

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESMINERALIZACIÓN DEL AGUA
PARA EL USO DE LA CALDERA EN LA EMPRESA COOPERATIVA PALMAS
RISARALDA LTDA



Universidad de
PAMPLONA
La Academia al servicio de la Vida

CARLOS JESUS VILLAMIZAR RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
PAMPLONA

2015

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESMINERALIZACIÓN DEL AGUA
PARA EL USO DE LA CALDERA EN LA EMPRESA COOPERATIVA PALMAS
RISARALDA LTDA.

CARLOS JESUS VILLAMIZAR RODRIGUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director

PhD JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
PAMPLONA

2015

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

A Dios, por darme el don de la vida, por guiarme y encaminarme en su voluntad.

A mis padres, Jesus Villamizar Ortiz y Nelly Rodriguez Garcia por todos los esfuerzos y sacrificios realizados, por su ejemplo, por los mejores consejos y enseñanza. A mis hermanas por el apoyo incondicional que me han brindado.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Universidad de Pamplona por la preparación del nuevo camino que voy a emprender, como lo es, la vida profesional.

Jacipt Alexander Ramon por estar pendiente y asesorar mi proyecto.

A cuerpo docente de nuestro programa: Mario Vargas, Alvaro Villamizar, Erik German Yanza, Ever palacios, Jacqueline Corredor, y a todos los docente que aportaron a mi formación. Un grupo de personas excepcionales que en todo momento solicite una explicación o un consejo no dudaron en dárnoslo, por enseñarnos y ser un ejemplo a seguir.

Empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda, por abrirme la puerta y permitir que mi práctica profesional fuera llevada a cabo en su planta de producción.

Ingenieros: Rafael Cárdenas y Luis Antonio Villán por estar pendientes de este proceso y sacar un poco de su tiempo para la asesoría del proyecto.

A mis amigos y compañeros por estar siempre en los buenos y malos momentos.

Contenido

	pág.
Introducción	15
1. Planteamiento del Problema y Justificación	17
2. Marco Teórico y Estado del Arte	19
2.1 Calidad del Agua	19
2.1.1 Generalidades	19
2.1.2 Ciclo hidrológico y las aguas naturales	20
2.1.3 Efecto de las impurezas contenidas en el agua	20
2.2 Parámetros en el Tratamiento de Agua	21
2.2.1 Turbiedad	21
2.2.2 pH	21
2.2.3 Dureza	21
2.2.4 Oxígeno	22
2.2.5 Hierro y cobre	22
2.2.6 Dióxido de carbono	22
2.2.7 Sólidos disueltos	22
2.2.8 Sólidos en suspensión	22
2.2.9 Sólidos totales	22
2.2.10 Sílice	22
2.2.11 Alcalinidad	23
2.2.12 Conductividad	23
2.2.13 Sílice	24

2.3 Problemas Relacionados con la Calidad del Agua	24
2.3.1 Incrustación	24
2.3.1.1 Riesgos de operación y daños mecánicos producidos por incrustaciones	26
2.3.1.2 Consecuencias de las incrustaciones	26
2.3.2 Corrosión	27
2.3.2.1 Daños mecánicos producidos por la corrosión.	28
2.3.3 Espuma.	29
2.3.4 Calderas de alta y baja presión.	29
2.4 Procesos Unitarios en el Tratamiento de Agua	29
2.4.1 Coagulación	30
2.4.1.1 Principios de la coagulación	30
2.4.1.2 Mecanismos de coagulación	33
2.4.1.3 Tipos de coagulante	33
2.4.1.4 Dosis de coagulante	35
2.4.2 Floculación	36
2.4.2.1 Influencia de la calidad del agua	37
2.4.2.2 Influencia del tiempo de floculación	37
2.4.2.3 Unidades de floculación	38
2.4.3 Sedimentación.	40
2.4.3.1 Tipos de sedimentación	40
2.4.4 Intercambio iónico	41
2.4.4.1 Característica de los intercambiadores	43
2.4.5 Desgasificación	44

3. Objetivos	48
3.1 Objetivo General	48
3.2 Objetivos Específicos	48
3.3 Metodología Proyecto	49
3.4 Recopilación de la información	49
3.4.1 Fuente de información primaria	49
3.4.2 Fuentes de información secundaria	49
3.5 Calidad de la Fuente de Abastecimiento	50
3.5.1 Caudal requerido por la caldera	50
3.5.2 Caudal requerido por la planta de tratamiento	50
3.5.3 Diseño de la planta de tratamiento	50
3.5.4 Selección de parámetros óptimos del proceso (prueba de jarras)	51
3.6 Diseño de las Unidades de Tratamiento	52
3.7 Tanques	53
3.8 Canaleta Parshall	53
3.9 Floculación	54
3.10 Sedimentación	54
3.11 Intercambio Ionico	55
3.12 Desgacificador	55
4. Resultados y Análisis	57
4.1 Canaleta Parshall	57
4.2 Floculador de Flujo Horizontal	58
4.3 Sedimentador de Flujo Horizontal	58

4.4 Columna de Intercambio Ionico	59
4.5 Desgacificador	60
4.6 Tanques	61
4.6.1 Tanque de almacenamiento de agua sin trata	61
4.6.2 Tanque de almacenamiento de la solución de sulfato de aluminio tipo B	61
4.6.3 Tanque de agua clarificada.	61
4.6.4 Tanque de agua tratada para la caldera.	62
4.6.5 Tanque de regenerantes.	62
4.6 Tuberías	62
4.7 Bombas	63
5. Conclusiones	65
6. Importancia del Estudio	66
7. Recomendaciones y Limitaciones	67
Bibliografía	68
Anexos	71

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Clasificación de la dureza	21
Tabla 2. Clasificación de la conductividad	23
Tabla 3. Principales sustancias causantes de incrustación	25
Tabla 4. Pérdidas de calor y aumento de combustible según el espesor de la incrustación	27
Tabla 5. Valores recomendados del agua de caldera.	29
Tabla 6. Efecto del tamaño decreciente de las esferas	31
Tabla 7. Calidad de la fuente de abastecimiento	50
Tabla 8. Dimensionamiento canaleta parshall	57
Tabla 9. Dimensionamiento floculador hidráulico	58
Tabla 10. Características sectores floculador hidráulico	58
Tabla 11. Dimensionamiento sedimentador de flujo horizontal	59
Tabla 12. Dimensiones columna de intercambio iónico	60
Tabla 13. Dimensionamiento del desgacificador	61
Tabla 14. Procedimiento de cálculo	62
Tabla 15. Línea de tuberías	63
Tabla 16. Características de las bombas	64

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Incrustaciones en tuberías de calderas	25
Figura 2. Corrosión en calderas de vapor	28
Figura 3. Equipos que intervienen en el tratamiento de agua	30
Figura 4. Remoción de turbiedad	36
Figura 5. Floculadores.	40
Figura 6. Sedimentadores	40
Figura 7. Desgasificación	45

Lista de Anexos

	pág.
Anexo 1. Criterios de selección de equipos	72
Anexo 2. Parámetros de diseño de equipos	74
Anexo 3. Dimensionamiento Canaleta Parshall	76
Anexo 4. Floculador hidráulico de flujo horizontal	81
Anexo 5. Sedimentador	85
Anexo 6. Intercambio ionico	88
Anexo 7. Desgacificador	93
Anexo 8. Tuberías y bombas	95
Anexo 9. Tanques	99
Anexo 10. Diagrama general de la planta en 3D	101
Anexo 11. Diagrama de flujo de la planta	102

Resumen

En este proyecto, se diseñó una planta de tratamiento de agua para uso en la caldera para la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda., para resolver el problema de incrustaciones y oxidación en los equipos de producción de vapor. Se realizó un estudio a los sistemas de tratamiento utilizados, así mismo, se caracterizó el agua subterránea captada de un pozo profundo dentro de la planta, y se estableció una propuesta de tratamiento basada en el sistema convencional para la purificación de agua y un tratamiento de desmineralización para la obtención de agua para ser usada en la caldera. Se obtuvo el diseño 3D de la planta de tratamiento en el software de diseño *sketchup* 2014.

Se concluyó que con la alternativa de tratamiento planteada en este proyecto, se solucionaría la problemática de la corrosión en la caldera en la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda., pues se obtendrá agua de calidad, se disminuirán los costos de mantenimiento directamente en la caldera, además que se lograra posicionar la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda como una de las más competitivas en el norte de Santander.

Palabras claves: agua, tratamiento convencional, desmineralización, caldera.

Abstract

In this project, a water treatment plant was designed for use in the boiler to the cooperative enterprise Palmas de Risaralda Ltda., To solve the problem of scale and oxidation in steam production equipment. A study was conducted to the treatment systems used, also, the underground water taken from a deep well within the plant characterized, and a proposal for treatment based on the conventional system for water purification and treatment was established demineralization for obtaining water to be used in the boiler. 3D design of the treatment plant design software SketchUp 2014 was obtained.

It was concluded that treatment with the alternative proposed in this project, the problem of corrosion in the boiler would be solved in the company Palms Risaralda Cooperativa Ltda., For water quality will be achieved, maintenance costs will be reduced directly in the boiler also achieved that position the company Palmas de Risaralda Cooperative Ltd. as one of the most competitive in North Santander.

Keywords: water, conventional treatment, demineralization, boiler.

Introducción

El agua es el compuesto vital en la continuidad del planeta y los que habitamos en él. Debido a su gran importancia y a la calidad en el servicio para los procesos productivos muchas empresas han optado por instalar plantas de tratamiento de aguas en sus instalaciones.

En 2006, Rwe Nukem Corporations (USA) decide instalar un sistema completo de desmineralización (DEMIN) para evitar la retención de minerales en los equipos debido a problema de ensuciamiento y corrosión (Denton, et al. 20007). En 2008 Quimipac (cali) decide aprobar el diseño, suministro, montaje y puesta en marcha de una planta de agua potable con capacidad de 30lps. De igual manera, en 2010 Aceites Manuelita (Meta) decide poner en marcha una planta de desmineralización de agua industrial para utilizarla en calderas de generación de vapor con una capacidad de 11,7 lps. (Pronton Ltda, 2015). Empresas como cerámica Italia y Termotasajero implementaron plantas de tratamiento de agua.

se llevara a cabo en la Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda, esta planta se dedica a la extracción de aceite crudo a partir de la palma, con más de 15 años de trayectoria en la región del Zulia Norte de Santander. Dentro de sus instalaciones cuenta con una cadena productiva con capacidad de procesar 15 TON RFF / Hora; donde el mayor gasto de vapor en esta planta se da en la etapa de esterilización del racimo, es aquí donde el racimo se somete durante una hora a la inyección de vapor directo.

Aprovechando el agua que se encuentra en el subsuelo extraída por medio de bombas, ha llevado a estudiar la posibilidad del montaje de una planta de tratamiento de agua, con el fin de satisfacer la demanda de agua de la caldera y de paso aprovecharla para demás necesidades en la planta.

En primer lugar se busca realizar un diagnóstico técnico preliminar del estado actual de los diferentes sistemas de tratamiento de agua para uso industrial con el fin de escoger el más conveniente para el requerimiento de la caldera. De igual forma, se pretende evaluar el comportamiento del agua cruda por medio de la determinación las características físicas y químicas del agua subterránea, con el fin de definir los parámetros de diseño de los equipos y los productos químicos usados en la planta de tratamiento. El diseño del sistema de tratamiento de agua se realizara como un procedimiento convencional el cual consta de 3 unidades (mezcla rápida, floculación y sedimentación); de igual manera el proceso de desmineralización se hara a través de un proceso de intercambio iónico por medio de resina catiónica, complementado este proceso con un desgacificador para la eliminación de oxígeno disuelto. Con este proyecto se busca mejorar la calidad del agua suministrada y por ende disminuir una serie de problemas que genera el no tratamiento del líquido vital.

Este proyecto se desarrollara en el grupo de investigación GIAAS, en la línea de investigación de tratamiento de aguas para uso industrial, ya que se está aportando para resolver las necesidades de la industria local y además ayuda a fortalecer la línea, lo que abre un camino para proyectos similares en otras industrias en norte de Santander y permite fortalecer las relaciones entre el programa de Ingeniería Química y la zona industrial del departamento.

1. Planteamiento del Problema y Justificación

Actualmente la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda utiliza agua subterránea en la caldera para generar vapor y este ser utilizado durante el proceso de esterilización del racimo.

Para la producción de vapor necesario, la planta utiliza una Caldera tipo Piro-tubular, esta viene operando desde enero del 2014, durante este tiempo se desconoce de un tratamiento adecuado del agua requerida por la caldera.

Se presenta problema de oxidación e incrustaciones en la tubería de la caldera debido a las características del agua utilizada que son poco favorables para un óptimo funcionamiento. La utilización de agua con baja calidad también genera pérdidas en cuanto al desgaste de la vida útil de la caldera.

Actualmente se está utilizando un anti-incrustante directamente sobre la caldera y además hacen mantenimiento periódicamente con el fin de disminuir los riesgos que se pueden generar; pero esto no es suficiente ya que no se logra reducir la dureza y sólidos disueltos totales del agua utilizada.

La planta de extracción de aceite de palma Cooperativa Palmas Risaralda Ltda se encuentra localizada en la vereda Agualasal vía Tibu kilómetro 7 corregimiento de astilleros.

El tratamiento inadecuado o el no tratamiento del agua utilizada para la generación de vapor en calderas provocan la formación de incrustaciones, problemas de corrosión e iniciación de depósitos. Es por esta razón que se plantea el presente diseño de la planta de tratamiento de agua, que ayudara a disminuir problemas relacionados a la corrosión, como son: incremento en

los costos de producción y mantenimiento, bajo rendimiento, gasto de agua en exceso, gasto en exceso de combustible.

Por anterior se debe implementar una planta de tratamiento de agua en sus instalaciones para eliminar o disminuir los elementos fisicoquímicos del agua en aras de buscar una solución y evitar este tipo de pérdidas.

En cuanto al nivel teórico y metodológico, este proyecto se justifica debido a que sirve de sustento para definir el diseño y las condiciones operacionales óptimas, además como base a otras investigaciones que se realicen en esta área de esta empresa.

2. Marco Teórico y Estado del Arte

2.1 Calidad del Agua

La calidad de cualquier masa de agua, superficial o subterránea depende tanto de factores naturales como de la acción humana. (ONU – DAES, 2015).

El término “calidad del agua” es una expresión de empleo muy generalizado cuyo espectro es de significado muy amplio. Cada uno de nosotros está interesado en el agua desde su especial punto de vista que puede implicar sus aplicaciones comerciales, industriales, recreativas, etc. Como las características deseables de un agua cualquiera varían según la utilización a la que quiera destinársela, frecuentemente existe una comunicación muy poco satisfactoria entre los usuarios del agua en todo lo que respecta a la calidad de la misma. Por ejemplo, puede ser que una ama de casa opine que el agua del abastecimiento público es de buena calidad, mientras que la industria cervecera sostenga exactamente lo contrario. Por consiguiente el término “calidad” debe considerarse con relación al empleo a que el agua se destina. (Pérez, 1997).

2.1.1 Generalidades. El agua pura, considerada como un compuesto químico producido por la unión de una molécula de oxígeno y dos de hidrogeno, solamente existe en el laboratorio bajo condiciones especiales. En la naturaleza, en cambio, el agua al entrar en contacto con el suelo y la atmosfera va adquiriendo elementos o compuestos que desvirtúan su composición original, tanto desde el punto de vista físico, esto es, que se hacen tangibles a la vista, al gusto y al olfato, como desde el punto de vista químico y microbiológico, que requieren análisis específicos para comprobar su presencia; en estas condiciones, la calidad del agua se expresa mediante la concentración de estos elementos y compuestos ya sea en solución o en suspensión, dado que su presencia genera ciertas características físicas, químicas y microbiológicas.

2.1.2 Ciclo hidrológico y las aguas naturales. El ciclo inicia con la evaporación de grandes masas de agua hacia la tropósfera. Una vez evaporada, se condensa al entrar en contacto con corrientes de aire frío que producen lluvia y nieve.

El agua de lluvia tiene un pH menor que la proveniente de pozos, ríos, lagos o mares, carece de amortiguadores que lo mantengan neutro en presencia de dióxido de carbono y contaminantes como óxido de azufre, nitrógeno y el oxígeno de la atmosfera.

Se llevan a cabo reacciones ácido-base, donde los ácidos del agua de lluvia (dióxido de carbono, dióxido de azufre y monóxidos de carbono) neutralizan las bases de las rocas, principalmente en aguas subterráneas con alta resistencia. Los minerales aumentan el nivel de sales disueltas.

El nivel de contaminación dependerá de las condiciones atmosféricas y climáticas de la región donde precipite, las características geológicas del terreno y de su distribución como aguas superficiales o subterráneas.

2.1.3 Efecto de las impurezas contenidas en el agua. Disminución de la vida útil de los equipos

Mal rendimiento de los equipos

Perdidas caloríficas por purgas frecuentes

Costos elevados de limpieza, reparaciones e inspecciones, entrenamiento y equipo de reserva.

Corrosión y fragilidad en el acero

Averías en tubos y planchas por la disminución de la cantidad de calor transmitido.

Incrustaciones que generan obstrucción en la redes de distribución, en la caldera y tanques de almacenamiento.

2.2 Parámetros en el Tratamiento de Agua

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de una caldera, (Romero, 1997), son los siguientes:

2.2.1 Turbiedad. Es la propiedad óptica de una muestra para disipar y absorber la luz en vez de transmitirla en línea recta. La turbiedad es debida a partículas que están en suspensión o en estado coloidal (diámetros menores que 10^{-3} mm) y que comunican la capacidad de diseminar un rayo de luz, fenómeno óptico que captamos como agua sucia o barrosa.

2.2.2 pH. El pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).

