

**DISEÑO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
EN LA EMPRESA AJOVER S.A**



**JENNIFER GUERRA SANDOVAL
MARI VICTORIA VIDAL MEJIA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T y C.
DISEÑO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUA EN LA EMPRESA AJOVER S.A.**

Grupo de Investigación del Programa de Ingeniería Química (GIPIQ)

**JENNIFER GUERRA SANDOVAL.
MARI VICTORIAL VIDAL MEJIA.**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

**Director
JOSE ANGEL COLINA MARQUEZ, PhD**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T y C.
2013**

Nota de Aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias, 11 de Junio de 2013

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a:

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

A mi madre por su gran ejemplo, apoyo incansable y por siempre luchar por darme lo mejor. A mi Padre por dejarme los mejores consejos y enseñanzas. A mi Tio Bienve, por ser mi tío, mi padrino, mi papá. A mi linda Tía Julia, por ser mí amiga y mi segunda madre. A mi Tia Sixtica por estar ahí siempre para nosotros. A mis hermanos por siempre estar ahí para mí y recordarme todos los días que soy la princesa de la casa

A toda mi Familia por estar conmigo, apoyarme en todo momento y siempre estar cerca aunque estemos lejos.

A mis amigas y amigos por siempre ser especiales y estar cuando más se necesita. A mis amigos y eterno compañeros: Jenni, Pollo, Aarón y Nicolás por hacer de la universidad una bella etapa, por todos los bellos y malos momentos que compartimos durante toda nuestra vida universitaria y por siempre ser los cinco. A todo mi salón porque a pesar de no ser el mejor, por todos los momentos vividos, compartidos y acompañarnos juntos en el camino.

Mari Victoria

Con las mayores expectativas, dedico esta tesis:

A Dios por la oportunidad de vivir, por su amor incondicional y guiarme conforme a su voluntad.

A mis padres José Isaías Guerra Salcedo y Martha Sandoval Morales por todos los esfuerzos y los sacrificios realizados.

A mis hermanos Jessith, Jazer y Josser por el apoyo incondicional que siempre me brindaron.

A Miguel quien me ha apoyado de manera incondicional en esta etapa de mi vida.

A mis amigos Mari, Leonardo, Aarón y Nicolás por compartir buenos y malos momentos incondicionalmente

Jennifer

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera sincera a:

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

Al cuerpo docente de nuestro programa: Álvaro Realpe, Ruperto Ealo, Lesly Tejada, Candelaria Tejada, Luis Monroy, Maximiliano Ceballos, Pedro Vega, Gesira de Avila, Jose Colina, Adalberto Matute, María Teresa Acevedo, Isabel Paz, Miguel Mueses, Hernando Ochoa, Rodrigo Ricardo, Ángel Villabona, Pedro Meza. Un grupo de personas excepcionales que en todo momento cuando solicitamos un consejo no dudaron en dárnoslo, por enseñarnos y ser un ejemplo a seguir

Empresa AJOVER S.A. por abrirnos las puertas y permitir que nuestro proyecto fuera llevado a cabo en su planta de producción de servicios industriales.

Agradecemos especialmente a los ingenieros: Alberto Gomescasseres, Sebastián Lemaitre y Elena Conde por prestar un poco de su tiempo en la asesoría de nuestro proyecto

Agradecemos al ingeniero José Ángel Colina Márquez por permitirnos acudir a él para la correcta consecución de este proyecto y por estar al pendiente de nosotras en todo este proceso.

A los evaluadores: Ángel Villabona y Adalberto Matute, por regalarnos minuto de su tiempo para asesorarnos

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

CONTENIDO

	pág
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCION	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. ALCANCE E HIPOTESIS.....	17
3.1 Alcance de la Investigación.....	17
3.2 Hipótesis	17
4. MARCO REFERENCIAL	18
4.1 MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL.....	18
4.1.1 Proceso de Potabilización de Agua Cruda	18
4.1.2 Proceso de Desmineralización de Agua.....	23
4.1.3 Evaluación Económica.....	24
4.2 ANTECEDENTES	26
4.2.1 Experiencias Plantas Potabilización Municipales	27
4.2.2 Experiencias Internacionales Planta de tratamiento de agua en Industrias.....	28
4.3.3 Experiencias Nacionales plantas de tratamiento de agua en Industrias	29
4.3.4 Experiencias locales plantas de tratamiento de agua en Industrias.....	29
4.5 ESTADO DEL ARTE	31
5. METODOLOGIA.....	34
5.1 Recopilación de la información.....	34
5.1.1 Fuente de información primaria	34
5.1.2 Fuente de información secundaria.....	34
5.2 Calidad de la fuente de abastecimiento	35
5.3 Caudal de diseño para la planta de tratamiento	35
5.4 Diseño de la planta de tratamiento	36

