de sodio están presentes después del proceso de intercambio iónico.

2.3.3. Ventajas

- Elimina partículas inorgánicas disueltas.
- Las resinas son regenerables.
- Presentan relativamente bajo capital inicial de inversión.
- Puede usarse con tasas de flujo fluctuantes.
- Hay gran variedad de resinas específicas para cada caso, disponibles comercialmente, contando con que cada resina es efectiva en una eliminación específica de un contaminante.

2.3.4. Desventajas

- Deben usarse ácidos y bases fuertes, y ser gestionados debidamente.
- No son efectivos para eliminar partículas pirogénicas o bacterias.
- Las resinas se pueden ensuciar permanentemente y propiciar el crecimiento de bacterias.
- Los costos totales de operación son altos, de larga duración, especialmente por regeneración de resinas.
- Las aguas residuales del intercambio iónico son altamente concentradas y requieren disposición cuidadosa.
- No tienen capacidad para aceptar niveles picos de contaminación en el efluente.
- Usualmente no factible con altos niveles de sólidos totales disueltos.
- Pretratamiento requerido para la mayoría de las aguas superficiales.
- Las unidades IO también son sensibles a la presencia de iones que compiten. Por ejemplo, influente con altos niveles de dureza competirá con otros cationes por espacio en el medio de intercambio y el medio de intercambio deberá ser regenerado más frecuentemente.

2.4. Coagulación y floculación

La coagulación y floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flóculos, tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas, de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre 4 partículas, de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un flóculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundo.

2.4.1. Modelos teóricos de la coagulación y de la floculación

Existen dos modelos de la coagulación, el modelo físico o de la doble capa, basado en fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión. El otro modelo es químico, llamado puente químico, que relaciona una dependencia entre el coagulante y la superficie de los coloides. Para la coagulación existen también dos modelos.

- El primero es llamado ortocinético, el cual es promovido por agitación externa principalmente. Influye partículas de tamaño superior al micrón y tiene relación con los gradientes de velocidad del líquido.
- El segundo modelo se llama pericinético y se diferencia del primero en que su fuente de agitación es interna. Principalmente importarán el movimiento browniano y la sedimentación. Su efecto es principalmente sobre partículas de tamaño inferior a 1 micrón.

2.5. Procesos con membranas

Las membranas, son un medio que separa dos fases y permite a través de ellas el paso de disolvente y algunos solutos, y no permite el paso de otros de un modo selectivo. Los procesos para el acondicionamiento de aguas constituyen un amplio campo y se clasifican según la fuerza de impulsión que utilizan y que depende también del tipo de fluido que se requiere tratar. Esta fuerza de impulsión puede ser una presión hidráulica, una diferencia de concentración entre las soluciones en contacto con la membrana, una diferencia de potencial eléctrico o una diferencia de presión parcial. (Alvarez, 2000, Luque, 2000).

A escala industrial las principales aplicaciones de las membranas son en la producción de agua potable a partir del agua de mar, tratamiento de aguas residuales urbanas, descontaminación de efluentes industriales y recuperación de productos de elevado valor añadido, (Groves, 1983, Perry, 1989, Mulder, 1991, Luque, 1995).

2.5.1. Técnicas con membranas cuya fuerza impulsora es la presión

De acuerdo con el tamaño de las partículas del soluto que va a atravesar la membrana, se clasifican estas, valiéndose para ello del denominado umbral de corte, que es un parámetro referido al peso molecular medido en Dalton, del producto más pequeño que es retenido por la membrana en un 90 o 95 por ciento, aunque en la retención influyen otros factores como la forma y carga de las moléculas, otros solutos, entre otros, (Cheryan, 1986, Mulder, 1991).

Estas técnicas con membranas, cuya fuerza impulsora es la presión, son: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Ósmosis inversa(OI). La Microfiltración retiene partículas en suspensión con un diámetro medio de una micra, con tamaños que van de 0,05 a 10 micrómetros. Utiliza membranas porosas y el mecanismo de exclusión. Las presiones que se aplican van de 0,5 a 3 bar y se dispone de membranas con un amplio rango de materiales.

La microfiltración se emplea en la clarificación de vinos, cerveza y zumos de frutas; en la esterilización de fármacos, concentración de células, como pretratamiento para procesos posteriores de nanofiltración y ósmosis inversa; y en el tratamiento de aguas residuales utilizadas para reemplazar filtros prensa, decantadores, entre otros.

La ultrafiltración retiene macromoléculas, pero utiliza el peso molecular como índice de rechazo, ya que por el tamaño de las moléculas no se puede determinar el umbral de corte. El intervalo está entre 1 000 y 50 000 Dalton, o de 2 a 100 nanómetros. Utiliza como principio el mecanismo de exclusión

mediante membranas porosas, de material polimérico o inorgánico. Presentan el problema del ensuciamiento.

Las aplicaciones de la ultrafiltración se dan en la concentración y purificación, empleados en la industria lechera y de alimentos, en la metalurgia, textiles y automóviles y en el tratamiento de aguas residuales y otros efluentes.

La nanofiltración ocupa un lugar intermedio entre la Ultrafiltración (UF) y la Ósmosis Inversa (RO). En la ósmosis inversa (RO) la separación del soluto no se debe a su tamaño, y es un mecanismo de disolución- difusión a través de la membrana. Estas solo permiten el paso del agua, (Mulder, 1991, Bhattacharyya, 1992).

2.5.2. Tipos de membranas

Las membranas se pueden clasificar según su estructura, naturaleza, forma, composición química, carga superficial, morfología de la superficie, presión de trabajo y técnica de fabricación. (Fariñas, 1999).