2.2.3 Dureza. La presencia de cationes polivalentes, principalmente los cationes de calcio y magnesio dan origen a la dureza de las aguas. En otras palabras, la dureza del agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes, estos iones, son los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera. En términos de dureza las aguas pueden clasificarse como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de la dureza

Dureza (ppm CaCO ₃)	Clasificación
Menos de 15	Muy suave
15 – 50	Suave
51 – 100	Dureza media
101 – 200	Dura
Más de 200	Alta Dureza

Fuente: Perez, (s,f). p, 14.

2.2.4 Oxígeno. El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.

2.2.5 Hierro y cobre. El hierro y el cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se pueden utilizar filtros para remover estas sustancias.

2.2.6 Dióxido de carbono. el dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de taberculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El CO_2 se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

2.2.7 Sólidos disueltos. Los sólidos disueltos constituyen una medida de la cantidad total de materia disuelta (impurezas) en el agua. una alta concentración de solidos disueltos puede originar entre otros problemas, la formación de espuma.

2.2.8 Sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua; esto origina taponamiento de las líneas y deposito en la caldera y equipos de intercambio de calor. Pueden ser de tipo orgánico e inorgánico tales como arcillas, lodos, humus, aceites o grasas, que se encuentran suspendidas en el agua. unidades ppm.

2.2.9 Sólidos totales. Son la suma de los sólidos disueltos y en suspensión.

2.2.10 Sílice. La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).

2.2.11 Alcalinidad. Representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua, puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que, representa una fuente potencial de depósitos.

2.2.12 Conductividad. La conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua, esta a su vez es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad es muy usado en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

La medida de conductividad permite evaluar rápida pero muy aproximadamente la mineralización global del agua.

La reglamentación francesa insiste sobre el interés de esta medida. Proporciona igualmente las indicaciones siguientes sobre la relación existente entre la mineralización y la conductividad [6].

Tabla 2. Clasificación de la conductividad

Conductividad	Clasificación
< 100 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización muy débil
100-200 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización débil
201 – 333 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización media acentuada
334 – 666 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización media
667-1000 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización importante
>1000 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización excesiva

Fuente: Pancorbo, 2011, p, 147.

2.2.13 Sílice. Esta se presenta en el agua en forma soluble o en forma suspendida. Produce incrustaciones en las calderas a altas temperaturas se evapora y forma depósitos insolubles y muy adherentes en las turbinas. Unidades ppm.

Gases disueltos. Corresponde a la presencia de gases disueltos, como el bióxido de carbono, oxígeno y amoníaco. Estos gases son la causa principal de la corrosión encontrada en las calderas, turbinas, equipos y accesorios.

2.3 Problemas Relacionados con la Calidad del Agua

El tratamiento inadecuado del agua de alimentación de la caldera genera los siguientes problemas:

2.3.1 Incrustación. La incrustación consiste en la formación de una capa de materia sólida en la superficie de calentamiento de las calderas por el lado del agua. Esta capa sólida está formada por sales que entran a la caldera disueltas en el agua, ya dentro de ella se precipitan o cristalizan debido a la fuerte concentración que sufren al evaporarse grandes cantidades de agua, tal como se muestra en la figura 1.

La formación de las incrustaciones puede efectuarse por tres mecanismos.

Por asentamiento y cementación de los sólidos en suspensión.

Por cristalización espontánea de las sales al sobresaturarse el agua efectuándose esta cristalización preferentemente sobre las superficies de calentamientos debido a la disminución de la solubilidad de algunas sales causadas por la temperatura ligeramente más alta que hay en la película de líquido que está en contacto directo con la superficie de calentamiento.

Por la evolución de las burbujas en las superficie de evaporación, depositándose todas aquellas sales que venían en solución, en la superficie seca donde la burbuja se está desprendiendo de la placa metálica.

La incrustación se supone que se forma por uno u otro de estos mecanismos según el tipo de caldera o la región de ella que se considera; así el primer tipo se puede presentar en las calderas marinas y en las tubulares de retorno, el segundo tipo se presenta en aquellas superficies de la caldera donde no hay evaporación, el tercero en las calderas acuatubulares.

Cualquiera que sea la forma como se produzca la incrustación, siempre habrá una tendencia a que se reincorpore al agua y solo se formara una incrustación estable cuando la velocidad con que se forma sea mayor que la de su reincorporación al agua.



Figura 1. Incrustaciones en tuberías de calderas

Fuente: Process Engineering, Water treatment, Desing and Service.

Las principales sales causantes de incrustación se evidencian en la siguiente tabla 3.

Tabla 3. Principales sustancias causantes de incrustación

NOMBRE	SIMBOLO
Carbonato de calcio	CaCO_3
Carbonato ácido de calcio	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
Cloruro de calcio	CaCl_2
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
Sulfato de calcio	CaSO_4
Carbonato de magnesio	MgCO_3

NOMBRE	SIMBOLO
Carbonato acido de magnesio	Mg(HCO ₃) ₂
Sulfato de magnesio	MgSO ₄
Cloruro de magnesio	Mg(NO ₃) ₂
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂
Oxido férrico	Fe ₂ O ₃
Dióxido de silicio	SiO ₂

Fuente: Colchal, 2013, p, 44.

2.3.1.1 Riesgos de operación y daños mecánicos producidos por incrustaciones. Un recubrimiento de incrustación de 1.6 mm de espesor en tubos de agua expuestos al calor radiante puede producir la rotura del tubo, mientras que depósitos mayores en los tubos de fuego pueden producir pérdidas de eficiencia, aunque no son peligrosas. (Kohan, 2000).

2.3.1.2 Consecuencias de las incrustaciones. La temperatura de los humos a la salida de las calderas (de tubos de humo) aumentan el detrimento del rendimiento calorífico; el consumo de combustible y el precio del vapor aumentan paralelamente.

El aumento en combustible y la disminución de la capacidad de la caldera debido al aislamiento y disminución de la sección libre de los fluxes; además puede ser causante de deformaciones y rupturas cuando por ser muy gruesa, origina un sobrecalentamiento de la pared metálica que llegue cerca de su punto de fusión.

Las pérdidas de calor que causa una incrustación dependen de varios factores, tales como espesor, naturaleza y porosidad de la incrustación, diferencia de temperaturas entre las superficies externa e interna de la capa, etc. y se puede calcular de la misma forma que se calcula la transmisión de calor a través de la pared metálica de las tuberías. Además, habrá que considerar otra pérdida debido al aumento del espesor de la capa de agua estacionaria que será mayor por la rugosidad de la superficie de la incrustación.

A consecuencia de la porosidad de las incrustaciones, cuando el agua entra en contacto con el hierro sobrecalentado, aumenta su concentración en sosa cáustica y provoca corrosiones; al disociarse el oxígeno naciente, ataca el hierro.

Las incrustaciones bloquean la acción adecuada de los controles como el McDonnell (nivel de agua) e incluso las válvulas de seguridad.

Una incrustación de decimas de milímetro de espesor es suficiente para que la temperatura del metal sobrepase los 600 °C, límite en el cual el acero pierde resistencia mecánica precisa. (Germain & Rouquet 1982).

Tabla 4. Perdidas de calor y aumento de combustible según el espesor de la incrustación

ESPESOR DE INCRUSTACIONES	PERDIDAS DE CALOR QUE SE PRODUCE	AUMENTO CONSUMO COMBUSTIBLE EQUIVALENTE
0.8 mm	8 %	2.0 %
1.6 mm	12 %	2.5 %
3.2 mm	20 %	4.0 %

Fuente: Bertomeu, 1999, p, 7.

2.3.2 Corrosión. La corrosión es el ataque de las paredes metálicas de las calderas por la acción de las impurezas contenidas en el agua, ver figura 2.

La velocidad de corrosión depende de las siguientes condiciones:

Formación de un área aniónica

Formación de un área catódica

Establecimiento de un medio electrolítico para transferencia de cargas.

La forma más común de corrosión es el ataque al acero por el oxígeno, acelerado por las altas temperaturas y pH bajo. Ingresa al agua de alimentación cuando la caldera opera a baja carga y en la puesta en marcha. Produce un ataque de picado en el metal (ataque en zona localizada) y óxido de hierro al unirse al metal de la caldera.

La acidez o alcalinidad del agua, gobernada por el pH es otra causa de corrosión. Un pH igual a siete crea una condición neutra, con un valor menos se considera acida y existe corrosión por acidez. Cuando el pH es superior a siete (mayor de doce) es alcalina; este valor es crítico y ocurre por fragilidad caustica. Un medio electrolítico (interacción de cargas eléctricas opuestas), causa corrosión, el total de sólidos disueltos conformado por impurezas con cargas eléctricas negativas, reaccionan con el hierro de la caldera que tiene carga positiva. Un adecuado régimen de purga, reduce el riesgo de corrosión por sólidos altos.

2.3.2.1 Daños mecánicos producidos por la corrosión. La reacción del hierro de la caldera y el agua se acelera con el oxígeno, los óxidos ferrosos de forma localizada origina poros en el metal. El oxígeno reacciona con el hidrogeno permitiendo la disolución gradual de más hierro. Las picaduras son acusadas en zonas sometidas a esfuerzos durante la fabricación de la caldera, tales como las soldaduras, secciones trabajadas en frio o discontinuidades del metal.



Figura 2. Corrosión en calderas de vapor

Fuente: Oelker, A. (s,f)

2.3.3 Espuma. Se debe al alto contenido de sólidos disueltos, sólidos suspendidos, materia orgánica, elevadas concentraciones de NaOH, y por inapropiado diseño de la caldera lo cual conlleva al arrastre de agua en el vapor generado.

2.3.4 Calderas de alta y baja presión. El tratamiento para el agua de calderas como acondicionamiento, sufre variación con respecto al valor de su presión de trabajo. Algunos parámetros exigen reducir su rango permisible a medida que la presión de trabajo asciende, tal es el caso de la sílice, que es necesario controlar su concentración en calderas de alta presión, es la más firme, tenaz y difícil de eliminar de todos los minerales disueltos, apta para transportarse con el vapor. Los depósitos de sílice semejantes a los del vidrio, inhiben la transferencia térmica provocando quemaduras de tubo y cuando se deposita sobre los alabes de turbinas se reduce la eficiencia, provocando un desequilibrio del rotor, ocasionando paradas prematuras y costosas.

Tabla 5. Valores recomendados del agua de caldera.

Presión de trabajo (Kg/cm ²)	Oxígeno disuelto (ppm)	Hierro (ppm Fe)	Sólidos totales (ppm)	Dureza total (ppm CaCO ₃)	Alcalinidad total (ppm CaCO ₃)	Conductividad (µSiems/cm)
0-20	0.04	0.100	3500	0.300	350	3500
21-30	0.04	0.050	3000	0.300	300	3000
31-42	0.007	0.030	2500	0.200	250	2500
43-52		0.025	2000	0.200	200	2000
53-63		0.020	1500	0.100	150	1500
64-70		0.020	1250	0.050	100	1000
71-105		0.010	1000	-----	-----	150
106-140		0.010	750	-----	-----	100

Fuente: ASME.

2.4 Procesos Unitarios en el Tratamiento de Agua

En el tratamiento de agua industrial intervienen procesos como: coagulación, floculación, sedimentación, intercambio iónico y desgasificación

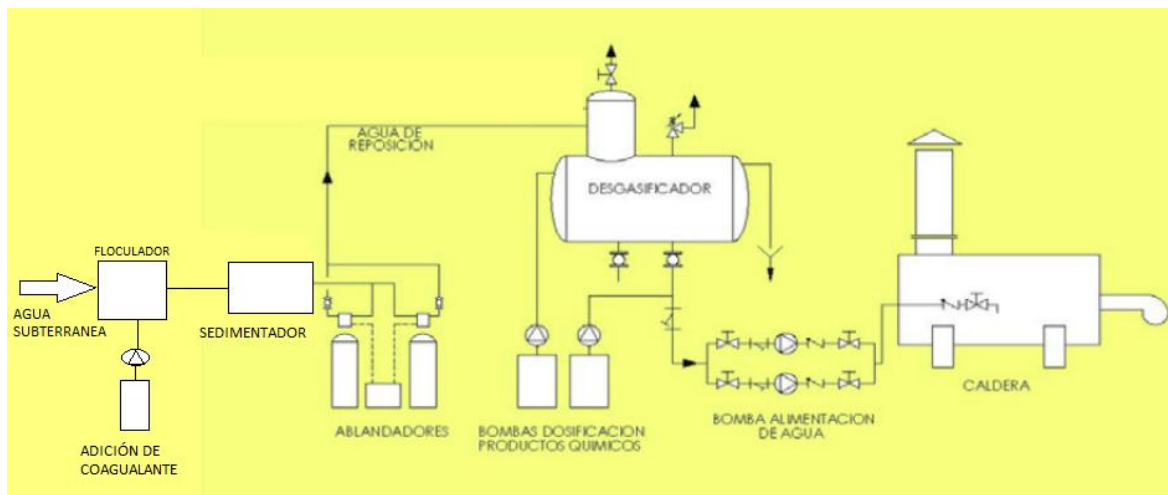


Figura 3. Equipos que intervienen en el tratamiento de agua

Fuente: Oelker, (s,f)

2.4.1 Coagulación

2.4.1.1 Principios de la coagulación. las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas o inorgánicas, estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que puedan eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas de ellas tienen una carga eléctrica superficial que hace que se repelen continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación. Estas partículas tienen un tamaño que suele estar entre 0.2 y 1 μm , y se denominan coloides; estas especies coloidales halladas en el agua cruda incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados. (Kemmer, & Mc Callion 1989).

Los coloides tienen propiedades muy características que los distinguen en forma precisa. Algunas de las más importantes son las siguientes:

Propiedad cinética: dentro de las propiedades cinéticas se consideran:

Movimiento browniano. Consiste en el movimiento constante e irregular de las partículas coloidales dentro de la fase líquida. Se llama así en honor al botánico inglés Robert Brown, quien en el año 1928 fue el primero en detectarlo al observar al microscopio los movimientos de partículas de polen en el agua. La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo caótico de las partículas en suspensión por parte de las moléculas de agua, situación que aumenta al elevarse la temperatura del líquido.

Difusión. Tiene estrecha relación con el movimiento browniano, ya que debido a este, las partículas coloidales tienen la tendencia a dispersarse por todas partes en el disolvente, en este caso agua. La velocidad de difusión es menor que la velocidad media de las partículas en el movimiento browniano.

Propiedades ópticas. Efecto de Tyndall-Faraday. Describe el fenómeno de la dispersión de la luz al pasar a través de una dispersión coloidal. La dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas. El efecto Tyndall-Faraday se utiliza en la determinación de la turbiedad por medio de un nefelómetro. Esta determinación, desafortunadamente, no se relaciona en ningún caso con el número de partículas de turbiedad, ni siquiera con la masa total.

Propiedades de superficie. Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa de la partícula. La siguiente tabla muestra el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. El aspecto más importante de esa gran superficie específica es la capacidad de los coloides para absorber en la interfase sólido-líquida, moléculas, iones o coloides (tabla 6).

Tabla 6. Efecto del tamaño decreciente de las esferas

Diámetro partículas [mm]	Orden de tamaño	Área superficial total *	Tiempo necesario para la sedimentación **
10	Grava	3,142 cm ²	0,3 s
1	Arena gruesa	31,42 cm ²	3 s
0,1	Arena fina	314,2 cm ²	38 s
0,01	Limo	0,31 m ²	33 min
0,001	Bacterias	3,14 m ²	55 h
0,0001	Partículas coloidales	3,17 m ²	230 d
0,00001	Partículas coloidales	2,833 m ²	6,3 años
0,000001	Partículas coloidales	28,328 m ²	Mínimo de 63 años

* Superficies para partículas del tamaño indicado, producidas a partir de una sola partícula de 10 mm de diámetro y una densidad de 2,65 g/cm³

** Estos cálculos se basan en una esfera de una densidad de 2,65 g/cm³ para descender una distancia de 0,30 m.

Fuente: Pérez, (1997), p 46.

Propiedades electrocinéticas. Se ha observado que al pasar una corriente directa a través de una dispersión coloidal, las partículas son atraídas a los electrodos positivo o negativo. Este fenómeno descubierto en 1807 es conocido por el nombre de electroforesis, e indica que las partículas coloidales tienen carga eléctrica y que se mueven, de acuerdo a su carga, hacia el electrodo de signo opuesto. Por su naturaleza, casi todos los coloides poseen carga negativa, lo cual es muy importante para comprender de las dispersiones coloidales. (Pérez, 1997).

El objetivo principal de la coagulación es anular las cargas eléctricas de las partículas coloidales que se encuentran en suspensión; La desestabilización se logra al neutralizar las fuerzas que mantiene separada las partículas, en este proceso aumentar la tendencia de estas partículas a agregarse

Esto se lleva a cabo mediante coagulantes químicos adicionados al agua directamente con agitación o mezcla rápida que permita la formación de microfloculos.(Arboleda, 1981).

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura fracciones pequeñas de tiempo. Básicamente consiste en una serie de reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

Este proceso complejo se ve afectado directamente por las características del agua, tipo de coagulante, dosis de coagulante, concentración del coagulante, punto de aplicación del coagulante, pH de coagulación, condiciones de mezcla y temperatura. (Beron, 2004).

2.4.1.2 Mecanismos de coagulación. La desestabilización de las partículas suspendidas se puede lograr mediante cuatro mecanismos de coagulación: compresión de la doble capa, Adsorción y neutralización de la carga, Adsorción y formación de puente químico, incorporación o de barrido.

En el tratamiento de agua, la coagulación con sales de hierro y aluminio se da fundamentalmente por dos mecanismos: adsorción de especies insolubles hidrolizadas del coagulante sobre el coloide y subsecuente desestabilización (adsorción-neutralización), e inmersión del coloide en un precipitado de hidróxido (barrido). (Montejo, 1989).