Tabla II. **Clasificación de las membranas**

Parámetros	Tipos
Estructura y naturaleza	Integrales y compuestas de capa fina
Forma	Planas, tubulares y de fibra hueca
Composición química	Biológicas y sintéticas
Carga superficial	Neutras, catiónicas y aniónicas
Morfología de la superficie	Lisas y rugosas
Presión de trabajo	Muy baja, baja, media y alta
Técnica de fabricación	De máquina: Inversión de fase, policondensación entre fases y polimerización de plasma. Dinámicas

Fuente: adaptado de Fariñas, M Ósmosis inversa, fundamentos, tecnología y aplicaciones

Las membranas simétricas son microporosas y densas. Las microporosas, tienen un diámetro entre 1 y 50 nm, utilizan el mecanismo de exclusión, y se emplean en microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y diálisis (D).

Las densas que constan de una densa película por la cual pasan algunas especies químicas bajo la fuerza impulsora de un gradiente de concentración, presión o potencial eléctrico y la separación se determina por difusividad y concentración relativa en la membrana.

En este tipo de membrana, especies químicas de tamaño similar y por tanto difusividades similares, se pueden separar cuando su solubilidad en la membrana es significativamente diferente, y se usan en ósmosis inversa (RO), pervaporación (PV), permeación de gases y electrodiálisis (ED).

Las membranas asimétricas, constan de una película muy delgada, entre 0,1 y 2 nm de espesor, sobre una capa altamente porosa de espesor entre 100

y 200 nm, que sirve solamente como soporte. Estas son las más utilizadas en el ámbito industrial, especialmente en RO y UF.

Las membranas según su naturaleza son integrales y compuestas de capa fina. Integrales cuando hay continuidad entre la capa activa y el lecho poroso de soporte, ambos son del mismo polímero, la misma composición química y no hay una clara separación pero si un aumento progresivo de la porosidad. Son membranas compuestas de capa fina cuando la capa activa y el lecho microporoso de soporte corresponden a materiales diferentes. Según su composición química las membranas pueden ser biológicas y sintéticas. Estas últimas son poliméricas e inorgánicas (Luque, 2000).

Son poliméricas cuando su capa activa se ha hecho utilizando un polímero o copolímero orgánico. A pesar de que hay muchos polímeros, copolímeros y mezclas, siendo estas naturales o sintéticas, muy pocas son aptas para membranas como las de ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

En ósmosis inversa los compuestos orgánicos que han servido para fabricar membranas son acetato de celulosa (CA), triacetato de celulosa (CTA), poliamidas aromáticas (AP), poliéter-urea, poliacrilonitrilo, polibencimidazola, polipiperacidamidas, polifurano sulfonado y polisulfona sulfonada.

Las membranas inorgánicas surgieron debido a las limitaciones de estabilidad química y resistencia a la temperatura de las poliméricas. Estas membranas inorgánicas se clasifican en cuatro grandes grupos que son cerámicas, vidrios, fosfacenos y carbonos. Es importante apuntar que aún no hay en el mercado membranas de ósmosis inversa de naturaleza inorgánica. Además su coste es entre 5 y 10 veces el de una membrana polimérica y existe dificultad el hacer módulos con ellas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Permiten la cuantificación de las diferentes unidades que afectan el proceso de enfriamiento para obtener el mejor foco de acción.

Tabla III. Descripción de variables involucradas

Núm.	Variable	Unidad	Constante	Variable	Controlable
1	Tiempo	Min	X		X
2	Masa	G		X	
3	Volumen	L	X		X
4	Concentración	Mol/L		X	
5	pH	[H ⁺]		X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Tiempo

El tiempo se mide en dos variantes las cuales son:

3.1.1.1. Tiempo entre toma de muestras

Se midió el tiempo entre cada muestra para verificar los posibles cambios de concentración entre cada una.

3.1.1.2. Tiempo de sedimentación

Se midió el tiempo que tarda cada muestra en sedimentar y se tabuló según la cantidad de floculante añadida.

3.1.2. Sólidos suspendidos

La determinación de este parámetro se realizó por medio de un método gravimétrico.

3.1.3. Sólido retenido

La determinación se realizó por medio de pruebas de filtración.

3.1.4. Líquido permeado

La determinación de este parámetro se realizó por medio de volumetría.

3.1.5. pH

La determinación del potencial de hidrogeno se realizó de manera directa utilizando un medidor de pH.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El mismo está definido dentro de una parte de la línea productiva, la cual se dedica al enfriamiento de lámina.

3.2.1. Tipo de estudio y diseño general

Se hizo el estudio a nivel laboratorio sobre las impurezas presentes en el agua del circuito de enfriamiento de lámina galvanizada y debido a la naturaleza de las variables, las cuales no son manipuladas directamente por el investigador, se realizaron tomas de muestras de manera longitudinal, es decir se estudiaron las variables a lo largo de un tiempo, en el que se cuantifica la concentración de impurezas.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Realizador de trabajo de graduación: Fernando Arturo Tobar Vargas
- Asesor: Ing. Qco. Ribelino Santos
- Experimentadores directos: Fernando Tobar
- Colaboradores Ingenieros Químicos del área de Calidad de la empresa

3.4. Recursos materiales disponibles

- Equipo de trabajo:
 - Sedimentador
 - Laboratorio de control de calidad de la empresa
- Instrumentos de medición
 - Medidores de nivel
 - Cronógrafo
 - Balanza

- Cristalería: beakers, earlenmeyers, vidrios de reloj, embudo
- Reactivos e Insumos
 - Reactivos para pruebas: floculantes catiónicos y aniónicos
 - Membranas de filtración

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El análisis cuantitativo se interesa en la determinación de cantidades de substancia en particular, en una muestra o de algún proceso específico. En una investigación cuantitativa se recolectan y analizan datos cuantitativos sobre variables definidas. En el presente trabajo de graduación se estudia la asociación o relación entre las variables cuantificadas experimentalmente, con el fin de cumplir el objetivo principal, que consiste en la cuantificación de las impurezas presentes en el agua del circuito de enfriamiento.

Figura 1. **Conos de sedimentación**

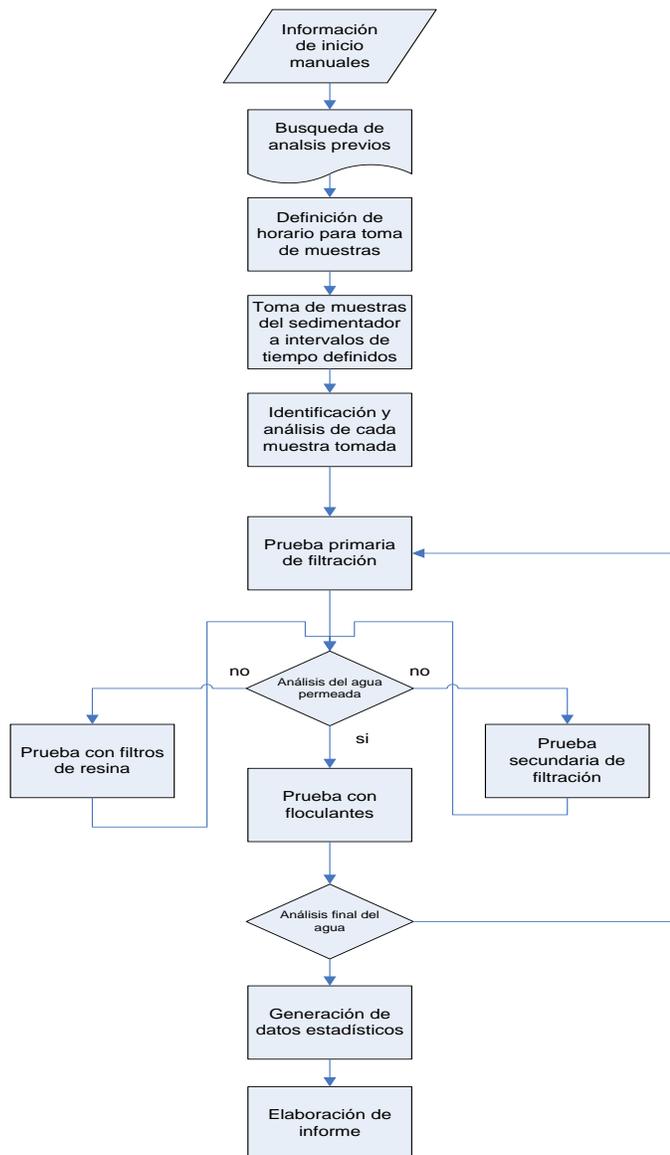


Fuente: laboratorio de la empresa.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El procedimiento descrito en el diagrama representa de forma ordenada los pasos seguidos durante el proceso de experimentación.

Figura 2. Diagrama de flujo



Fuente: elaboración propia.

3.6.1. Descripción metodológica

- Se buscaron los manuales de requerimientos aplicados al circuito de enfriamiento en la biblioteca de la empresa, pidió resultados de análisis previos realizados al agua de dicho circuito, realización de nuevos análisis al agua del circuito.
- Se utilizó como equipo de seguridad: guantes de goma, anteojos, gabacha de manga larga y una mascarilla.
- Se eligió un punto de muestreo en el sedimentador en donde el agua estuviera bien mezclada con las impurezas.
- Se etiquetaron los recipientes con un número consecutivo según el día y horario de la toma de la muestra.
- Se tomaron 6 muestras de 0,5 L en intervalos de tiempo de 1 hora aproximadamente procurando obtener una homogeneidad en el agua.
- Se colocaron las muestras en recipientes adecuados en el laboratorio de control de calidad.
- Se realizó la prueba primaria de filtración, esta con un filtro de malla con diámetro mayor a 0,5 mm para eliminar impurezas solidas del sedimentador.
- Se ejecutó un análisis químico del agua filtrada para conocer las impurezas presentes.

- Se efectuaron las pruebas de filtración secundaria con una membrana de poro menor a 0,05 mm.
- Se realizó el análisis del agua después de estas pruebas para determinar la efectividad de las mismas.
- Las pruebas de filtración se realizaron por medio de un sistema de pruebas con bomba de vacío.
- Se efectuaron las pruebas con el floculante industrial utilizado en la empresa para el tratamiento de agua residual, para determinar si su utilización favorece la separación de las impurezas.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La tabulación de los datos obtenidos se realizó según los datos obtenidos por cada día de muestra, durante una semana de operación.

Los datos obtenidos se ordenaron por horario, independientemente del día en que se tomó la muestra.

Los datos obtenidos de cada impureza se analizaron de manera individual. Para posteriormente unificarlos y presentarlos como una magnitud total, además de presentar un esquema de proporciones totales de impurezas.

3.8. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizaron las formulas básicas de manejo de datos en una distribución normal.

3.8.1. Media aritmética

En matemática y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números, es igual a la suma de todos sus valores, dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral, siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

También la media aritmética puede ser denominada como centro de gravedad de una distribución, el cual no está necesariamente en la mitad.

Una de las limitaciones de la media es que se ve afectada por valores extremos; valores muy altos tienden a aumentarla mientras que valores muy bajos tienden a reducirla, lo que implica que puede dejar de ser representativa de la población.

Dados los n números a_1, a_2, \dots, a_n , la media aritmética se define simplemente como:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

3.8.2. Desviación estándar muestral

La desviación estándar o desviación típica (σ) es una medida de centralización o dispersión para variables de razón y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva.

Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que representan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Expresión de la desviación estándar muestral:

$$\sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

3.8.3. Incertidumbre de medición

La incertidumbre es un parámetro asociado con el resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al analito. La finalidad de la incertidumbre es determinar la utilidad de un resultado, evaluar la confianza que se puede tener en una decisión basada en el resultado y comparar resultados de mediciones.