2.4.1.3 Tipos de coagulante. En el proceso de coagulación se utilizan dos diferentes tipos de coagulantes, los cuales son: coagulantes metálicos y polielectrolíticos (llamados también coadyuvantes en la coagulación). Los coagulantes metálicos se pueden dividir en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y polímeros sintéticos.

Las sales de aluminio son las más conocidas y usadas en Colombia; entre estas se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el policloruro de aluminio, de las

cuales el sulfato de aluminio conocido como alumbre es muy común por su bajo costo y disponibilidad en el mercado. Cuando una sal de aluminio se agrega al agua, se desencadena una serie de reacciones con la alcalinidad, el agua y los iones presentes en ella, de acuerdo al proceso de hidrolisis y polimerización.

El sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, es un polvo color marfil, ordinariamente hidratado. Cuando está en solución, se encuentra hidrolizado, esto es, asociado con el agua, tomando la forma $[Al(H_2O)_6]^{++}$, actuando como un ácido por ser donador de protones. El aluminio hidratado tiene la propiedad de reaccionar primero con la alcalinidad del agua, causando un consumo de la misma y un descenso del pH, y cuando toda la alcalinidad se consume, el ion hidratado de aluminio reacciona con el agua, que es una base débil. Los iones de aluminio que se añaden al agua intervienen casi instantáneamente en una serie de reacciones hidrolíticas, con esta o con la alcalinidad, para formar unas sustancias tipo hidróxido de cargas multivalentes, prosiguiendo la formación de una sustancia neutra $[Al(OH)_3(H_2O)_3]$ tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos, pueden ser rápidamente adsorbidos por las partículas presentes en el agua, produciendo su desestabilización. El pH en el agua es de vital importancia para establecer la carga media de los productos de hidrolisis, y por consiguiente es significativo en la determinación de la velocidad de la coagulación, por tanto para este tipo de sal el pH debe estar entre 6.5 a 8.0.

Este se encuentra en forma granular o líquida y hay dos tipos (tipo A y B), siendo un factor diferenciador la pureza.

Las sales de hierro al entrar en contacto con el agua generan una hidrolisis similar a la de las sales del aluminio, experimentando una serie de reacciones hidrolíticas y de polimerización, en

las que se forman complejos polinucleares hidroxiferricos, que son rápidamente adsorbidos por los coloides. Para utilizar esta sal en la coagulación el pH del agua debe estar aproximadamente entre 5.5 a 8.5.

Polímero sintético. Recientemente se ha introducido el uso de polímeros orgánicos, ya sean naturales o sintéticos, como coagulantes o ayudantes de la coagulación. Los polímeros naturales son derivados del almidón y la celulosa y, al igual que los sintéticos, poseen un gran número de sitios activos en sus cadenas orgánicas. Según su carga, pueden ser aniónicos o catiónicos, dependiendo de que los grupos ionizables que sean negativos o positivos, en cuyo caso se denominan polielectrolitos. Uno de los más antiguos polielectrolitos utilizado es la sílice activada.

2.4.1.4 Dosis de coagulante. En la siguiente figura se puede observar el comportamiento de la dosis de coagulante Vs la turbiedad residual. En las abscisas se representa la dosis de sulfato de aluminio aplicada, y en las ordenadas la turbiedad después de la coagulación y de un tiempo de sedimentación determinado. La curva de coagulación puede dividirse en cuatro zonas: la zona 1 corresponde a dosis bajas donde se ha agregado coagulante en cantidad insuficiente para efectuar la desestabilización; la zona 2 corresponde a dosis un poco más altas, donde se realiza la desestabilización y el floc se precipita; la zona 3, donde una sobre dosis puede restabilizar la dispersión coloidal bajo determinados valores de pH, lo cual ocurre porque la adsorción es suficiente para producir una dispersión cargada positivamente y además estable. Finalmente en la zona 4, la sobresaturación produce una gran cantidad de hidróxidos de aluminio y ocurre una remoción de coloides por floc de barrido. Se observa en la figura que se puede obtener la misma remoción de turbiedad con una dosis D1 mucho menor que la dosis D2 lo que evidencia la

importancia que tiene el ajuste preciso de la dosificación con el objeto de lograr economía en el proceso.

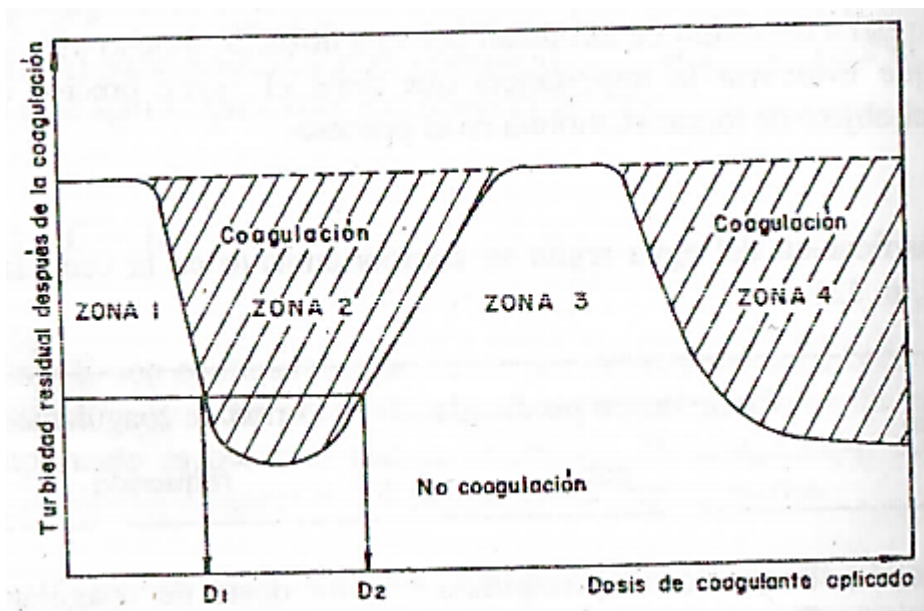


Figura 4. Remoción de turbiedad

Fuente: Stumm & O'melia, 1968

2.4.2 Floculación. La floculación es el proceso que se realiza inmediatamente después de la coagulación. (Pérez, 1997).

Puede ser que el floculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse o desecarse con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individualmente en aglomerados.

En la floculación, una vez introducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante agitación lenta prolongada, floculación, durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan

su tamaño y adquieren mayor densidad. El floculador es, por lo tanto, un tanque con algún medio de mezcla suave y lenta, con un tiempo de retención variable dependiendo del modelo.

De la misma forma que la coagulación, la floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración de los electrolitos.

Existen dos tipos de floculación: la llamada floculación pericinetica que se presenta en forma espontánea, debido al desplazamiento continuo de las moléculas de agua producido por el movimiento browniano y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse. El otro tipo es la floculación ortocinética que es debida a gradientes de velocidad inducidos en el líquido por energía mecánica o hidráulica, causando el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión

2.4.2.1 Influencia de la calidad del agua. La concentración y la naturaleza de las partículas tienen una notable influencia en el proceso de floculación. En todos los modelos de matemáticos de floculación, la velocidad de formación de los floculos es proporcional a la concentración.

Por regla general es más fácil flocular aguas con una alta turbiedad y que presenten una amplia distribución de tamaños; por el contrario, las partículas de gran tamaño como la arena fina acarreada durante los picos de elevada turbiedad, inhiben el proceso, motivo por el cual, cuando la turbiedad del agua es muy alta es indispensable utilizar tanques de pre sedimentación.

2.4.2.2 Influencia del tiempo de floculación. En todos los modelos propuestos para floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de

detención. En un estudio efectuado en 20 plantas de estados unidos, se determinó los tiempos y los gradientes de floculación, encontrando que el periodo de floculación estaba comprendido entre 10 y 100min, existiendo bajo determinadas circunstancias un tiempo óptimo para el proceso, normalmente entre 20 y 40 min; a través de ensayos de prueba de jarras, se puede determinar este tiempo óptimo.

2.4.2.3 Unidades de floculación. Después de haberse efectuado la dispersión de los coagulantes, el proceso siguiente consiste en producir en el agua una agitación lenta que permita el crecimiento del floc, inducido por el contacto entre las partículas desestabilizantes.

Fundamentalmente en la floculación deben considerarse tres características esenciales:

Forma de producir la agitación

Gradiente de velocidad; y

Tiempo de detención

En términos generales, los floculadores se clasifican en dos grupos: floculadores de contacto de solidos o de manto de lodos y floculadores de potencia o disipación de energía.

Los floculadores de contacto normalmente forman parte de los tanques de decantación de flujo vertical; el agua coagulada asciende por la estructura encontrándose a su paso un manto de lodos suspendido, ya sea hidráulica o mecánicamente, ocasiona el choque entre las partículas que lo constituyen y aquellas recién ingresadas, produciendo floculación. Su principal desventaja consiste en la dificultad para mantener una adecuada concentración de solidos suspendidos requiriendo una atención constante del operador.

En los floculadores de potencia, las partículas son arrastradas con el agua en el flujo a través del tanque de floculación, no existiendo prácticamente concentración de sólidos, siendo deseable que no ocurra retención de material en estas estructuras.

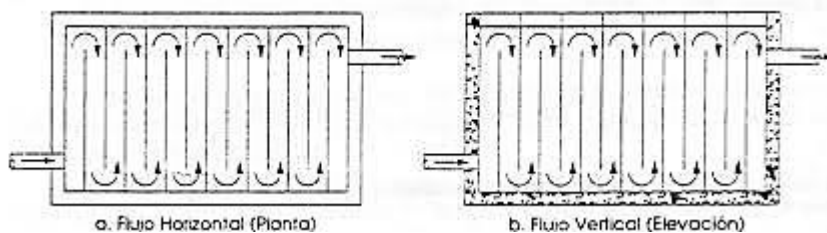
Los gradientes de velocidad son seleccionados en el diseño, existiendo la posibilidad en algunos casos de ser ajustados por el operador. De acuerdo con la forma de disipación de energía se clasifican en hidráulicos y mecánicos: los floculadores hidráulicos utilizan la energía hidráulica disponible a través de la pérdida de carga en la propia estructura; los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, o cual hace posible la modificación de la intensidad de agitación.

Floculadores hidráulicos.

Cualquier dispositivo que utilice la energía hidráulica disipada por el flujo del agua, puede constituir un floculador hidráulico. Existen varios tipos, entre los cuales el más importante es el floculador de tabiques.

Floculador de tabiques. Están constituidos por canales en donde son acoplados varios tabiques o pantallas los cuales pueden ser hechos en asbesto, cemento o madera; a través de estos se fuerza el agua a circular con un movimiento de vaivén alrededor de los tabiques haciendo un giro de 180° , lo cual produce la turbulencia requerida.

Existen dos clases: los de flujo horizontal, en los cuales como su nombre lo indica, el agua se desplaza en sentido horizontal entre dos tabiques consecutivos, haciendo el giro al final de cada uno.



(a)] y los de flujo vertical (b), en los cuales el flujo baja y sube en condiciones similares.

Figura 5. Floculadores.

Fuente: datateca.unad.edu.co

2.4.3 Sedimentación. La sedimentación es la remoción de los sólidos en suspensión en un fluido por la fuerza de gravedad. Los sólidos pueden estar presentes en el agua como ocurren naturalmente, como es el limo o la arena, o en forma modificada de su estado natural, como resultado de la coagulación y la floculación. Sea cual fuere el origen de las partículas si son más densas que el agua es mayor su probabilidad de sedimentación, dando como resultado un fluido clarificado, y en el fondo de los tanques, una suspensión más concentrada que se considera ha sido separado del mismo.

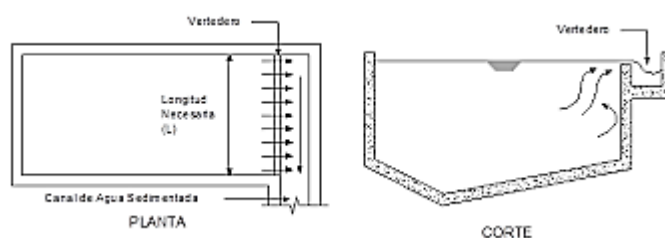


Figura 6. Sedimentadores

Fuente: datateca.unad.edu.co.

2.4.3.1 Tipos de sedimentación. La sedimentación ocurre de manera diferente según la naturaleza de los sólidos, su concentración y su grado de floculación. Clasificándolos según el tipo de partículas se puede dividir en:

Sedimentación de partículas discretas: se entiende por sedimentación de partículas discretas, aquella en que los sólidos no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido y sedimentan con una velocidad de caída constante.

Sedimentación de partículas aglomerarles: es aquella en que los sólidos al descender se adhieran o aglutinan entre sí, mediante mecanismos de floculación, precipitación, arrastre o barrido, cambiando de velocidad de sedimentación, tamaño, forma y peso durante su descenso a través del líquido. (Arboleda, 1981).

La sedimentación es la preparación del agua hacia las columnas de intercambio iónico; cuanto mejor sea la decantación, más eficiente será la filtración, en consecuencia, para tener una sedimentación más eficiente, se deben tomar las siguientes precauciones:

Correcta aplicación de coagulantes al pH óptimo (incluye la aplicación de alcalinizante, en caso de que sea necesario)

Mezcla rápida eficaz (coagulación)

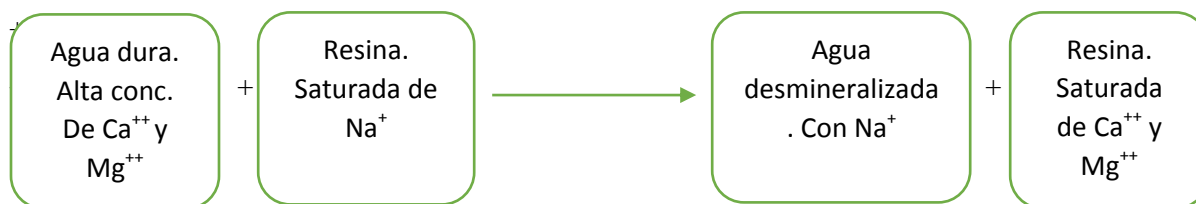
Mezcla lenta con el fin de producir floculos grandes y pesados (floculación)

Limpieza rutinaria de los decantadores.

2.4.4 Intercambio iónico. El intercambio iónico es una técnica que permite intercambiar iones entre un líquido y un sólido (este sólido es el “intercambiador”). El sólido es llamado resina, y hay de dos tipos: las resinas catiónicas, que intercambian cationes, y las aniónicas, que como su nombre lo indica, intercambian aniones. Para la desmineralización de aguas, se utilizan resinas de intercambio catiónico, ya que se desea remover los cationes de Ca^{++} y Mg^{++} . La

resina inicialmente está cargada de cationes de sodio (Na^+), y estos serán los iones que pasaran al líquido al mismo tiempo que los cationes Ca^{++} y Mg^{++} quedarán retenido en la resina. De allí el nombre de la técnica, los iones son literalmente intercambiados.

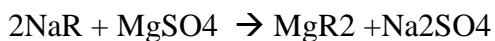
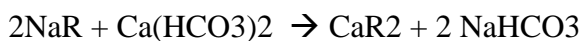
En el siguiente esquema se resume el proceso de intercambio iónico:



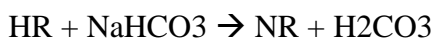
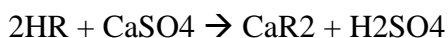
Se puede lograr la completa eliminación de las sales disueltas en el agua, obteniéndose una pureza comparable, ventajosamente con la del agua destilada producida en escala industrial y con una gran ventaja económica sobre ella, pues el costo de la des-ionización depende de la cantidad de sales eliminadas, sin importar casi la cantidad de agua en que van disueltas.

Las reacciones generales a todos los intercambiadores de iones son las siguientes:

Ciclo sodio:



Ciclo Hidrogeno:



R= radical negativo del intercambiador de cationes.

2.4.4.1 Característica de los intercambiadores. Todos los materiales intercambiadores de iones, como es natural, llegan a un punto de saturación en el cual ya no ejercen ninguna acción sobre el agua que pasa por ellos, es decir que el agua sale con el mismo contenido de iones con que entra. A este punto se llama de saturación total, y a la cantidad de agua tratada o más bien, a la cantidad de iones eliminados por unidad de volumen de material intercambiador, se le llama capacidad total.

En casi todas las aplicaciones de los intercambiadores no se les puede usar hasta llegar hasta ese punto, sino solamente se les emplea mientras dan un afluente o producto cuyas impurezas estén dentro de ciertos límites aceptables; por ejemplo en el caso del tratamiento de aguas, se usa solo mientras el agua que sale tiene un contenido cero de los iones que se estén eliminando. Al punto en que empieza a aparecer iones, de los que se están eliminando, en el afluente, se le da el nombre de “Punto de Desbordamiento” y la cantidad de iones eliminados por unidad de volumen de material intercambiador se le llama capacidad de desbordamiento.

Una vez que se agotado el material hasta su capacidad útil o de desbordamiento, es necesario efectuar una regeneración del material lo cual extremadamente sencillo en todos los casos y que consiste en lo siguiente:

Suspender la corriente de agua, lavar el lecho de material intercambiador, con agua a contracorriente, desechando esta agua, hacer pasar a través del lecho una cantidad fija de una solución de concentración, dada del reactivo que se usa como regenerante.

Enjuagar el material intercambiador para eliminar el exceso de regenerante y reanudar la corriente de agua tratada.

Todo este proceso se reduce simplemente a cerrar unas válvulas y abrir otras según las distintas fases de la regeneración

2.4.5 Desgasificación. Es la operación mediante la cual se le quita al agua los gases disueltos principalmente O₂ y CO₂. Este tratamiento debe aplicarse como una medida preventiva contra la corrosión, ya que estos gases son los principales agentes corrosivos.