Expresión de la incertidumbre de medición, para una distribución rectangular:

$$u_k = \sqrt{\frac{T^2}{3}}$$

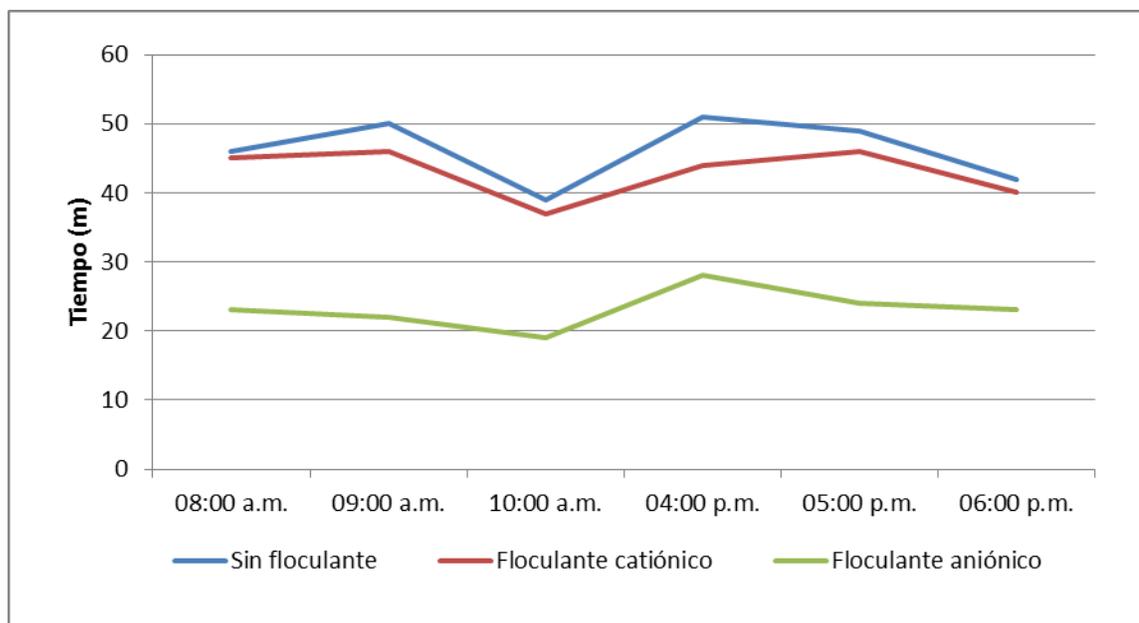
Dónde:

T : Tolerancia dada por el fabricante.

4. RESULTADOS

La forma gráfica de los datos obtenidos en la parte experimental del trabajo permite observar el comportamiento de las variables involucradas de forma comparativa.

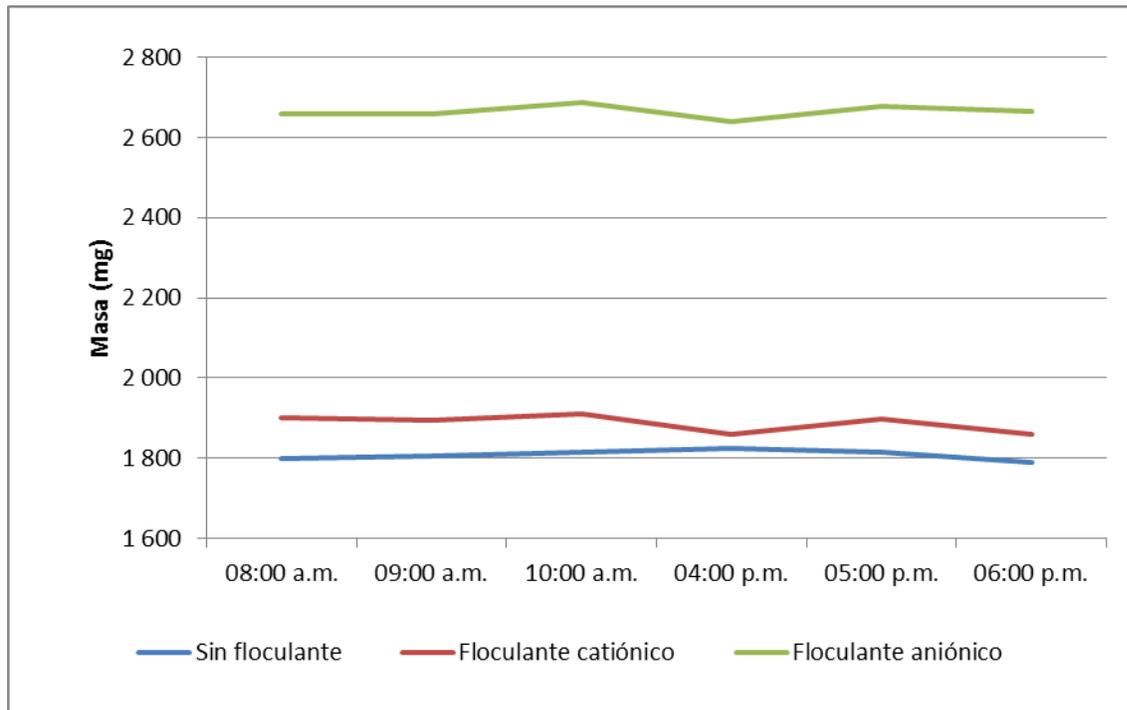
Figura 3. **Medición del tiempo promedio de sedimentación**



Muestra	Error por incertidumbre	Error por desviación
Sin floculante	0,29	6,82 %
Floculante catiónico	0,29	6,68 %
Floculante aniónico	0,29	11,73 %

Fuente: elaboración propia.