Pueden seguirse varios procesos diferentes para efectuar la desgasificación, entre los cuales hay unos mecánicos, otros químicos y otros mixtos.

Los procesos mecánicos generalmente se efectúan por calentamiento del agua y aumento de la presión, combinados estos con una agitación efectiva se logra la separación de los gases del seno del líquido.

Los aparatos más efectivos operan mediante una corriente de vapor que atraviesa la masa líquida calentándola y agitándola a la vez de una manera efectiva.

También se efectúa a veces la desgasificación por simple aceleración del agua en aparatos donde circula en sentido contrario una corriente de aire. Por este sistema se pueden eliminar los gases que dan mal olor al agua y el CO₂ en una proporción considerable. Se usa poco para tratar aguas para calderas, debido a que no elimina el oxígeno que es tan perjudicial en este caso.

Los procedimientos químicos consisten en el uso de sustancias que fijen el oxígeno dando productos de oxidación que no sean perjudiciales. Los reactivos más usados como fijadores de oxígeno son el sulfito de sodio que se ha utilizado desde mucho años y el hidróxido ferroso que también se ha utilizado en gran parte, pero en menor proporción que el sulfito de sodio. El sulfito de sodio tiene la ventaja sobre el hidróxido ferroso que puede mantenerse dentro de la caldera

una cierta concentración preventiva para el caso de haber un aumento en la cantidad de oxígeno disuelto, mientras que el hidróxido reacciona con el agua produciendo trióxido de hierro (Fe_2O_3) que no tiene acción sobre el oxígeno disuelto en el agua.

El principio de funcionamiento de los desgasificadores se basa en el hecho que la solubilidad de los gases disueltos en el agua (O_2 y CO_2) disminuye cuando el agua está en el punto de ebullición ($100\text{ }^\circ\text{C}$ a presión atmosférica), tal como se ilustra en la gráfica 4.

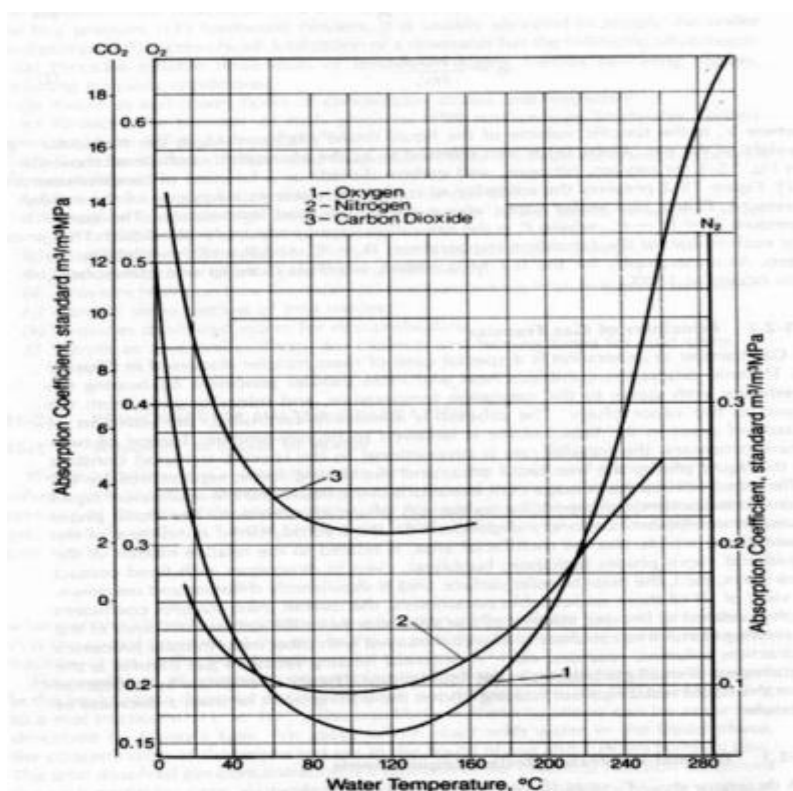


Figura 7. Desgasificación

Fuente: NALCO, (s,f)

La torre de los desgasificadores está compuesta por bandejas y/o boquillas en las que se aumenta la superficie del agua alimentada, formando cascadas o atomizándola para favorecer la liberación de los gases disueltos.

El agua que desciende por la torre es calentada hasta la temperatura de ebullición por vapor alimentado en contraflujo.

La cantidad de vapor alimentada a la base del desgasificador es controlada por una válvula reductora de presión, encargada de mantener la presión de ebullición del agua. También existe una válvula termostática que controla la cantidad de vapor alimentada al estanque de almacenamiento para mantener el agua a la temperatura de ebullición. Los gases descargados por el agua son eliminados a través del venteo existente en la parte superior de la torre.

La mayoría de las empresas son conscientes de la importancia de tratar el agua que va a ser usada en el proceso de generación de vapor. La empresa Termotasajero S.A dedicada a la generación de energía eléctrica a partir de vapor de agua, es un referente en el Norte de Santander en el tema de tratamiento de agua de caldera, debido a que cuentan con una planta de tratamiento dentro de sus instalaciones donde es suavizada el agua proveniente del río Zulia. (UPME, 2015).

La industria de Aceites Manuelita S.A en el año 2008 implementó una planta de desmineralización de agua industrial para utilizarla en las calderas de generación de vapor de alta presión para generar energía eléctrica, con una capacidad de 11.7 lps.

En el año 2006 la empresa Colceramica S.A ubicada en Bogotá D.C fabricó y puso en marcha un sistema de tratamiento de agua potable e industrial procedente de un pozo profundo, con una capacidad de 6lps.

En la ciudad de Bucaramanga una empresa dedicada a la producción de alimentos concentrados para animales (ITALCOL), invirtió en la fabricación de una unidad de filtración

por carbón activado manual y suavización automática para el agua proveniente del acueducto de la ciudad, esta planta fue diseñada con un caudal de 0.7lps. (Proton Ltda 2015).

Como se evidencia, es de preferencia en el sector industrial tener plantas de tratamiento de agua dentro de las instalaciones ya que se convierten en empresas autosuficientes y competitivas para no depender de servicios externos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar una planta de tratamiento de desmineralización del agua en la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda con el fin de minimizar la incrustación, oxidación y depósitos en la caldera, prolongando así la vida útil de la misma.

3.2 Objetivos Específicos

Realizar un diagnóstico técnico preliminar del estado actual de los diferentes sistemas de tratamiento de agua para uso industrial con el fin de escoger el más conveniente para el requerimiento de la caldera.

Evaluar el comportamiento del agua cruda por medio de la determinación las características físicas y químicas del agua subterránea que está siendo usada por la caldera en este momento, con el fin de definir los parámetros de diseño de los equipos y los productos químicos usados en la planta de tratamiento.

Establecer las operaciones unitarias requeridas (mezcla rápida, floculación, sedimentación, columna de intercambio iónico y desgasificación) en los procesos de tratamiento del agua.

Proponer un diseño de un sistema de tratamiento de desmineralización con base en los requerimientos y características del agua subterránea para suplir la necesidad del agua en la caldera y establecer los requerimientos de agua en la caldera en la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda.

3.3 Metodología Proyecto

Se realizó una investigación en la planta para obtener la información necesaria con el fin llevar a feliz término el proyecto de diseño. El diseño se basó en la toma de muestras del agua actualmente utilizada y su posterior análisis de laboratorio, una prueba de jarras con motivo de establecer parámetros de diseño, estudio de diferentes sistemas de tratamiento de agua, obtención de información de las condiciones de operación y requerimiento de la caldera y diseño de cada una de las operaciones unitarias implicadas en el proceso de desmineralización de agua, para cumplir con los objetivos propuestos y proponer una solución a la problemática de la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda.

Este es un proyecto de tipo intervención, con un tiempo de ejecución de 4 meses, llevado a cabo en los laboratorios de la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda y Universidad de Pamplona.

3.4 Recopilación de la información.

3.4.1 Fuente de información primaria. La fuente de información primaria fueron los datos obtenidos por las pruebas experimentales realizadas al agua del pozo 1 en las instalaciones en la planta y los resultados de jarras realizadas en el laboratorio de control y calidad de la universidad de pamplona.

3.4.2 Fuentes de información secundaria. Para la determinación del caudal de operación de la caldera fue entrevistado directamente el personal de operación de la caldera con el fin de conocer las condiciones a la que opera la caldera.

3.5 Calidad de la Fuente de Abastecimiento

Para evaluar la calidad de la fuente de agua a tratar, se realizaron estudios y análisis físico químicos en el laboratorio de control y calidad de la universidad de pamplona, en donde se evaluaron los siguientes parámetros al agua del pozo 1.

Tabla 7. Calidad de la fuente de abastecimiento

Parámetro	Método o equipo
Conductividad	HQ30d conductimetro
Ph	pHmetro HQ30d flexi
Dureza	Método volumetrico
Turbiedad	turbidimetro
Oxigeno Disuelto	HQ30d
Solidos Totales	Método convencional.

3.5.1 Caudal requerido por la caldera. Mediante información suministrada por el personal de operación de la caldera, donde la caldera trabaja a una presión de 90 psi y 80°C, se tomó como caudal necesario para la caldera 10 Galones por minuto.

3.5.2 Caudal requerido por la planta de tratamiento. De acuerdo a los parámetros establecido teóricamente, se tomó como caudal necesario 30 L/s para la parte primaria del tratamiento que incluye (adición de floculantes, floculación y sedimentación); y para la parte secundaria que incluye (columna de intercambio iónico y desgasificación) es necesario un caudal de 0,7 l/s.

3.5.3 Diseño de la planta de tratamiento. El diseño de las plantas de tratamiento se realizó en base a la información recolectada, teniendo en cuenta el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (Normas RAS 2000) se determinó los criterios y parámetros de

diseño para las unidades de tratamiento primario (adición de floculante, floculador y sedimentador). (Véase el Anexo 1)

3.5.4 Selección de parámetros óptimos del proceso (prueba de jarras). Se realizó un ensayo en los laboratorios de la empresa para determinar las características y eficiencias de los procesos de coagulación y floculación en término de la variación de la turbiedad, para establecer la dosis apropiada de coagulante. El procedimiento se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 [44]

Materiales y equipos

6 litros muestra de agua

Equipo de test de jarras

6 Beakers de 1000 mL

6 Beakers de 100mL

Colorímetro

Pipeta de 10 mL

Pera de succion

Coagulante

Elección de coagulante

Según experiencias anteriores, basándonos en los criterios de la norma RAS numeral C.2.2, y por cuestiones de facilidad de adquirir y precio en el mercado, se escogió el sulfato de aluminio tipo B, por no reportar efectos nocivos sobre la calidad física, química del agua tratada y

representar un efecto favorable sobre el tamaño del floculo y sobre la velocidad de asentamiento [44]

Descripción del ensayo

Se midió la turbiedad inicial de la muestra a analizar con un colorímetro Marca HQ30d

En 6 vasos de precipitado cada uno con un litro de agua a del pozo 1.

Se preparó una solución de 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 ppm

Se colocó en el equipo de test de jarras (laboratorio control y calidad Universidad de Pamplona) los 6 beakers, se agito a 100rpm durante 3 minutos (mezcla rápida) y luego una velocidad lenta de 40 rpm durante 20 minutos (floculación), dejándose sedimentar por 30 minutos (sedimentación). Se midió con el colorímetro la turbiedad final en cada una de las jarras poniendo en funcionamiento el equipo hasta la lectura sea estable.

Se tabulo los resultados obtenidos y se realizó un gráfico de turbiedad sedimentado contra la dosis de sulfato de aluminio tipo B.

De acuerdo a la gráfica y el análisis realizado se escogió la dosis de 20 ml/L valor correspondiente para el vaso N° 4, se escogió este vaso ya que los vasos 5 y 6 la formación de floc fue similar a la del 4.

3.6 Diseño de las Unidades de Tratamiento

Se realizó una revisión bibliográfica para proponer las unidades de tratamiento, de acuerdo a las características del agua del pozo, caudal de diseño de la planta y los resultados obtenidos en

la prueba de jarras. Los criterios de selección para cada unidad de la planta, así como los parámetros de diseño se muestran en los anexos 1 y 2.

3.7 Tanques

Se diseñaron 3 tanques: (1) tanque de almacenamiento de agua sin tratar, (1) tanque de agua de almacenamiento de agua tratada, (1) tanque de agua desmineralizada o tratada. Para esto se determinó el volumen necesario de agua a almacenar, se calculó el radio usando la ecuación de superficie [68] y se determinó la longitud del tanque y el volumen. Ver dimensionamiento en el anexo 9.

3.8 Canaleta Parshall

Esta etapa de tratamiento también conocida como coagulación-mezcla rápida.

Para esta unidad de tratamiento, se escogió la unidad hidráulica canaleta Parshall. Se utilizó la tabla de canaletas y se escogió un ancho de garganta y un ancho para la zona de resalto [46], tomando un caudal de diseño de 30 lps. Se asumió un resalto estable un resalto estable razón por la cual se fijó el número de Froude (F) en el punto 1 de la canaleta donde inicia el resalto. Con estos datos se calculó la altura de la lámina de agua y la velocidad media de la sección 1 que corresponde a la zona antes del resalto y la sección 2 que corresponde a la altura que se produce después del resalto. Se determinó la longitud y la velocidad media en el resalto, con el fin de determinar el tiempo de retención promedio en este punto que corresponde al sitio de aplicación del coagulante [47]. Se calculó la pérdida de energía en el resalto (Δh) y el gradiente promedio de velocidad en el resalto (G), este valor debe ser mayor a $1000s^{-1}$. Por último se estimó la

cantidad de coagulante necesitado para realizar la solución a dosificar [48]. El procedimiento de cálculo y el diseño en 3D se muestra en el anexo 3.

3.9 Floculación

Para la tercera unidad de tratamiento, se escogió: floculador hidráulico de flujo horizontal. De acuerdo a la prueba de jarras realizada, se determinó el tiempo en cada sección y este fue de 8 minutos para cada compartimiento; también se determinó el gradiente de velocidad de acuerdo a la Norma RAS 2000, los cuales fueron para la sección 1,2 y 3 de $70.86s^{-1}$, $51.41s^{-1}$, $42.611s^{-1}$, respectivamente.

Para cada sección del floculador, se calculó el número de camp, para constatar que el tiempo de retención y los gradientes para cada sección sea el adecuado y con esto disminuir la probabilidad de que ocurran oportunidad de choques de partículas en el equipo. Posteriormente, se calcularon longitudes de cada uno de los compartimentos, profundidad de flujo, ancho de la cámara, número de pantallas, distancia entre pantallas y la velocidad de flujo. El procedimiento para el dimensionamiento y diseño 3D, se muestra en el anexo 4.

3.10 Sedimentación

Para la cuarta unidad de tratamiento se seleccionó un sedimentador de flujo horizontal. Para su diseño como primer paso metodológico se realizó el cálculo de las dimensiones: largo ancho y altura de manera que se cumplieran los criterios de diseño, se evaluó la velocidad horizontal que se maneja en la unidad, con el fin de establecer el tiempo de retención del agua a tratar en la misma. Para el dimensionamiento de la zona de salida se asume una pendiente de fondo

propiciando el espacio adecuado para el asentamiento de los lodos, calculando nuevamente la altura total de la unidad [53]

La zona de entrada del agua a la unidad de sedimentación, debe ser realizada por un dispositivo hidráulico capaz de distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, disipar la energía que trae el agua. Para esto se diseñó una pantalla perforada en la cual se determinaron el número de orificios y los arreglos. El procedimiento de cálculo y el diseño 3D se muestra en el anexo 5.

3.11 Intercambio Ionico

Para el proceso de desmineralización de agua se seleccionó el proceso de intercambio iónico. Para el diseño de estos equipos, inicialmente se calculó el nuevo caudal máximo de agua para el tratamiento de desmineralización, correspondiente al 4 % del caudal del tratamiento primario.

Para el diseño de la columna de intercambio iónico, se seleccionó el fabricante del material, luego se calculó el volumen necesario de resina. Se realizó el dimensionamiento de las columnas, calculando: área, altura de lecho, velocidad de flujo y la relación de esbeltez (altura/diámetro) [64]. Se diseñó el proceso de regeneración, estableciendo el tiempo de mantenimiento, la cantidad de regenerante, cálculos para la dilución del regenerante, el tiempo de lavado y el volumen de agua necesario para realizar el lavado. El procedimiento y diseño 3D se muestra en el anexo 6.

3.12 Desgacificador

Para el proceso de eliminación de oxígeno y CO₂ se escogió un desgacificador térmico presurizado. Para el diseño de este equipo se plantearon los valores de la potencia de la caldera,

la presión de entrada del agua y del vapor, la presión total del contenedor así como las dimensiones del mismo.

Para este equipo se utilizó una válvula de venteo o también llamada fuga de gases (oxígeno y CO₂). Para poder diseñar a cabalidad este equipo solicitamos a los operarios el dato de los caballos caldera CC a los que funciona el generador de vapor, obteniendo como respuesta 150CC y con una producción de vapor de 15 Lb/h.

El tiempo de residencia o de almacenamiento dentro del tanque del gasificador fue de 10 minutos, según como lo sugiere la bibliografía. El diseño de este

4. Resultados y Análisis

4.1 Canaleta Parshall

En esta unidad se lleva a cabo el control de caudal que ingresa a la planta de tratamiento por medio de un medidor de flujo en este caso se utilizara un tubo ubicado en la parte externa del equipo, además de esto se realiza el proceso de mezcla rápida para propiciar la coagulación por medio de la adición de solución de sulfato de aluminio que será suministrada aprovechando el resalto hidráulico de la canaleta.