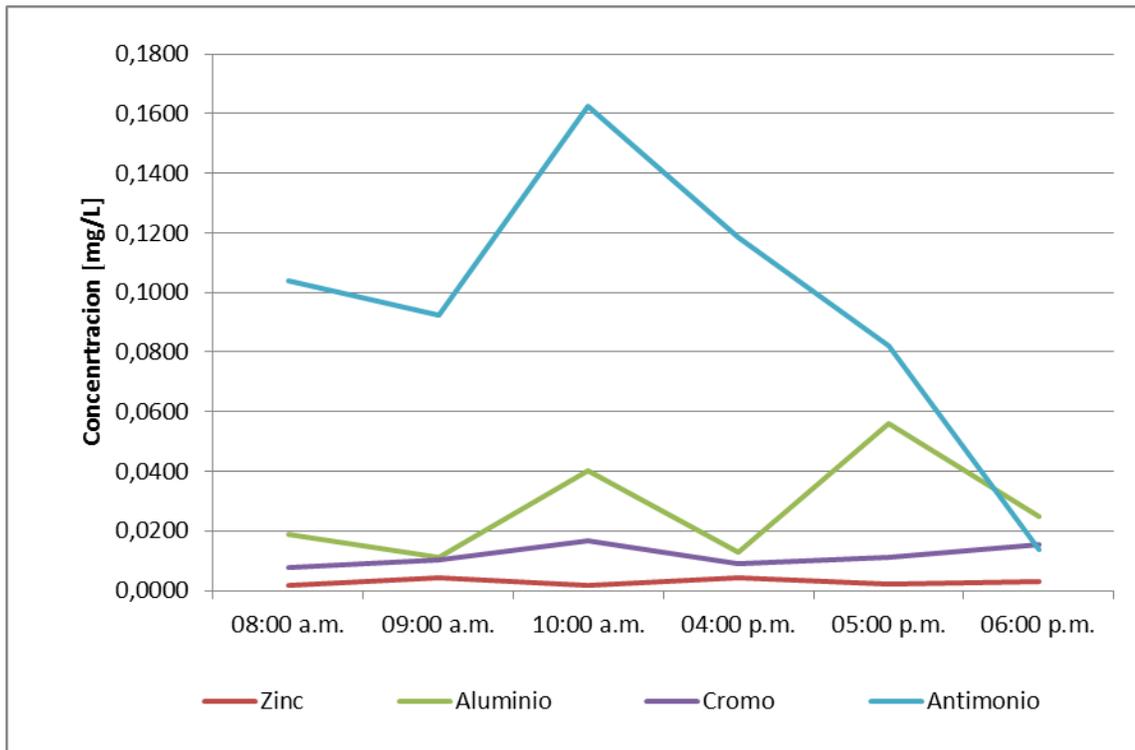
Figura 4. **Medición de sólidos retenidos con membrana de 20 micrómetros**



Muestra	Error por incertidumbre	Error por desviación
Sin floculante	0,06	0,32 %
Floculante catiónico	0,06	0,46 %
Floculante aniónico	0,06	0,36 %

Fuente: elaboración propia.

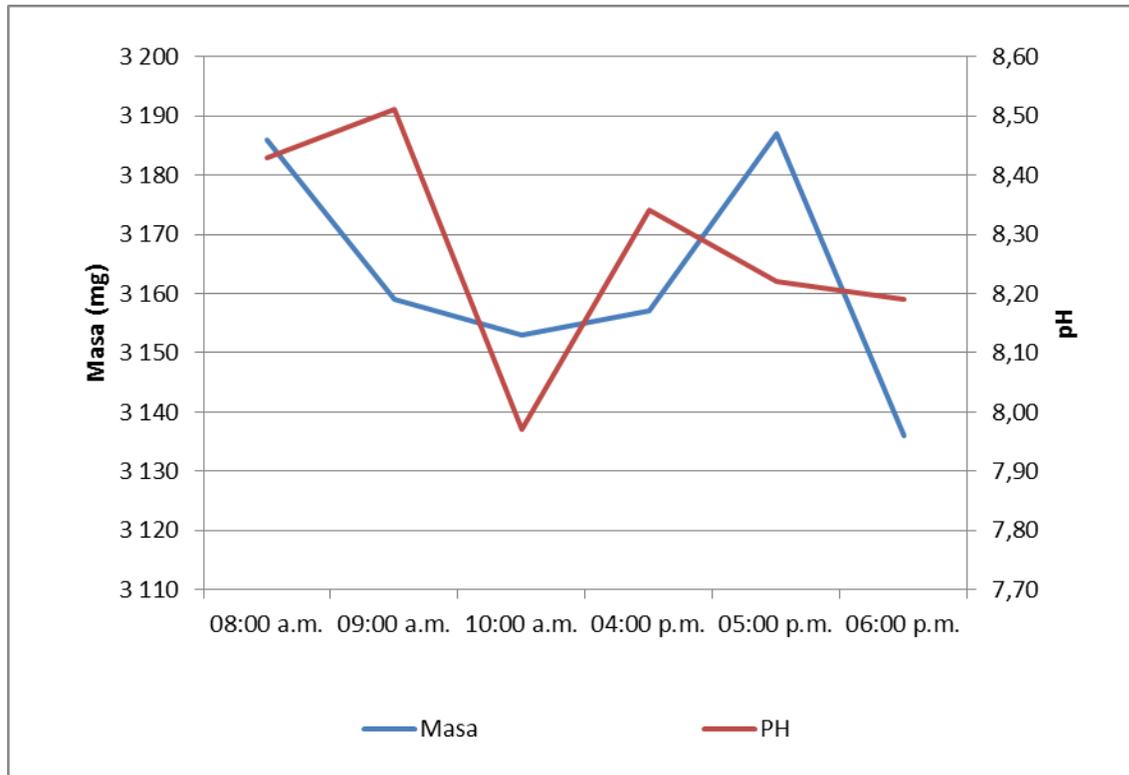
Figura 5. **Medición de la concentración de metales en agua tratada**



Muestra	Error por desviación
Zinc	2 %
Aluminio	23 %
Cromo	53 %
Antimonio	76 %

Fuente: elaboración propia.

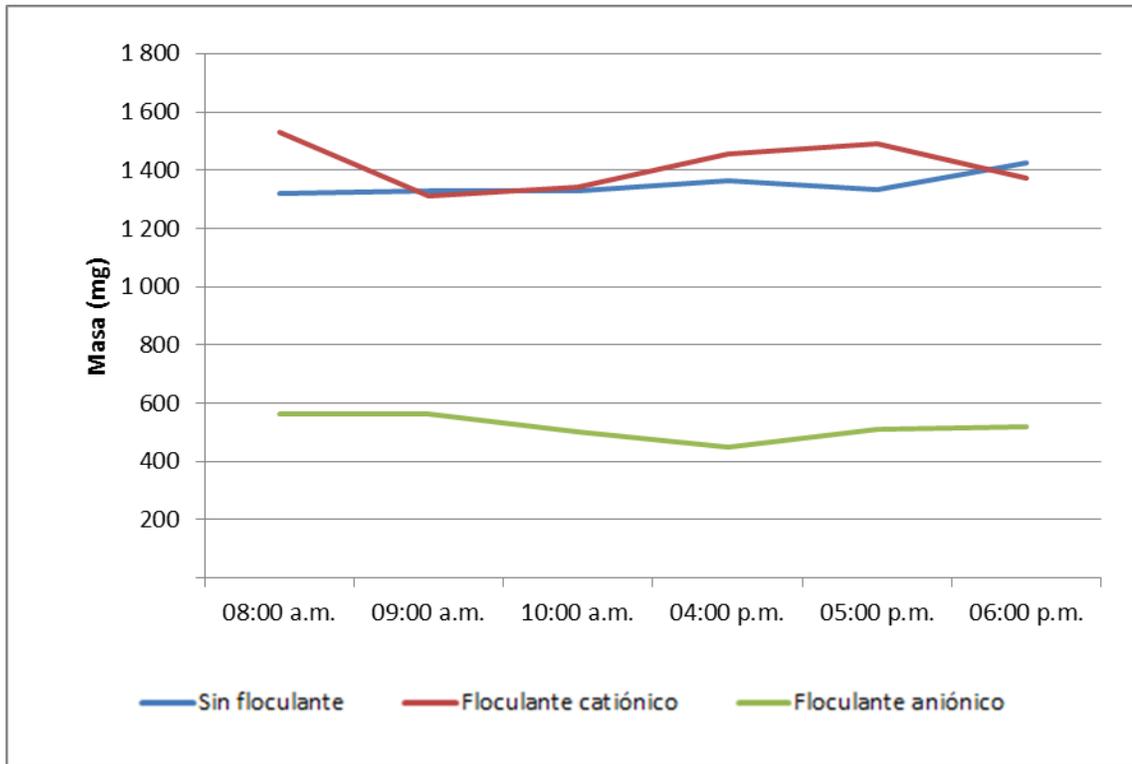
Figura 6. **Medición de sólidos totales & pH**



Muestra	Error por incertidumbre	Error por desviación
Sólidos totales	0,29	0,54 %
pH	0,06	2,33 %

Fuente: elaboración propia.

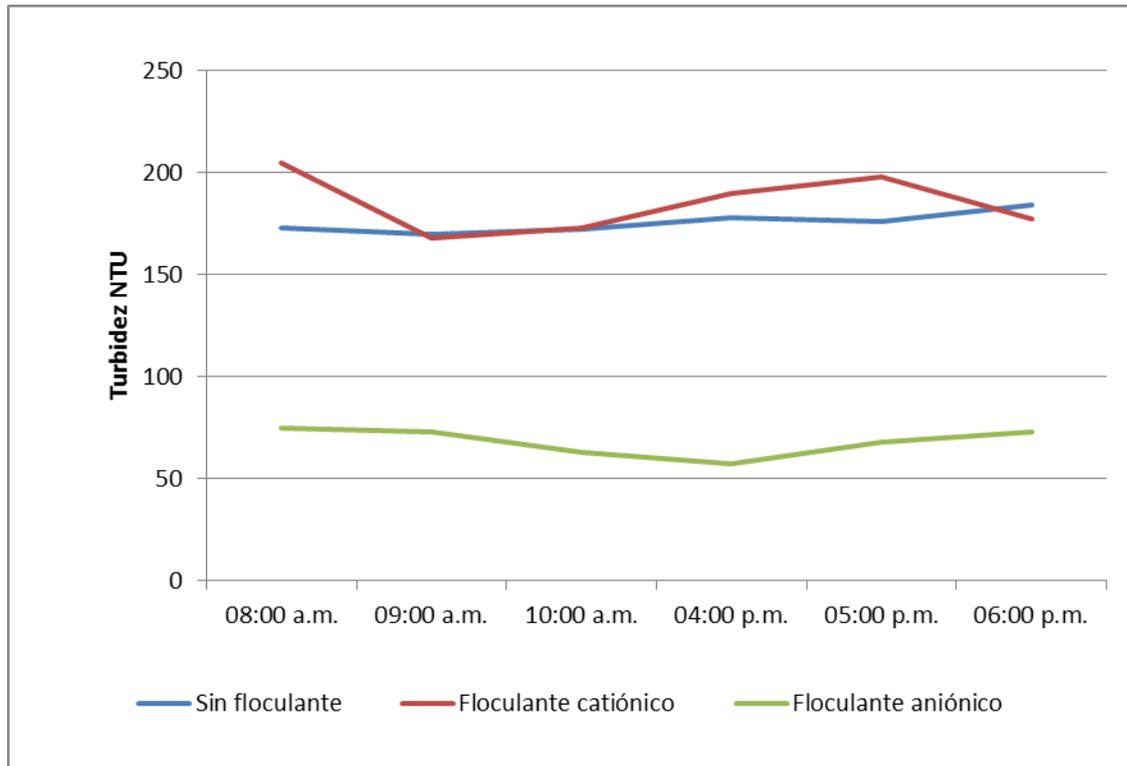
Figura 7. **Medición de sólidos suspendidos**



Muestra	Error por incertidumbre	Error por desviación
Sin floculante	0,06	4,52 %
Floculante catiónico	0,06	5,42 %
Floculante aniónico	0,06	9,62 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Medición de turbidez**



Muestra	Error por desviación
Sin floculante	3,47 %
Floculante catiónico	5,68 %
Floculante aniónico	4,53 %

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las mediciones de tiempos de sedimentación se ven afectadas notablemente por el tamaño de las partículas contenidas en el agua y la turbulencia de la misma, dado que estas provienen en su mayoría de mezclas de metales e impurezas propias del acero las cuales son en su mayoría zinc.