Esta estructura se construirá directamente sobre el terreno con el uso de bloques de concreto fundido con concreto reforzado para obtener mayor durabilidad. Está constituida por una sección de convergencia con paredes que se van cerrando en línea recta y con un piso nivelado, una garganta con un piso pendiente aguas abajo y una sección de divergencia con un piso pendiente aguas arriba originando el resalto el cual permite una mezcla rápida entre la solución de sulfato de aluminio y el agua a tratar. La dosificación de coagulante se llevara a cabo a través de una bomba dosificadora serie magno: accionamiento tipo solenoide, caudal 600 l/h, presión max 16 bares. El procedimiento de calculo se muestra en el anexo 8. El dimensionamiento de este equipo dio como resultado

Tabla 8. Dimensionamiento canaleta parshall

Ancho de garganta (W)	0,3048m
Ancho de canal (B)	1,3m
Longitud de resalto (Lj)	0,6m
Dosis de sulfato de aluminio	20 mg/l

4.2 Floculador de Flujo Horizontal

El floculador horizontal sera construido en concreto. El fondo de la unidad será construido con una pendiente igual a la perdida de carga, para que la altura del agua permanezca constante y, por lo tanto, el gradiente de velocidad en todo el tramo también.

Los tabiques o pantallas serán de bloque de concreto. El procedimiento de diseño de este equipo se muestra en el anexo 6.

Tabla 9. Dimensionamiento floculador hidráulico

Volumen	18,4 m ³
Profundidad	4,5 m
Largo	17 m
Ancho total	2,7 m
Ancho sección	0,3 m

Tabla 10. Características sectores floculador hidráulico

	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Distancia entre tabiques	0,3m	0,33m	0,144m
Tabiques	29	20	14
Velocidad de flujo	0,25 m/s	0,23m/s	0,21m/s
Longitud del tabique	10,1m	7,55m	5,69m
Perdida por giro	0,275m	0,1447m	0,1m

4.3 Sedimentador de Flujo Horizontal

En esta estructura se lleva a cabo el proceso de sedimentación en el cual se remueve la carga de sólidos suspendidos sedimentables que han sido producidos por el tratamiento químico mediante gravedad.

Para su construcción se utilizaran placas planas de concreto, apoyadas en perfiles de aluminio o en platina continua. El agua entra a cada modulo de sedimentación por medio de una tubería de PVC, ingresando a las pantallas perforadas capaces de distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección trasversal, disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme, de igual intensidad y dirección. En el fondo de los módulos existe una tubería de PVC con orificios en forma múltiple, para recolectar los lodos sedimentados y sacarlos hacia un canal de desechos que va a los digestores. El procedimiento de cálculo se muestra en el anexo 7. el diseño de este equipo dio como resultado las siguientes características:

Tabla 11. Dimensionamiento sedimentador de flujo horizontal

Ancho	
Longitud	5m
Profundidad	1,7 m
Volumen de lodos	2,17m ³
Profundidad de lodos	0,2m

4.4 Columna de Intercambio Ionico

En estas columnas es donde se desarrollara el proceso de intercambio iónico, existe una columna para el intercambio iónico. La columna esta rellena de resina cationica.

El material a emplear será acero inoxidable 316, ya que su alta resistencia a la corrosión nos permite utilizar regenerantes de la resina con corrosividad alta. Se usara acero y no plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) ya que el acero es más fácil y económico de moldear. El

depósito estará dispuesto de forma vertical, con carcasa cilíndrica y fondo toriesferico de tipo Korbboogen. Esta columna tendrá los siguientes elementos:

Platos para soportar adecuadamente el peso del lecho de resina, el tamaño de la malla debe ser tal que no debe dejar pasar ningún tipo de resina.

Sistema de distribución de caudal de alimentación de agua en la operación normal (parte superior).

El procedimiento de cálculo se muestra en el anexo 9. El dimensionamiento de estos equipos dio como resultado:

Tabla 12. Dimensiones columna de intercambio ionico

Diámetro de la columna	0,97m
Área de paso de la columna	0,80m ²
Altura de lecho	0,91m
Altura de lecho expandido	0,97m
Volumen de resina	0,67 m ³
Velocidad lineal del liquido	
Relación Altura/Diametro (esbeltez)	
P columna (kg)	1000kg

4.5 Desgacificador

En este equipo se llevara parte importante del tratamiento de agua para la caldera, ya que es aquí donde se pretende disminuir de 4,46ppm de oxígeno a 0,007ppm, el tipo de contacto que se va a generar es en contracorriente entrando una corriente de agua proveniente de la operación anterior (intercambio iónico) donde por medio de una electrobomba de 1 hp lleva el agua hasta el cabezal de la columna del desgacificador con una presión de 1,2bar, por otro lado entrara una

corriente de vapor venido del retorno de la línea de proceso a 1,1 bar por encima de la presión atmosférica. Las aspersión del agua se hará por medio sistema SPRAY.

El material para diseñar este equipo es acero inoxidable 360, estará dispuesto en forma horizontal. El procedimiento se encuentra en el anexo Z.

Tabla 13. Dimensionamiento del desgacificador

Diámetro de el cilindro	m
Longitud de la columna	m
Presión de operación de la columna	1,2 bar
Peso de la columna	2000kg

4.6 Tanques

4.6.1 Tanque de almacenamiento de agua sin tratar. Este depósito se diseñó para que fuese construido en concreto reforzado con hierro, este tanque tendrá un techo en laminas de cinc que protejera al agua de las aves.

Las columnas que lo sostendrán deben tener refuerzos ya que el peso del tanque lleno es considerable.

4.6.2 Tanque de almacenamiento de la solución de sulfato de aluminio tipo B. En este depósito se almacenara la solución de sulfato de aluminio tipo B, la cual será utilizada para el proceso de coagulación en la unidad de mezlca rápida canaleta parshall. Este tanque estará fabricado en PVRF.

4.6.3 Tanque de agua clarificada. En este deposito se almacenara el agua, que ha sido tratada desde la captación hasta la sedimentación, desde aquí se abastecerá agua hacia el proceso de desmineralizcion y cualquier proceso de la empresa que requiera limpieza, riego de plántulas,

y mano de obra. El material de este tanque será concreto fundido y será subterráneo con el fin de ahorrar espacio.

4.6.4 Tanque de agua tratada para la caldera. En este depósito se almacenará agua, que ha sido tratada en la instalación de intercambio iónico y descalcificación; abastecerá agua a la caldera. Además, de este depósito se tomará agua para diluir el químico regenerante de la resina. El material a emplear será hacer al carbón A-285.

4.6.5 Tanque de regenerantes. En estos depósitos se almacenará los compuestos regenerantes para cada uno de las resinas de intercambio. El proceso de dilución se hará manualmente mediante unas tolvas dosificadoras. El material a emplear en estos depósitos regenerantes será fibra de vidrio (PRFV). Los depósitos estarán dispuestos en forma vertical y de fondos planos. El procedimiento de cálculo, para estos equipos se muestra en el anexo **L**. el dimensionamiento de estos equipos dio como resultado:

Tabla 14. Procedimiento de cálculo

Tanque	P(m ³)	R(m)	D(m)	L(m)
Tanque agua sin tratar	80			
alúmina	1	0,5	1	1,27
Agua clarificada	80			
Agua tratada	40			
Tanque regenerantes	1	0,5	1	1,27

4.6 Tuberías

La planta cuenta con 8 líneas de tuberías las cuales permiten el transporte del agua desde la entrada al sistema de mezcla rápida hasta el depósito final de agua, permiten también la dosificación de reactivos y regenerantes.

Se utilizarán tuberías de PVC (Policloruro de Vinilo) y acero galvanizado, se seleccionan estos dos materiales debido a su resistencia a la corrosión y fácil manejo, además por su costo y fácil adquisición. En los distintos sistemas de tuberías estarán instaladas válvulas que regulen el paso del fluido por las mismas, las válvulas de bola se utilizarán para controlar el flujo de lodos y fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión ya que en posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente tamaño al 75% del tamaño de la tubería de manera que no permite que se obstruya el flujo transversal. Se utilizarán válvulas de diafragma en la dosificación del coagulante ya que presentan una alta resistencia a la acción de soluciones químicas y a los sólidos suspendidos, a la vez que se pueden colocar en cualquier posición y en lugares donde se presenten altas vibraciones, y las válvulas de compuerta de compuertas que serán utilizadas en las otras líneas de tuberías por su alta capacidad, diseño y funcionamiento sencillo. El dimensionamiento de las líneas de tubería se especifica en el anexo 8:

Tabla 15. Línea de la tuberías

	Línea	fluido
Extracción de agua pozo al tanque	1	Agua sin tratar
Tanque – canaleta parshall	2	Agua sin tratar
Canaleta parshall – floculador	3	Agua con alumbre
Floculador sedimentador	4	Agua con floc
Sedimentador – tanque 2	5	Agua clarificada
Tanque 2 – columna de intercambio ionico	6	Agua clarificada
Torre de intercambio ionico - desgacificador	7	Agua desmineralizada
Desgacificador – tanque 3	8	Agua tratada

4.7 Bombas

Para el suministro de agua y solución de reactivos a las diferentes unidades de tratamiento se utilizarán 4 bombas centrifugas, todas estas bombas estarán duplicadas por razones de seguridad

y mantenimiento, 1 de ellas es la encargada de succionar el agua del pozo a una profundidad de 8 metros y subirla al tanque de almacenamiento, para impulsar el agua hacia la cabeza de la torre de intercambio iónico desde el tanque de almacenamiento de agua clarificada se necesita una más, la tercera bomba se encargara de suministrar agua al desgacificador, por último la cuarta bomba será la encargada de llevar el agua del desgacificador hasta el tanque de almacenamiento final.

Tabla 16. Características de las bombas

Bomba	Potencia (hp)
P-101	6,5
P-102	2
P-103	2
P-104	2

5. Conclusiones

El diseño del sistema de tratamiento de agua en la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda. (sector astilleros), se elaboró a través de un estudio realizado a los diferentes sistemas de tratamiento de agua potable e industrial, con base a la normatividad y conceptos presentados por los diferentes reglamentos.

Teniendo en cuenta las características del agua del pozo subterráneo #1, siguiendo parámetros y recomendaciones sugeridas, y de acuerdo a las necesidades de la empresa Cooperativa Palmas de Risaralda Ltda. Desde el punto de vista productivo, económico y social, se diseñó un sistema que consta de dos etapas: tratamiento convencional y desmineralización del agua. El sistema convencional está conformado por una mezcla rápida hidráulica, un floculador hidráulico de flujo horizontal, un sedimentador de flujo horizontal, columna de intercambio iónico y por último un sistema de desaireación. Con estos sistemas de tratamiento, se desea obtener agua que se ajuste a las normas de calidad estipuladas para su uso y satisfaga los requerimientos de la caldera que opera en la empresa.

Con la implementación de esta planta, en la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda se disminuirá los gastos de energía en la caldera, así como también los riesgos de algún accidente en la planta de producción.

Además esto hará que la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda se ponga a la vanguardia en temas de tratamiento de agua para uso en calderas de vapor.

6. Importancia del Estudio

Este proyecto aporta a la solución de las necesidades de la industria norte santandereana específicamente la empresa Cooperativa Palmas Risaralda Ltda, además que ayuda al fortalecimiento de la línea tratamiento de aguas, lo que abre un camino para desarrollar proyectos similares en otras industrias y fortalecer las relaciones del programa de ingeniería química y la zona industrial de Norte de Santander.

7. Recomendaciones y Limitaciones

Con el fin de garantizar un proceso más eficiente en el cual se obtenga agua en mejores condiciones para su uso en la generación de vapor, se hacen las siguientes recomendaciones para modificaciones futuras:

Intercambio iónico: instalación de otra columna de intercambio ionico, para garantizar total operación de desmineralización y en el caso tal de que falle, se ponga en funcionamiento la que se encuentra en Stand By y no se afecte el proceso.

La comparación de este proyecto con estudios previos de implementación de sistemas de tratamientos de aguas en empresas del sector industrial de norte de Santander fue limitada pues por razones de privacidad de las empresas, no se obtuvo información alguna del consumo de agua por lo que tampoco fue posible conocer el caudal de dimensionamiento y la calidad final del agua que tuvieron las empresas del sector con la implementación de tratamientos de agua.

Bibliografía

Arboleda, J. (1981). Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua. España: CEPIS.

Arboleda, J. (1981). Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Madrid: España, CEPIS

Beron, F. (2004). Uso de cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio en el río cauca como coagulante primario. Santiago de Cali. Seminario Internacional: Actualización y nuevas tendencias en potabilización de agua. ACODAL.

Canepa L, (2015). Guía para el diseño de desareneadores y sedimentadotes. Recuperado de: <http://www.bvsde.opsoms.org/tecapro/documentos/agua/158esp-diseno-desare.pdf>

Carrillon, A. (2007). Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. España: Universidad de Cádiz.

CEPIS. (1992). Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Manual V: Diseño. Tomo 1. Criterios de diseño para la dosificación y mezcla rápida. Lima: CEPIS

Denton, M.; Ahrendt, M. & Wilson, J. 2007 IRWE NUKEM Corporation, 3800 Fernandina Road, Columbia, SC 29210.

Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES). (2015). Decenio internacional para la acción: el agua fuente de vida, 2005-2012. Recuperado de: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>.

Germain., L. & Rouquet.J. (1982). Tratamiento de aguas. Barcelona: España, Omega, S.A

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2011). Norma Técnica Colombiana 3903, gestión Ambiental. Procedimiento para el método de jarras en la coagulación-floculación del agua. Bogota: ICONTEC.

Kemmer, F & Mc Callion, J. (1989). Manual del agua, tratamiento y aplicaciones. México: Mac Graw Hill

Kohan.,A. (2000). Manual de Calderas., tomo II. Madrid, España: Mac Graw Hill

Ludwing E, (s,f). Applied Process Desing for Chemical and petrochemical plants.

Ministerio de Desarrollo y Vivienda. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.7.5.1.1. bogota: El Ministerio.

Montejo, E. (1989). Nuevos conceptos en los procesos de coagulación-floculación de agua cruda. Puerto la Cruz: Universidad de Oriente

Pérez P. (1997). Tratamiento de aguas. Universidad Nacional. Facultad de minas. Medellín, Colombia

Pérez, J. (1997). Manual de potabilización del agua. Medellín: Universidad Nacional de Colombia

Proton Ltda. (2015). Experiencias en diseño, fabricación y puesta en marcha en operaciones de plantas de tratamiento de aguas. Industrias. Recuperado de: <http://www.proton-colombia.com/es/images/ptap.pdf>

Rodier, J. (1998). Análisis de las agua naturales, aguas residuales, agua de mar. Barcelona: Ediciones Omega.

Romero, J. (1997). Calidad del agua. Escuela Colombiana de ingeniería. Santafé de Bogotá, Colombia

Romero, J. (2000). Purificación del agua. Medellín: Escuela Colombiana de Ingeniería.

UNAM. (2015). Metodología de la investigación. Recuperado de: http://profesores.fi-b.unam.mx/jlfl/Seminario_IEE/Metodologia_de_la_Inv.pdf

UPME. (2015). Guía ambiental proyectos carboeléctricos, fases de los proyectos carboeléctricos. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/plantas/contenid/analisis.htm#GUÍA AMBIENTAL PROYECTOS CARBOELÉCTRICOS.

Vargas, L. (2015). Diseño de mezcladores Hidraulicos Cap II. Recuperado de: <http://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/111/pdf>

Anexos

Anexo 1. Criterios de selección de equipos

1. Canaleta parshall: las unidades de resalto hidráulico son adecuadas para todo tipo de aguas desde caudales de 1-5366 lps pero generalmente se utilizan plantas con caudales pequeños menores a 50 lps. La mezcla rápida se produce gracias a la generacin de un resalto hidráulico que causa un gradiente de velocidad de alrededor de 1 segundo. Estas unidades tienen la ventaja que involucran la medición del caudal de ingreso a la planta.
2. Floculador horizontal: consiste en un tanque de concreto dividido por tabiques, baffles o pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuestos en tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. Este tipo de floculador, es recomendable para caudales menores a 50 lps, usando pantallas de cemento.

Se escoge la unidad de tipo flujo horizontal porque presenta las siguientes ventajas:

- De acuerdo a evaluaciones realizadas en plantas de america latina, los cortos circuitos y espacios muertos que se producen son minimos, de tal modo que el tiempo de retención teorico es similar al tiempo real obtenido en la unidad.
 - Carece de elementos móviles o mecánicos, de tal modo que la operación y el mantenimiento son muy simple y poco costosos, se reducen básicamente a limpieza y pintura.
 - Garantizan funcionamiento continuo y economizan energía eléctrica.
3. Sedimentadores Horizontales: se utilizan en plantas pequeñas donde se manejan caudales menores a 50 lps, su ventaja es económica pues requieren costos bajos en construcción y mantenimiento. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros. Estan provistos de canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada. El fondo es inclinado hacia el centro de la unidad, donde se ubica su sumidero para la recolección de lodos.

Esta constituido por cuatro zonas, la zona de entrada que es estructura de transición, que permite una distribución uniforme del flujo del sedimentador. La zona de sedimentación la cual consta de un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas, aquí la dirección de flujo es horizontal y a velocidad es la misma en todos los puntos. La zona de salida constituida por un vertedero que tiene la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas sediemntadas y la zona de recolección de lodos que esta constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, una tubería y una valvula para su evacuación periódica.

Intercambiador ionico: la elección del sistema de desmineralización se baso en las características del agua de entrada y la calidad del efluente de salida que se quiere obtener. Se escogio el proceso de intercambio ionico por las siguientes razones:

- Los procesos de desmineralización industrial en la actualidad se basan en esta tecnología, usando resinas de intercambio ionico se pueden eliminar casi el 100% de los iones contenidos en el agua. presentando como desventaja que la descarga de los químicos usados en la regeneración de las resinas deben ser tratados antes de vertirlos.