Se encontró que es un proceso difícil de controlar en función a la turbulencia del flujo. Aumentando el tamaño de las impurezas, por medio de un floculante se lograron mejores tiempos de sedimentación (ver figura 3).

Utilizando una membrana de 20 micras y sin floculante se logró retener parte de estas impurezas, aplicando el floculante catiónico se obtuvo una mejora que no fue significativa comparándola con el resultado del floculante aniónico, el cual resultó un 43 por ciento más efectivo que el floculante catiónico y un 51 por ciento comparándola con el agua sin floculante (ver figura 4).

La concentración de metales en el agua demostró no ser significativamente alta, y no es considerada tóxica en función a los parámetros definidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 del Reglamento para Tratamiento de Aguas Residuales y Disposición de Lodos. Sin embargo, de no controlarse puede generar problemas de aplicación del recubrimiento al metal (ver figura 5).

La cantidad de sólidos totales encontrados en el agua se ve fuertemente afectada por el proveedor de la materia prima, dando como resultado un ajuste de la cantidad de detergentes y ácidos a utilizar según el proveedor.

Las variaciones de pH están dentro de los valores aceptables que se requieren, dado que el mismo se necesita que esté por encima de 7 para lograr la sedimentación (ver figura 6).

Se determinó que la cantidad de sólidos suspendidos tuvo un incremento con el floculante aniónico, lo que permite que sea este el aplicado para el proceso de remoción de impurezas en el circuito (ver figura 7).

El floculante catiónico no tuvo una respuesta significativa al incremento de sólidos suspendidos.

La apariencia del agua mejoró en términos de claridad lo cual se demostró con la medición de la turbidez de la misma, indicando que las principales impurezas que afectan al proceso fueron removidas (ver figura 8).

CONCLUSIONES

1. El remanente de impurezas en el agua se debe principalmente al arrastre físico del proceso, el cual incluye metales y grasas, generando 3 160 mg de sólidos totales.
2. La concentración de metales no es tóxica y no necesita tratamiento específico, por lo que puede ser devuelta al lecho terrestre según Acuerdo Gubernativo 236-2006.
3. La membrana de 20 micrómetros logró retener 6 por ciento adicional al utilizar floculante catiónico y 47 por ciento adicional al utilizar floculante aniónico.
4. El floculante catiónico no brindó mejoras significativas en el tiempo de sedimentación, por lo que no es aplicable a este sistema de remoción.
5. El floculante aniónico brindó mejoras significativas en el tiempo de sedimentación, por lo que si es aplicable a este sistema de remoción.
6. Si puede ser reutilizada el agua para fines de enfriamiento de lámina en el circuito.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar un floculante aniónico en el proceso de remoción de impurezas para este circuito de limpieza.
2. La inclusión de un sistema de aplicación continua de floculante, así como un mecanismo de agitación automática.
3. La revisión y limpieza periódica de los lodos remanentes en los tanques.
4. Crear un circuito de recirculación de agua para utilizarla en el proceso o algún otro proceso de la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

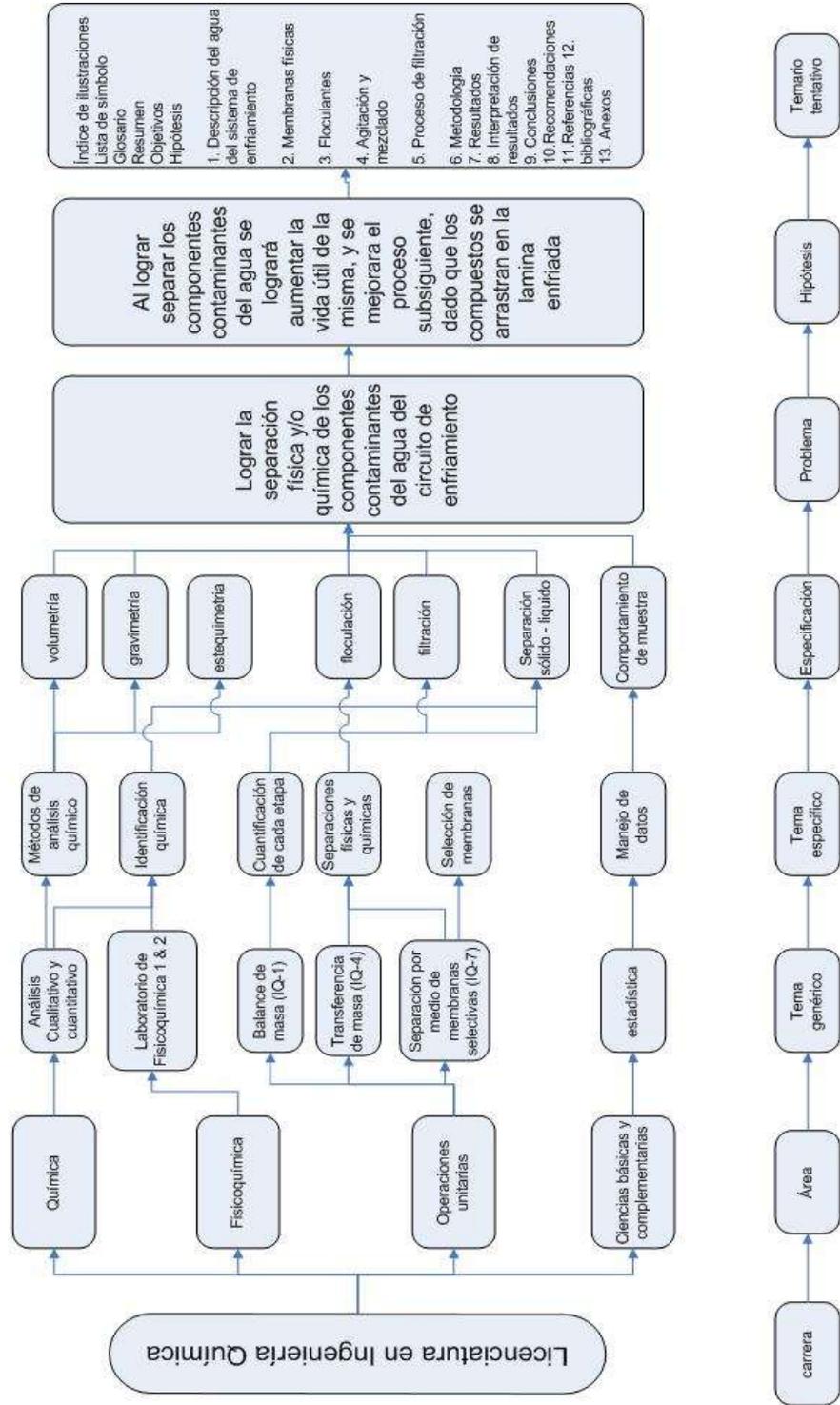
1. Cámara de Industria. *Primer Informe del Proyecto de Industrias Más Limpias*. Guatemala: Cámara de Industria, 2000. 29 p.
2. Formaselect. *Manual de tratamiento de agua*. [en línea] Unidad Potabilización de Agua. España <www.formaselect.com> [Consulta: 15 de enero de 2012].
3. GARCÍA OLMOS, Francisco. *Aplicación de la ósmosis inversa y la nanofiltración en el acondicionamiento de aguas para calderas*. Trabajo de graduación Doc. Ingeniería Química. Universidad de Oviedo, España: Departamento de ingeniería Química y tecnología del medio ambiente, 2002. 309 p.
4. Guatemala. Congreso de la República. *Acuerdo Gubernativo No. 236-2006*. Guatemala: Congreso de la República, 2006. 24 p.
5. KEMMER, F. *Manual de agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, 1993. Tomo II. 270 p.
6. OVANDO, Carlos Mancilla. *Verificación de un sistema de purificación de agua para producción en una industria de cosmética*. Trabajo de graduación de Lic. Qco. Biólogo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2004. 73 p.

7. REYES MAZARIEGOS, Memphis Sofonías. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 189 p.

APÉNDICES

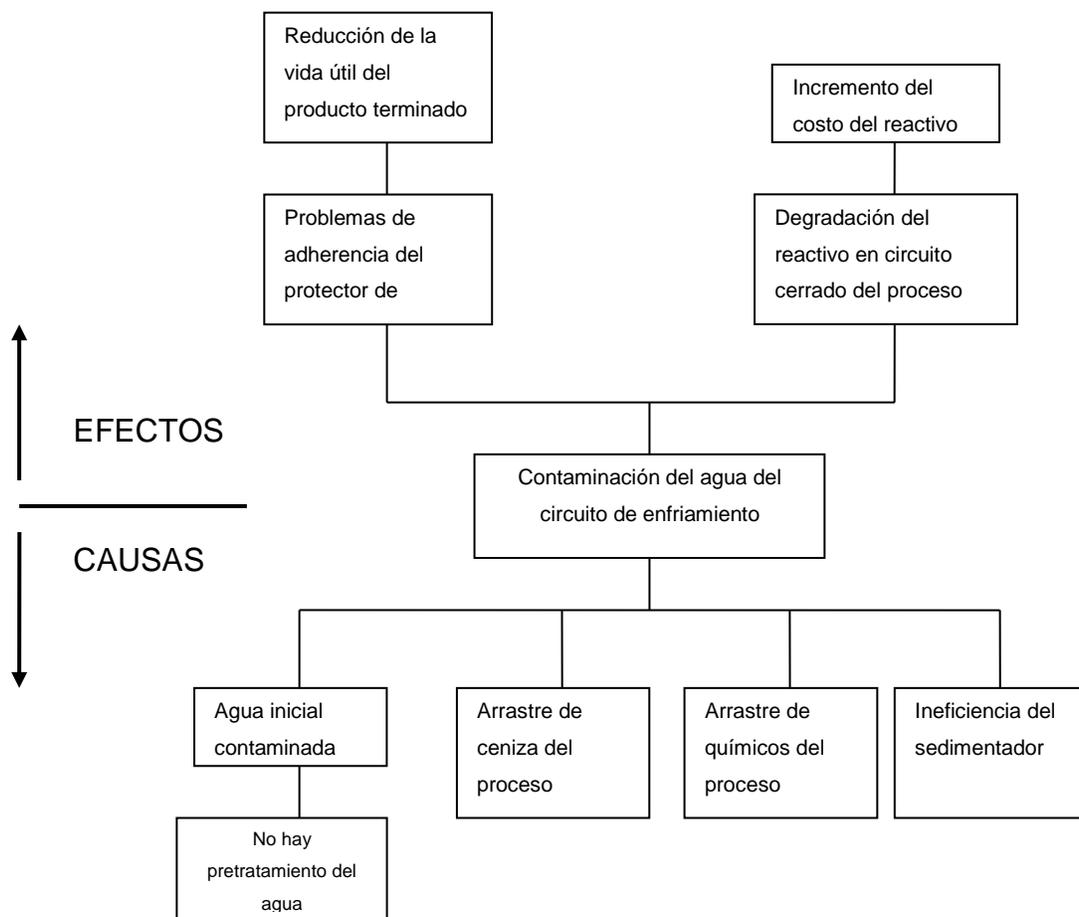
APÉNDICE 1. Tabla de requisitos académicos

Estudio a nivel laboratorio de un sistema de remoción de impurezas para el agua de un circuito de enfriamiento en una línea de galvanizado



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