- Método de destilación presenta un elevado consumo de energía y no elimina totalmente los elementos que contiene el agua.
- Método de ósmosis inversa requiere para su desarrollo altas presiones en el proceso y presenta costos de energía altos. Además, no es un proceso de desmineralización ya que no elimina totalmente las sales contenidas en el agua.

Para la regeneración de la resina, se selecciono sistema en contracorriente por las siguientes razones:

- Alta eficiencia química
- Menor consumo regenerantes frente a otros procesos de regeneración
- Excelente calidad de agua de salida
- Disminuye la fuga iónica, pues el proceso de intercambio iónico es cada vez mejor regeneradas.
- Tiempo de regeneración menores
- Menor volumen de regenerante
- Instalación y control simple

Anexo 2. Parámetros de diseño de equipos

Los siguientes criterios son establecidos por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico

1. Canaleta parshall

Para el diseño del mezclador hidráulico canaleta parshall se tuvieron en cuenta según la RAS 2000 los siguientes criterios de diseño:

- La velocidad mínima en la garganta debe ser mayor de 2 m/s
- La velocidad mínima de efluente debe ser menor de 0,75 m/s
- El resalto no debe ser oscilante; es decir que el número de Froude (Fr) no debe estar entre 2.5 y 4.5.
- El número de Froude debe estar entre 1.7 y 2.5 o entre 4.5 y 9.0. para garantizar un resalto estable y una turbulencia adecuada para la mezcla rápida.
- H_a/w debe estar entre 0.4 y 0.8. Donde H_a es la altura del agua y w es el ancho de la canaleta.
- El tiempo de retención debe ser menor que 1 segundo.
- La aplicación de la solución de coagulante debe realizarse en el punto de mayor turbulencia.

2. Floculador hidráulico

Para el diseño de un floculador horizontal se debe tener en cuenta según la RAS 2000 los siguientes criterios de diseño:

- Debe realizarse en el laboratorio la prueba de jarras, la cual determina las condiciones adecuadas con la que debe operar el floculador.
- La agitación no debe ser ni muy lenta que favorezca la sedimentación, ni muy rápida que provoque el rompimiento de los floculos ya formados.
- El tiempo y el gradiente óptimo deben ser los obtenidos en la prueba de jarras.
- El gradiente medio de velocidad debe estar entre 20 s⁻¹ y 80 s⁻¹ y el tiempo de retención entre 20 y 30 minutos
- La longitud del floculador, se escoge generalmente entre 6 y 18 metros
- La profundidad del floculador se escoge generalmente entre 0,5 a 1,5 metros
- El floculador debe diseñarse de manera que la velocidad del agua a través del tanque este entre 0.07 m/s a 0.7 m/s.

3. Sedimentador horizontal

Para el caso del sedimentador horizontal se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de diseño según las RAS 2000

- Periodo de operación 24h/día
- Tiempo de retención máximo 2-4 horas
- Carga superficial debe estar entre 15-60 m³/m²/día
- Carga superficial baja 15-30 m³/m²/día
- Carga superficial alta 35-60 m³/m²/día
- La velocidad horizontal máxima del flujo de agua debe ser 1 cm/s
- Relación largo/ancho (L/B) = 3-6
- Relación largo/profundidad (L/H) = 5-20
- El fondo debe tener una pendiente mayor a 2% para facilitar el desplazamiento del sedimento
- La descarga de los lodos se debe ubicar en el primer tercio de la unidad, pues el 80% del volumen de los lodos se deposita en esa zona.
- Se debe guardar la relación de los vertederos de flujo.

$$L/H = V_h/V_s$$

- La compuerta de evacuación de lodos A2 debe mantener la relación

$$A2 = (A_s \cdot \sqrt{H}) / 4870t$$

- Los orificios mas altos de la pared difusora deben estar a 1/5 o 1/6 de la altura a partir de la superficie del agua y los mas bajos entre 1/4 o 1/5 de la altura a partir de la superficie de fondo
- La velocidad en los orificios se debe asumir menor de 0,15 m/s para no crear perturbaciones.

Anexo 3. Dimensionamiento Canaleta Parshall

1. Se hizo necesario usar la tabla de canaletas con el fin de escoger el ancho de la garganta (W). este ancho debe escogerse para el caudal de diseño que se encuentre entre el Qmin y el Qmax en esta tabla.

Tabla.

Dimensionamiento de la Canaleta Parshall en cm																	Q(m ³) Ha (m)	
caudal (l/s)	w	A	B	C	D	E	F	G	K	N	R	M	P	X	Y	a	b	aH
1 0,3-5	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9			50	0,8	1,3	0,055	1,5	0,055Ha ^{1,5}
2 0,6-13	5,1	41,4	40,6	13,5	21,4	35,6	11,4	25,4	2,2	4,3			70	1,6	2,5	0,11	1,5	0,1Ha ^{1,5}
3 0,8-55	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	40,6	30,5	76,8	2,5	3,8	0,176	1,547	0,176Ha ^{1,547}
4 1,5-110	15,2	62,1	61	39,4	40,3	45,7	30,5	61	7,6	11,4	40,6	30,5	90,2	5,1	7,6	0,381	1,58	0,38Ha ^{1,58}
5 2,5-250	22,9	88	86,4	38	57,5	61	30,5	45,7	7,6	11,4	40,6	30,5	108	5,1	7,6	0,535	1,53	0,535Ha ^{1,53}
6 3,1-455	30,5	137,2	134,4	61	84,5	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	149	5,1	7,6	0,69	1,522	0,69Ha ^{1,522}
7 4,3-700	45,7	144,9	142	76,2	102,6	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	168	5,1	7,6	1,054	1,538	1,054Ha ^{1,538}
8 12-950	61	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	185	5,1	7,6	1,426	1,55	1,426Ha ^{1,55}
9 17-1400	91,5	167,7	164,5	122	157,2	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	222	5,1	7,6	2,182	1,566	2,182Ha ^{1,566}
10 37-1900	122	183	179,5	152,5	193,8	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	271	5,1	7,6	2,935	1,578	2,935Ha ^{1,578}
11 60-2400	152,5	198,3	194,1	183	230,3	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	308	5,1	7,6	3,728	1,587	3,728Ha ^{1,587}
12 70-2900	182,5	213,5	209	213,5	266,7	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	344	5,1	7,6	4,515	1,595	4,515Ha ^{1,595}
13 115-3450	213,5	228,8	224	244	303	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	381	5,1	7,6	5,306	1,601	5,036Ha ^{1,601}
14 130-3950	244	244	239,2	274,5	340	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	417	30,5	22,9	6,101	1,606	6,101Ha ^{1,606}
15 250-5660	305	274,5	427	366	475,9	112	91,5	183	15,3	34,3						7,463	1,6	0,055Ha ^{1,19}

Fuente: serie autodínamica de medición, tecnología hidráulica, Pedroza E.

Para el caudal de diseño de 30 L/s, se escogió un W= 30,48cm

2. Se escogieron los parámetros N y K de la tabla y se calculó la altura del agua

$$Q = K * Ha^N$$

Ha = lámina de agua

Q = caudal m³/s

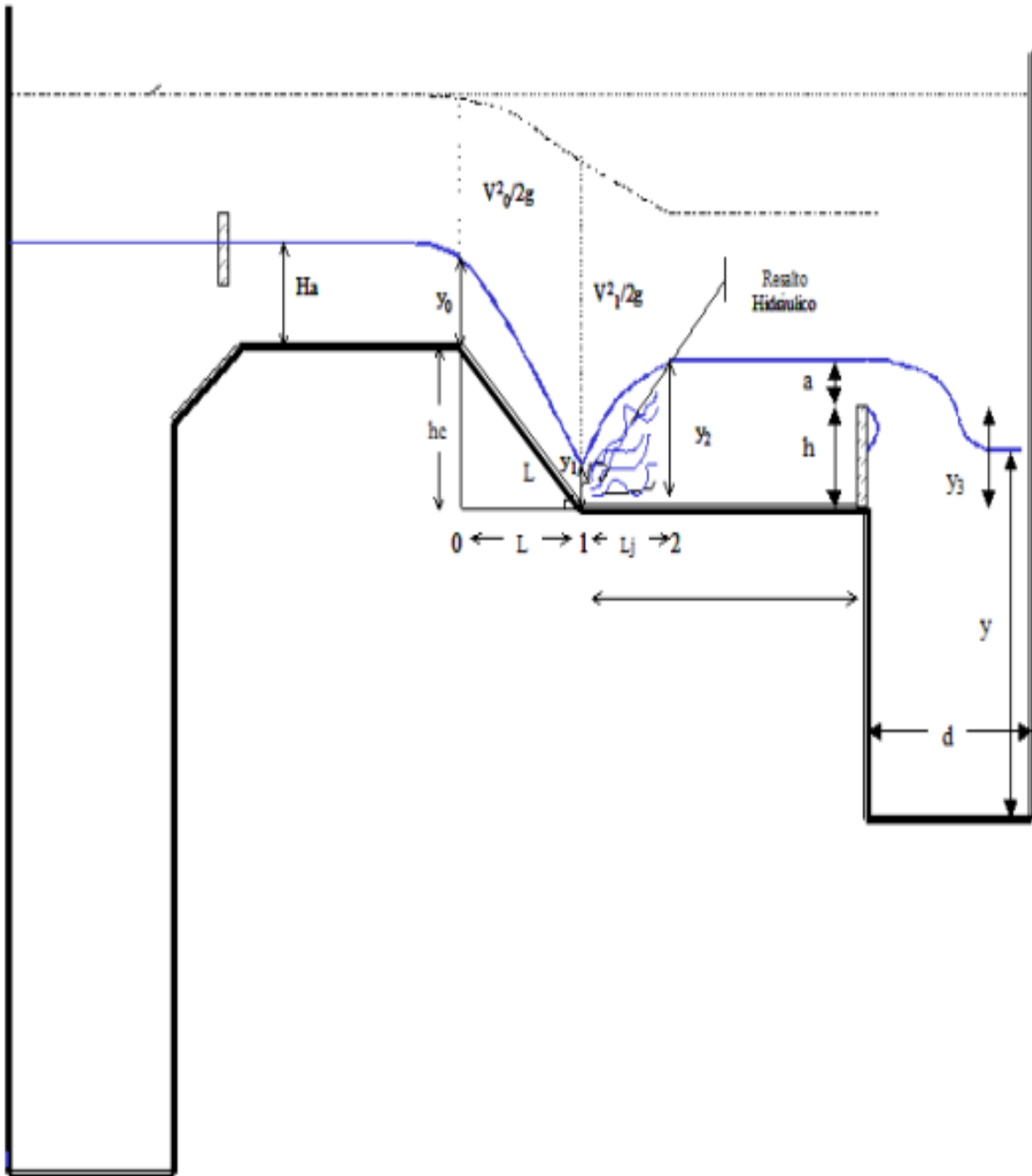
Ha=0,1274m

3. Se determinó el ancho del canal de la zona de resalto utilizando la tabla

B= 1,3 m

4. Se fijó el número de Froude (F) en el punto 1 de la canaleta donde inicia el resalto este es el punto donde se disifícara la solución de coagulante (figura), para resaltos estables este número debe estar entre 4.5 y 9. Por experiencia, para unidades de caudal similar a este proyecto, se tomó el número de Froude como:

F=9



Fuente: serie Automatica de Medicion, Tecnologia hidráulica, Pedroza E.

5. Se calculó la altura de la lámina de agua en la sección 1.

$$y_1 = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{F^2 * g * B^2}}$$

$$y_1 = 0,008\text{m}$$

6. Se determinó la velocidad media en la sección 1.

$$v_1 = \frac{Q}{B * y_1}$$

$$v_1 = 2,88 \text{ m/s}$$

7. Se calculo la altura de la lamina de agua en la sección 2, esta corresponde a la altura que se produce después de resalto.

$$y_2 = -\frac{y_1^2}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{g} + \frac{2 * y_1 * v_1^2}{g}}$$

$$y_2 = 0,11 \text{ m}$$

8. Se calculo la velocidad media en la sección 2.

$$v_2 = \frac{Q}{B * y_2}$$

$$v_2 = Q / (B y_2)$$

$$v_2 = 0,2097 \text{ m/s}$$

9. Se determino la longitud del resalto (L_j)

$$L_j = 6 (y_2 - y_1)$$

$$L_j = 0,6 \text{ m}$$

10. Se calculo la velocidad media en el resalto

$$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$v_m = 1,54 \text{ m/s}$$

11. Se calculo el tiempo de retención promedio de duración en el resalto, este debe ser menor a 1 segundo.

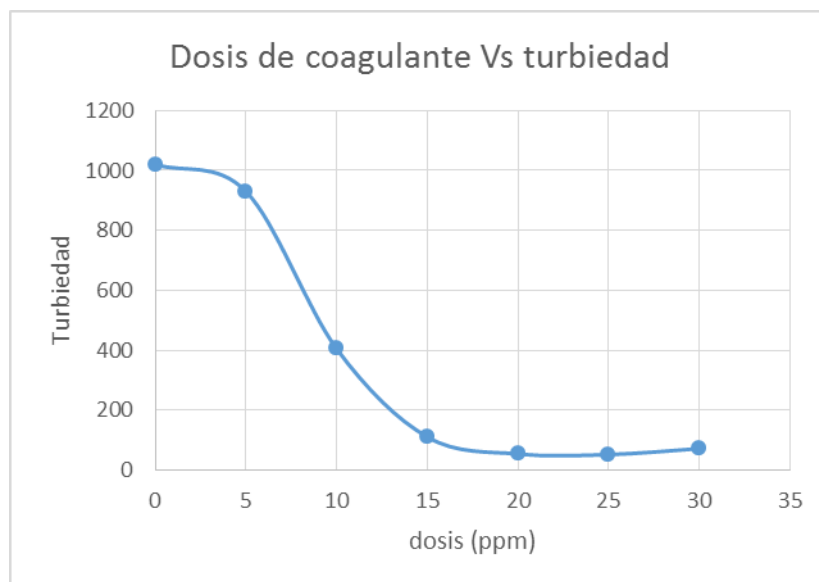
$$t = \frac{L_j}{v_m}$$

$$t = 0,39 \text{ s}$$



DOSIFICACION DE COAGULANTE

12. Se grafico la dosis de coagulante probadas Vs turbiedad



dosis ppm	Turbiedad
0	1020
5	930
10	405
15	111
20	54
25	52
30	72

13. Se calculó la cantidad de sulfato de aluminio a utilizar a partir de la siguiente expresión teniendo en cuenta que según los resultados de la prueba de jarras la dosis optima de coagulante es 20 mg/L

$$q = QD$$

$$q = 600 \text{ mg/s}$$

$$q = 36 \text{ kg/min}$$

14. Se calculo el caudal de solucion de coagulante que se dosificara en el resalto de la canaelta Parshall.

$$Q_{\text{solucion coagulante}} = \frac{QD}{C}$$

$$C = 40 \text{ mg/ml}$$

$$Q_{\text{solucion de coagulante}} = 15 \text{ L/min}$$

Anexo 4. Floculador hidráulico de flujo horizontal

Floculador de flujo horizontal

- De acuerdo a la prueba de jarras, se determinó el tiempo en cada sección y de acuerdo a la norma RAS el gradiente de velocidad

Tabla. Parámetros diseño floculador

Sección	Tiempo (min)	Gradiente (s^{-1})
1	8	70,86
2	8	51,41
3	8	42,611

Fuente: pruebas de jarras- autor

- Se calculó el numero adimensional de Camp, para constatar que el tiempo de retención y los gradientes para cada sección sea el adecuado:

$$C = \left[\frac{G1 + G2 + G3}{3} \right] * T$$

$$G=79000$$

Se encuentra dentro del intervalo de validez: $C=(50000-100000)$

- Para cada uno de los compartimientos calculamos espacio entre tabiques, velocidad de flujo y perdidas por canales y giro.

compartimiento 1.

Los rangos de velocidades esta entre $0,20 \text{ m/s} < v_i < 0,60 \text{ m/s}$

Por lo tanto asumimos una velocidad de $v_i = 0,25 \text{ m/s}$.

$e: 0,05 \text{ m}$ es el espesor de los tabiques.

Espacio entre tabiques

$$S = \frac{Q}{v1}$$

Donde:

S: distancia entre tabiques

Q: caudal en m^3/s .

$v1$: velocidad en el compartimiento 1.

$$S= 0,3 \text{ m}$$

Perdidas por canales de giro

$$\Delta h = \frac{G^2 * \mu * TopML}{g}$$

Donde:

G: gradiente de velocidad s⁻¹

μ= viscosidad del agua

TopML: tiempo optimo de mezcla lenta (s)

G: gravedad m/s.

$$\Delta h = 0,275 \text{ m}$$

Numero de compartimientos

Para determinar el numero de compartimientos en la sección se realizo mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta h_1 = [((v_1 * \Pi_1) / ((RH^2) / 3)) * B_c * N_c] + [k_{giro} * (v_1^2) / (2g)] * (N_c - 1)$$

Donde:

Δh₁: pérdidas por canales y giro (m)

v₁: velocidad en la sección 1 (m/s)

Π₁: valor Manning material

RH: radio hidráulico zona mojada.

B_c: ancho del compartimiento (m)

N_c: número de compartimientos (valor a determinar)

K_{giro}: valor de literatura, giros horizontales, aproximado 3.

g: gravedad (m/s)

Mediante iteración obtenemos N_c= 29 que son el numero de canales del compartimiento.

Longitud del compartimiento 1.

$$L_{c1} = [N_c - S] + (N_c - 1) * e$$

$$L_{c1} = 10,1 \text{ m}$$

Compartimiento 2.

Se calcularon los mismos parámetros con las mismas ecuaciones.

Estos son los resultados

Velocidad del fluido

v_2 : 0,23 m/s

Espacio entre tabiques

$S = 0,33\text{m}$

Perdidas por canales de giro

$\Delta h_2 = 0,1447\text{ m}$

Numero de compartimientos

$N_c = 20$

Longitud de la sección

$L_{c2} = 7,55\text{m}$

Compartimiento 3.

Se calcularon los mismos parámetros con las mismas ecuaciones.

Estos son los resultados

Velocidad del fluido

v_2 : 0,21 m/s

Espacio entre tabiques

$S = 0,33\text{m}$

Perdidas por canales de giro

$\Delta h_3 = 0,099\text{ m}$

Numero de compartimientos

$N_c = 14$

Longitud de la sección

$L_{c2} = 5,69\text{ m}$

profundidad	0,4 m
Largo	17,56 m
Ancho	2,70 m

	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Distancia entre tabiques	0,3 m	0,33m	0,36m
Tabiques	29	20	14
Longitud	10,1 m	7,55 m	5,69 m
Perdida por giro	0,275 m	0,1447 m	0,099 m



Anexo 5. Sedimentador

1. Para diseñar esta unidad empezamos suponiendo que estamos trabajando con placas planas por lo tanto el coeficiente de las mismas es $s=1$.
2. El largo de las placas será de 1,2 m, y de acuerdo a los criterios de diseño se puede plantear un ancho de sedimentador según lo requiera el espacio, por ello escogimos 2,4 m.
3. El espacio entre las placas planas será de 0,005 metros ya que es una distancia lógica, lo mismo que la inclinación la tomaremos de 60° .
4. De acuerdo con la prueba de jarras realizada en el laboratorio de la universidad de pamplona, se determinaron los tiempos de sedimentación para esto tomamos la velocidad de sedimentación como $40 \text{ m}^3/\text{m}^2$
5. La viscosidad del agua la asumimos y captamos de la literatura, lo mismo que el espesor de la placa que en este caso será de 0,006m

6. Calculamos el área de la placa

$$A_o = 0,12 \text{ m}^2$$

7. Luego calculamos el caudal de cada ducto, asumiendo una velocidad entre placas de 0,3 cm/s

$$Q_o = v_o * A_o$$

Donde:

Q_o = caudal en cada ducto m^3/s

v_o = velocidad entre placa m/s

A_o = área de la placa m

$$Q_o = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

8. Seguidamente calculamos el número de ductos

$$N_d = (Q / Q_o)$$

$$N_d = 67,26$$

9. Calculamos la longitud útil del sedimentador

$$L = \frac{e p * N_d + e * N_d}{\text{sen}60^\circ}$$

$$L = 4,35 \text{ m}$$

10. Para el diseño del canal de entrada se asumió una pendiente del fondo del sedimentador de 0,002m/s esto equivale a una pendiente de 4%, el material que se utilizara será concreto por lo tanto utilizamos la rugosidad de este que es 0,013. También se asumió una relación $B_c=2H$.

$$Q = \frac{A}{\eta} * RH^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

A: área m²

η : Rugosidad concreto.

R: Radio hidráulico m.

s : Pendiente asumida%.

Despejando la H, que es la altura del canal de entrada, iterando obtenemos:

H= 0,15m

11. Hallamos el volumen útil del sedimentador.

$$V_{\text{util}} = L * B * Hl$$

Donde:

Vutil= volumen útil de todo el sedimentador m³

L=longitud total del sedimentador m.

B= ancho del sedimentador m.

Hl= profundidad del sedimentador m.

Vutil= 10,85 m³

12. Volumen de lodos, para esto tomamos por literatura que es el 20% de todo el volumen útil del sedimentador.

$$V_{\text{lodos}} = V_{\text{util}} * 0,2$$

Vlodos= 2,17 m³

13. Calculamos lamina de lodos.

$$Hl = l * \text{sen} \square$$

Donde:

Hl= profundidad del sedimentador m.

l = largo de las placas m.

□= grado de inclinación de las placas.

Hl= 1,04 m.

14.

15. Valvula de purga de los lodos, aquí asumimos un tiempo de vaciado (t_v) de 40 minutos.
Diámetro (m) = 0,1 m = 4 pulgadas.



Anexo 6. Intercambio ionico

Características del agua de entrada

Las condiciones fisicoquímicas del agua clarificada a la entrada de la columna de desmineralización es:

Tabla.

Propiedad	Valor
pH	7,61
Temperatura	30 °C
Conductividad	404 μ S/cm
Dureza	150 mg/l
Turbidez	1020 ppm

Fuente: valores del laboratorio, autor.

Características de agua de salida

Una vez que el agua clarificada, haya sufrido el proceso de intercambio ionico, el agua que sale de la planta debe tener unas características determinadas para que pueda ser usada en la caldera.

Tabla.

Propiedad	Valor
pH	7,3
Temperatura	29,8°C
Conductividad	100 μ S/cm
Dureza	<10ppm
Turbidez	0,01ppm

Fuente: autores

Se diseñó la torre asumiendo valores por debajo de 10ppm de dureza. actualmente, la empresa utiliza en los procesos agua proveniente directamente del pozo con una dureza del 150 ppm, el valor máximo aceptado de dureza para la caldera es 10ppm con el fin de evitar corrosión e incrustaciones, se espera que el agua de salida tenga un valor de dureza por debajo de 10 ppm.

Respecto a la conductividad, el valor máximo permitido es de 100 μ S/cm, en el proceso de intercambio ionico se reducirá la conductividad del agua de entrada en un 70%.

Característica de la resina

la resina amberlyst 119 west, es una resina catiónica fuertemente ácida, cuyo grupo funcional es el ácido sulfúrico. Su matriz es de tipo gel basada en un polímero de estireno entrecruzado con divinilbenceno. Su tamaño uniforme de partícula permite que la caída de presión sea pequeña y que la productividad sea significativamente más alta que las otras resinas catiónicas ácidas fuertes.

Diseño de la columna

1. El caudal para la columna de intercambio ionico es de 15GLM (3412,2 l/h)
2. Se definió el ciclo de operaciones de las columnas. Esto depende de:

- Caudal a tratar
- Especificaciones técnicas de la resina
- Relación de esbeltez

Se toma como tiempo de duración de cada ciclo de operación de 8 horas (t_c). Un ciclo de mayor duración precisara mayor cantidad de resina y por tanto una columna de mayor diámetro, lo cual disminuye la velocidad lineal del líquido por debajo de los valores recomendados por el fabricante.

3. Se calculo el volumen necesario de resina:

$$VR = r^2 * 3,1416 * hc$$

$$VR = 0,67 \text{ m}^3$$

Se escogio un factor de seguridad de 10%

$$VR = (0,67) (1,1) = 0,737 \text{ m}^3$$

El fabricante proporciona la resina en sacos de 25 litros, por tanto el volumen de resina a solicitar es:

$$\text{Sacos a comprar} = 737 \text{ L} / 25 \text{ L} = 29,4 \text{ sacos.}$$

$$VR \text{ a comprar} = (29,4) (25) = 735 \text{ L de resina} = 0,735 \text{ m}^3$$

Dimensionamiento de la columna

1. Generalmente las columnas de intercambio ionico son de 1,6 m de diámetro, para flujos grandes, en este caso se toma de 1 m.

$$Dc = 1 \text{ m}$$

2. Se calculo el área de paso de la columna (A)

$$A = 3, \frac{1416}{4} * Dc^2$$

$$A = 0,74 \text{ m}^2$$

3. Para la altura de lecho se hizo un estudio comparativo con la altura utilizada en otros proyectos similares y se llego a la conclusion de utilizar una altura de $hL = 3 \text{ ft}$ (0,91m).

4. Se calculó la expansión máxima (E_{max}). Por indicaciones del fabricante, esta expansión es del 5 %

$$E_{max} = (0,05) (0,91 \text{ m}) = 0,0455 \text{ m}$$

5. Se determinó la altura de lecho expandido (hLe)

$$hLe = hL + E_{max} = 0,955 = 0,96 \text{ m}$$

6. Por recomendaciones del fabricante, el volumen de resina inerte es de 500 L

7. Se calculó

Altura de lecho inerte (h_i)

$$h_i = v_i / A = 0,5 \text{ m}^3 / 0,74 \text{ m}^2 = 0,6756 \text{ m}$$

estas alturas se divide en dos partes iguales en la cima y en el fondo de la columna.

Altura de la zona libre (h_{fb})

se recomienda de 50cm

$$h_{fb} = 0,50 \text{ m}$$

altura cilíndrica de la columna (h_c)

$$h_c = h_{le} + h_i + h_{fb} = 0,96 \text{ m} + 0,67 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 2,13 \text{ m}$$

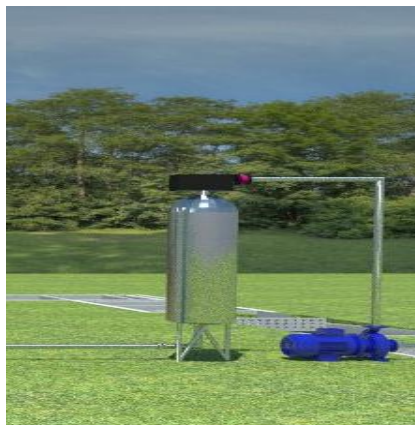
8. Se calculo la velocidad de flujo

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\left(3, \frac{41 \text{ m}^3}{h}\right)}{(0,74 \text{ m}^2)}$$

$$V = 4,60 \text{ m/h} = 0,0011 \text{ m/s}$$

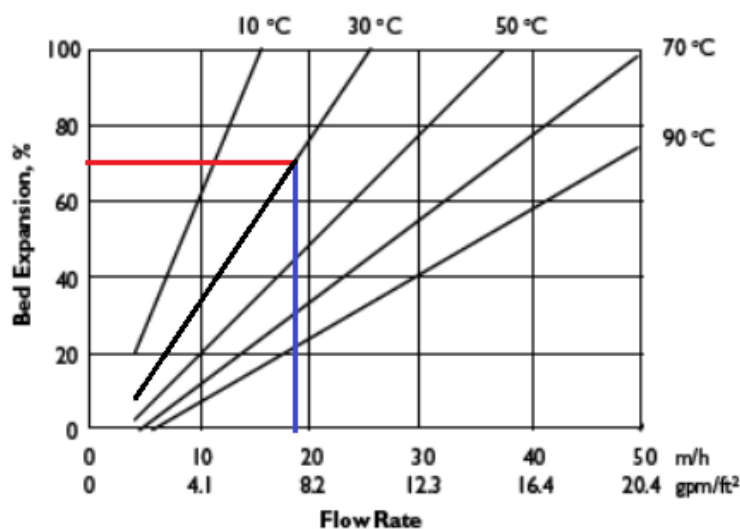
9. Se establecio la relación de esbeltez:

$$h_c / D_c = 2,13$$



Proceso de regeneración

1. El fabricante recomienda una velocidad de compactación V_{comp} , la cual corresponde al 60-80% de una expansión en un retrolavado convencional. El fabricante de la resina recomienda que para el lavado de estas, según las experiencias que ha tenido en el lavado de los materiales fabricados, la velocidad de lavado corresponde a tres veces la velocidad en función de la expansión del lecho y la temperatura, esta velocidad la denominan velocidad de compactación. Se uso un dato medio de expansión (70%) y usando la Figura proporcionada por el fabricante en función del lecho y de la temperatura.



Fuente: fabricante Resina Amberlyst

Vretrolavado= 18 m/h

$V_{comp} = 3 (18 \text{ m/h}) = 54 \text{ m/h}$

El tiempo de compactación se obtiene por experiencias realizadas en otros proyectos:

$t_{comp} = 10 \text{ min} = 0,17 \text{ h} = 600\text{s}$

2. Se calcula el caudal de compactación y el volumen de agua necesario para realizar la compactación del lecho.

$Q_{comp} = (v_{comp}) (A) = (54 \text{ m/h}) (0,78\text{m}^2) = 42,41 \text{ m}^3/\text{h}$

$V_{comp} = (Q_{comp}) (t_{comp}) = (42,41\text{m}^3/\text{h}) (0,17\text{h}) = 7,20 \text{ m}^3$

3. La cantidad de regenerante a usar viene dada por el fabricante. Este, proporciona que por 1 saco de resina se necesitan 175 g H₂SO₄ /L. con la cantidad de regenerante necesaria por volumen de resina y con el volumen de esta, se calculo la cantidad necesaria de H₂SO₄.

$\text{masaH}_2\text{SO}_4 = VR (\text{cantidad de regenerante}) = (737 \text{ L}) (175 \text{ g H}_2\text{SO}_4/\text{L})$

$\text{masa H}_2\text{SO}_4 = 128975 \text{ g de H}_2\text{SO}_4 = 128,975 \text{ kg de H}_2\text{SO}_4$

4. Comercialmente, el acido sulfurico se encuentra al 98%, el fabricante indica que a la hora de regenerar la resina, este acido debe estar diluido entre el 1 al 8 %. Se calculo el volumen de agua para preparar la solución del 8% y un peso de acido sulfúrico de 128,975 kg

$\% \text{ peso} = (\text{kg soluto} / (\text{kg soluto} + \text{kg solvente})) (100)$

$8\% = (48\text{kg acido sulfúrico} / (48 \text{ kg/dia acido sulf} + \text{Kg/dia agua})) (100)$

$Kg/agua\ día = 1483,21\ kg/día$

$V_{agua} = 1,48\ m^3/día$

Se agregaran entonces $1,48\ m^3$ de agua proveniente del tanque de agua desmineralizada.

5. De acuerdo a los datos del caudal de regeneración proporcionados por el fabricante, $(5,07 - 50,74)\ m^3/h$. se escogio para la determinacion de la velocidad y tiempo de regeneración un caudal de:

$$Q_{reg} = 30\ m^3/h = 0,5\ m^3/min$$

6. Se determino la velocidad y tiempo de regeneración:

$$v_{reg} = Q_{reg}/A = (30\ m^3/h) / 0,78\ m^2 = 38,46\ m/h$$

$$t_{reg} = V_{H_2SO_4\ 8\%} / Q_{reg} = 0,12\ m^3 / 0,5\ m^3/min = 0,24\ minutos$$

7. Dependiendo del volumen de resina, el fabricante proporciona una referencia de la cantidad de agua necesaria para el lavado de la columna, tanto la velocidad y el caudal de regeneracion, por tanto el tiempo de lavado:

$$t_{lav} = V_{H_2O} / Q_{reg} = 1,43\ m^3 / 0,5\ m^3/min = 2,86\ min$$

Anexo 7. Desgacificador

1. Se establecio la presión del agua en la entrada por la cabeza del desgacificador, esta se establecio en 1,2 bar.
2. La presión de la entrada de vapor a contracorriente es de 1,01 bar y a una temperatura de 101, 7 °C
3. Se determino las necesidades del venteo (valvula de evacuación de gases prinipalmente CO2 y O2).

Según parámetros de diseño se debe evacuar 3,5 g/h por cada 1000kg/h de la capacidad del desgacificador.

La capacidad de procesamiento del desgacificador es de 3600 kg/h.

$$(3,5 \text{ g/h} / 1000 \text{ kg/h}) (3600 \text{ kg/h}) = 12,6 \text{ g/h}$$

4. Los parámetros de operación del desgacificador vienen dados por las propiedades del agua tomadas de las tablas de vapor.

Para que el oxigeno disuelto en el agua se desprenda es necesario llevar el agua a una temperatura de 105° y una presión en bar de 1,2,

5. La producción de vapor de la caldera es de 15 lb/h, por lo tanto para este caudal se diseño el desgacificador, consultando catalogos de fabricantes obtuvimos las dimensiones.

MODEL NO.	3.5MT	5MT	7MT	9MT	11MT	14MT	18MT	21MT	24MT	30MT	40MT
CAP-LBS/HR	3,500	5,000	7,000	9,000	11,000	14,000	18,000	21,000	24,000	30,000	40,000
STORAGE CAPACITY (NOTE 2)	MINUTES	21	15	11	10	11	12	12	10	12	10
	GALLONS	150	150	150	182	245	276	418	418	592	793
A (APPROX)	63	63	63	75	99	111	113	113	116	116	118
B STORAGE STRAIGHT LENGTH	48	48	48	60	84	96	96	96	96	96	96
C STORAGE DIAMETER	30	30	30	30	30	30	36	36	42	42	48
D DEAERATOR STRAIGHT LENGTH	48	48	48	48	48	48	54	54	54	54	54
E DEAERATOR DIAMETER	18	18	18	18	18	24	30	36	36	36	36
F	19	19	19	18	19	30	30	30	30	30	30
G (APPROX)	17	17	17	17	17	16	17	19	19	13	13
H	24	24	24	30	42	48	48	48	48	48	48
J	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
K STAND LENGTH	44	44	44	48	52	60	78	78	78	78	78
L STAND WIDTH	24	24	24	24	24	30	30	30	36	36	44
M (APPROX)	27	27	27	27	27	23	26	26	29	29	32
N RECIRC	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
P CHEMICAL INJECTION	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4
R LOW TEMP RETURNS	1	1	1	1	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
S HIGH TEMP RETURNS	1	1	1	1	1	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
T STEAM INLET	3	3	3	3	3	4	4	6	6	6	6
U VESSEL DRAIN	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1	1 1/2
V OVERFLOW TRAP	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
W VACUUM BREAKER	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2
X SENTINEL RELIEF VALVE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Y VENT	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1 1/2
Z WATER INLET CONTROL VALVE	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1 1/4	1 1/4
AA PRV SENSING	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
AB PUMP SUCTION	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	6

Catalogo BFS industries, spray dearator

Se convierten las unidades y se obtienen los siguientes resultados:

Tiempo de residencia (min)	12
Capacidad almacenamiento (m3)	1,04
Volumen total ocupado (m3)	2,35
Diamtero valvula de venteo (m)	0,01905



Anexo 8. Tuberías y bombas

TUBERIAS

Las dimensiones de las tuberías dependerán de la línea de instalación. Tabla muestra las diferentes líneas de tuberías que se definieron para la planta.

Tabla.

	Línea	fluido
Extracción de agua pozo al tanque	1	Agua sin tratar
Tanque – canaleta parshall	2	Agua sin tratar
Canaleta parshall – floculador	3	Agua con alumbre
Floculador sedimentador	4	Agua con floc
Sedimentador – tanque 2	5	Agua clarificada
Tanque 2 – columna de intercambio ionico	6	Agua clarificada
Torre de intercambio ionico - desgacificador	7	Agua desmineralizada
Desgacificador – tanque 3	8	Agua tratada

Fuente: autor

Línea tubería 1.

1. Se calculó el diámetro interno necesario a través de la ecuación de continuidad

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v * 3,1416}}$$

2. Tomando como referencia los datos proporcionados en la tabla. Se escogio una velocidad sugerida para el fluido

$$vsug = 4ft/s$$

$$vsug = 1,2 m/s$$

table. Velocidades medias de circulacion de fluidos

Fluid	Suggested trial velocity	Pipe material
Sodium Hidroxide	6fps	Steel
0-30%	5fps	Steel
30-50%	4fps	Nickel
50-73%	4fps	Nickel
Sodium Chloride Solution		
No solids	5fps	Steel
With solids	7,5fps	Steel
Perchloretheethylene	6fps	Steel
Sulfuric Acid (88-93%)	4fps	S.S-N316
Sulfuric Acid (93-100%)	4fps	Cast iron and Steel
Sulfur Dioxide	4fpm	Steel
Styrene	6fps	Steel
Trichlorethylene	6fps	Steel
Vinylidene chloride	6fps	Steel
Water average service	3-8 fps	Steel
Boiler feed	4-12 fps	Steel
Pump suction	1-5fps	Steel, pvc
Concrete	5-12 fps	

Fuente: Applied Design for Chemical and petrochemical plants, Ludwig E.3ed.volume 1,pag 59.

3. Se recalculo el diametro de tuberia utilizando la velocidad sugerida del agua.

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v * 3,1416}}$$

$$D = 0,078m = 3,08in$$

4. Para el diámetro calculado, se escogio un diámetro comercial utilizando la tabla. En las que se encuentra el valor del diámetro nominal, presión nominal y diámetro externo. Se tomo el diámetro nominal inmediatamente superior al diámetro obtenido con sh. 40 ya que esta cedula es la mas recomendada cuando el sistema no es a super altas presiones.

Tabla. Catalogo de diámetros de tuberías

Nominal Pipe Size (in)	OD inches		ID inches	
	Sch.40	Sch.80	Sch.40	Sch.80
3/4	1,050	1,050	0,824	0,742
1	1,315	1,315	1,049	0,957
1 ^{1/2}	1,900	1,900	1,610	1,500
2	2,347	2,375	2,067	1,939
3	3,500	3,500	3,068	2,900
4	4,500	4,500	4,026	3,826

Fuente: Applied Process Design for Chemical and petrochemical plants, Ludwig E.3ed, volumen 1, pag 60.

$$D_{in} = 4,026 \text{ in}$$

A continuacion se resume en la siguiente table el resto de lineas de tuberias, siguiendo el mismo esquema de calculo que en el caso anterior.

Tabla. Dimensionamiento líneas de tuberías

Linea	D(in)	Q(m ³ /s)	V(ft/s)	ID _N (in)	OD _N (in)	Nominal pipe size
1	3,08	0,01509	4	4,026	4,5	4
2	3,08	0,03	4	4,026	4,5	4
3	3,08	0,03	4	4,026	4,5	4
4	3,08	0,03	4	4,026	4,5	4
5	3,08	0,03	4	4,026	4,5	4
6	3,022	0,00095	4	3,068	3,5	3
7	3,022	0,00094	4	3,068	3,5	3
8	3,022	0,00094	4	3,068	3,5	3

Fuente: autor

BOMBAS

En la tabla se muestra el numero de bombas para la planta de tratamiento y la unidad inicial y final para el transporte del fluido.

Tabla. Numero de bombas

Bomba	Deposito inicial	Deposito final
P-101	Pozo 1	Tanque 1.
P-102	Tanque 2	Columna de intercambio ionico
P-103	Columna de intercambio ionico	Desgacificador
P-104	Desgacificador	Tanque 3.

Fuente: autor

Para el suministro de agua de el tanque 1 a la canaleta parshall, de la canaleta parshall al floculador y del floculador al sedimentador, no se necesitara de una bomba que suministre agua, pues el tanque de almacenamiento de agua estará a una altura de 5 metros de el suelo aprovechándose de esta manera la gravedad y la presión del fluido para el transporte. Solo se utilizara una valvula que controle el paso del agua.

1. Se verifico la línea de tubería a la que pertenece la bomba P-101
2. se realizo un calculo de la velocidad tomando como referencia las dimensiones de la línea de tubería 1.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = 1,83 \text{ m/s}$$

3. para calcular la potencia de la bomba se calculo mediante la siguiente ecuación

$$P = \frac{Q * d * g * h}{3600000}$$

$$P (P-101) = 6,5 \text{ hp}$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior para el resto de las bombas se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla.

Bomba	Potencia (hp)
P-101	6,5
P-102	2
P-103	2
P-104	2

Fuente: autores

La bomba dosificadora de sulfato de aluminio fue escogida de acuerdo al caudal manejado.

Solución	Caudal	Tipo de bomba
Sulfato de aluminio	15 L/min	Serie Magno: accionamiento selenoide, caudal hasta 115 L/min, presión max. 16 bar

Fuente: autores

Anexo 9. Tanques

Para el diseño de los tanques (1 y 3) los cuales son tanques cilíndricos se planteo lo siguiente

1. se establecio un volumen necesario para cada tanque (V_n)
2. se calculo el radio del tanque, mediante:

$$R = \sqrt[3]{\frac{P}{2 * 3,1416}}$$

3. se establecio el diámetro:

$$D = 2R$$

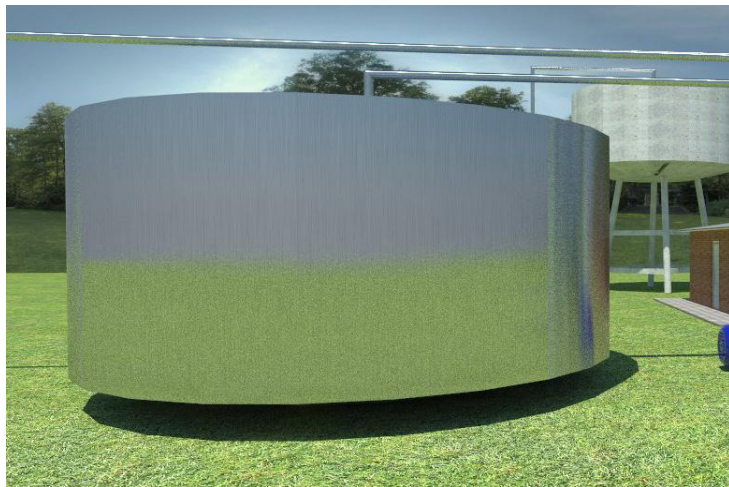
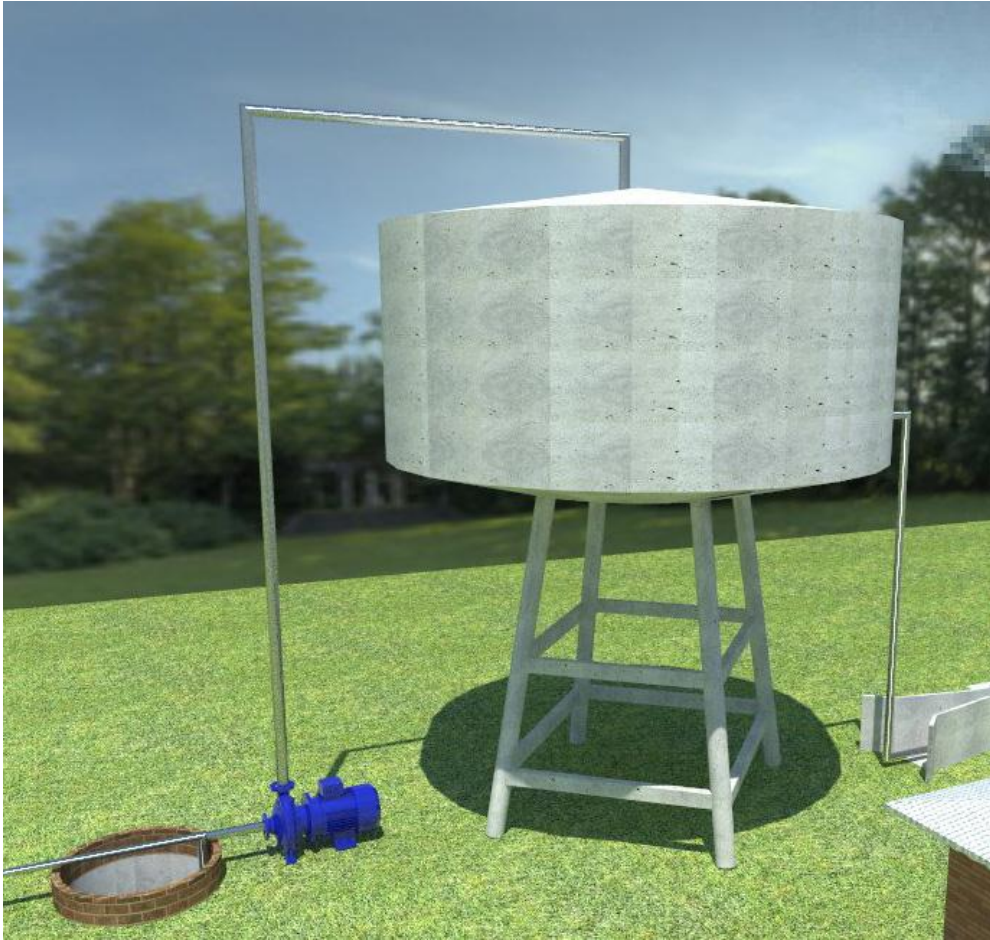
4. se obtuvo la longitud de la envolvente:

$$L = P/2R^2$$

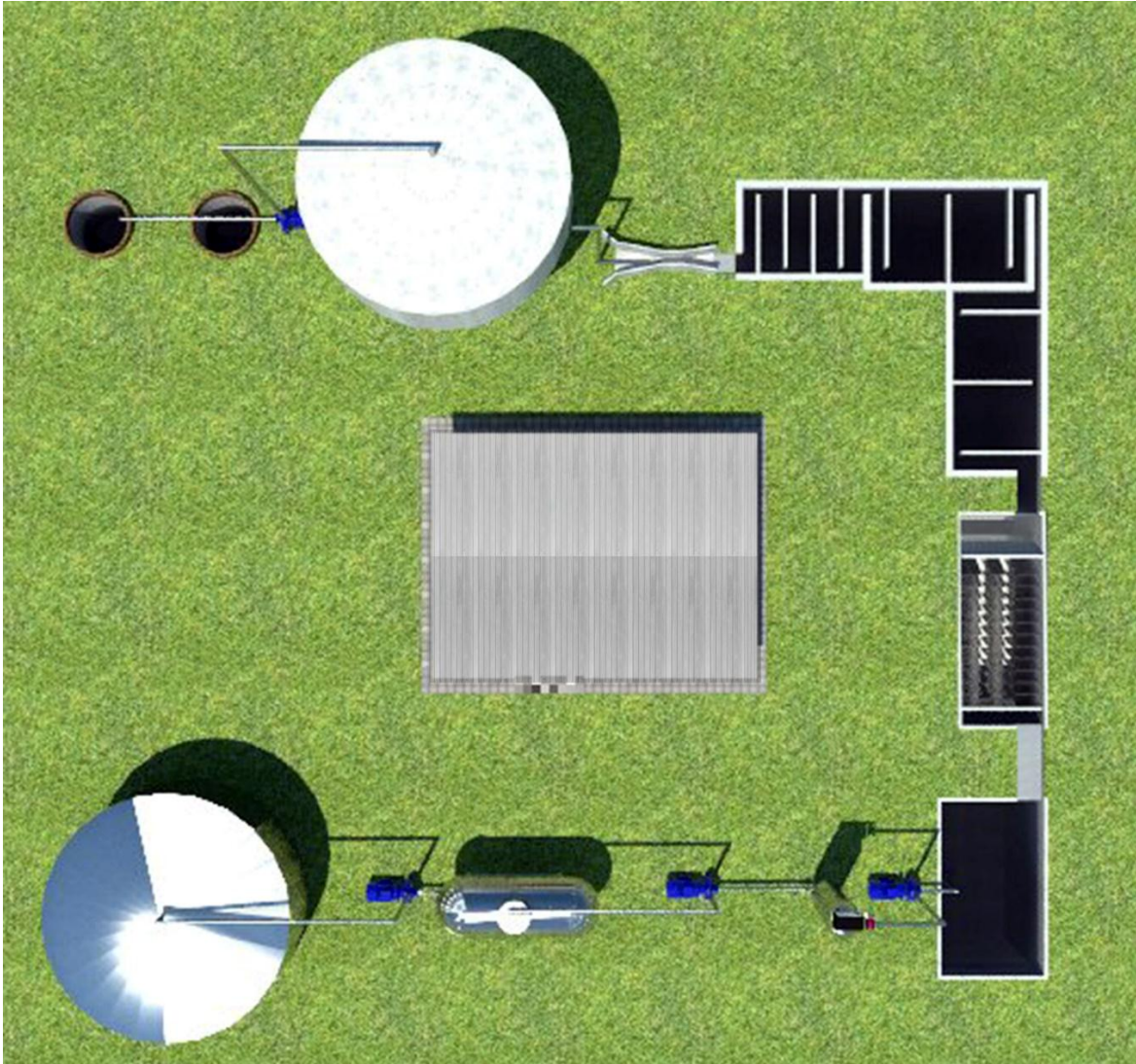
los resultados para los tanques 1 y 3 se muestran en la siguiente tabla
 tabla. Dimesnionamiento de los tanques

Tanque	V_n (m ³)	R(m)	D(m)	L(m)
Tanque 1	80	2,3	4,6	7,5
Tanque 2	40	1,85	3,70	5,84

El tanque 2, se dimensiono a partir del caudal que va a albergar, para este caso el tanque contara con una capacidad de 80 m³, lo tanto este tendrá un largo de 5,5m, un ancho de 3,5 m y una profundidad de 4,15m.



Anexo 10. Diagrama general de la planta en 3D



Anexo 11. Diagrama de flujo de la planta

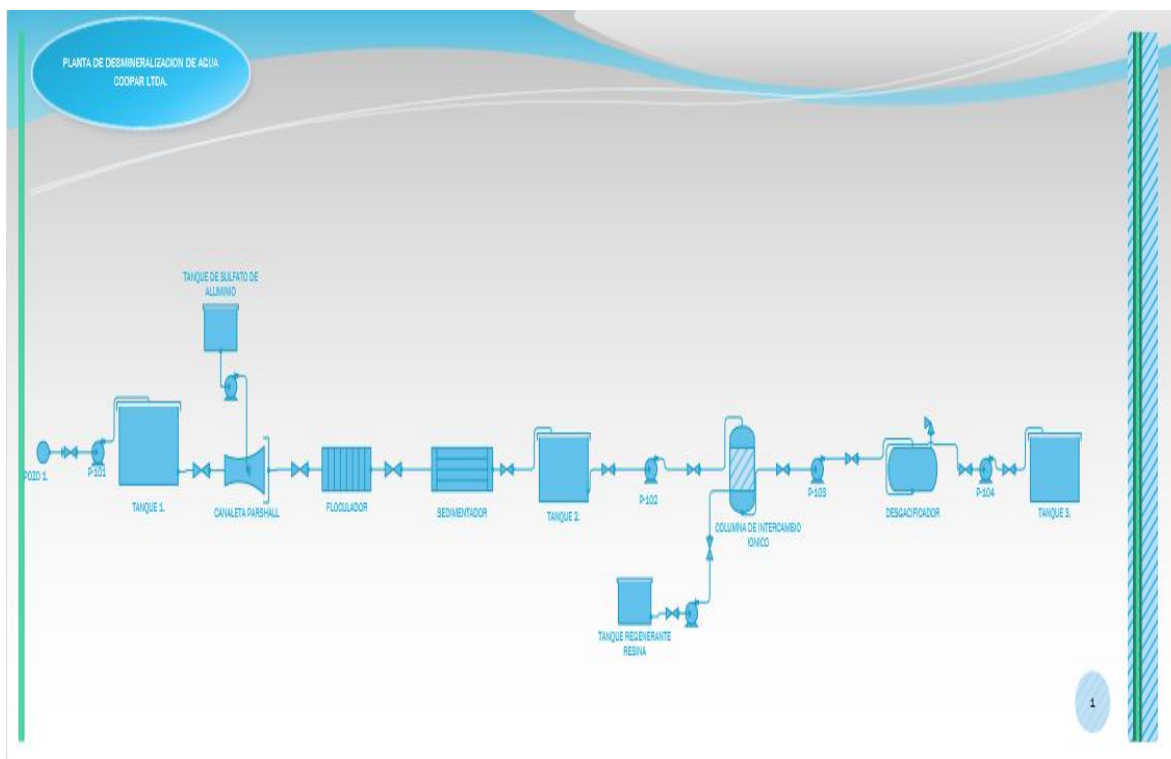


Diagrama realizado en Microsoft visio 2013.