5.4.1. Selección de parámetros óptimos del proceso (Prueba de jarras)	36
5.4.2. Diseño Unidades de Tratamiento	37
5.4.3. Métodos de Control	43
5.4.4 Evaluación Económica	43
6. RESULTADOS Y DISCUSION	46
6.1 DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES	46
6.1.1 Canaleta Parshall	46
6.1.2 Floculador de flujo horizontal	47
6.1.3 Sedimentador de flujo horizontal	48
6.1.4 Columnas de filtracion	49
6.1.5 Columnas de intercambio ionico	50
6.1.6 Depositos	52
6.1.7 Tuberias	53
6.1.8 Bombas	56
6.1.9 Tratamiento de lodos	56
6.2 RESULTADO EVALUACION ECONOMICA	57
6.3 ANALISIS DE RESULTADOS	58
7. CONCLUSIONES	60
7.IMPORTANCIA DEL ESTUDIO Y ASPECTO SOCIAL	61
7.1 Importancia del Estudio	61
7.2 Aspecto Social	61
8. RECOMENDACIONES	62
9. REFERENCIAS	64

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1: Normas ASTM para distintas propiedades.....	35
Tabla 2: Composicion Lecho filtrante	41
Tabla 3: Dimensionamiento Canaleta Parshall.....	46
Tabla 4: Dimensionamiento Floculador Hidraulicco	47
Tabla 5: Caracteristicas Sectores Floculador Hidraulico	48
Tabla 6: Dimensionamiento Sedimentador de Flujo Horizontal	49
Tabla 7: Dimensionamiento Columna de Filtracion	50
Tabla 8: Dimensionamiento Columnas de Intercambio Ionico	51
Tabla 9: Dimensionamiento Tanques	53
Tabla 10: Dimensionamientos Tuberias	55
Tabla 11: Caracteristicas de las Bombas	56
Tabla 12: Dimensionamiento Lecho de Secado	57
Tabla 13: Resultados Indicadores de Rentabilidad	57

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1: Esquema básico proceso de desmineralización	23

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A: Caracterizacion Agua Cruda.....	69
ANEXO B: Caracterización corrientes de Agua Ajover S.A.....	73
ANEXO C: Criterios de Selección de Equipos	74
ANEXO D: Parámetros de diseños de equipos	78
ANEXO E: Dimensionamiento Canaleta Parshall	82
ANEXO F: Floculador Hidráulico de Flujo Horizontal	89
ANEXO G: Sedimentador de Flujo Horizontal.....	94
ANEXO H: Filtro rápido lecho dual estratificado.....	100
ANEXO I: Unidad de desinfección.....	109
ANEXO J: Intercambio Iónico.....	112
ANEXO K: Tuberías y Bombas	127
ANEXO L: TANQUES.....	142
Anexo M: Tratamiento De Lodos.....	144
ANEXO N: Control del Proceso	146
ANEXO O: Evaluación Económica	152
ANEXO P: Operación y Mantenimiento.....	162
ANEXO Q PLANO Y DIAGRAMA DE EQUIPOS.....	165

RESUMEN

En este proyecto, se diseñó y evaluó económicamente una planta de tratamiento de agua de uso industrial para la empresa Ajover S.A, para resolver el problema de disponibilidad de este recurso. Se realizó un estudio a los sistemas de tratamiento utilizados, así mismo, se caracterizó el agua cruda captada del Canal del Dique que llega a las instalaciones de la empresa, y se estableció una propuesta de tratamiento basada en un sistema convencional para la purificación de agua y un tratamiento de desmineralización para la obtención de agua de procesos. Finalmente, se ejecutó una evaluación económica para conocer la viabilidad del proyecto.

Se concluyó que con la alternativa de tratamiento planteada en este proyecto, se solucionará la problemática de disponibilidad de agua en la empresa Ajover S.A, pues se obtendrán ahorros económicos mayores a lo esperado con el montaje y puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas, esperando que se disminuyan los costos de producción, no halla dependencia de suministros externos y consoliden a la empresa Ajover S.A como una de las más competitivas del Sector Industrial de Mamonal.

Palabras Claves: Agua, tratamiento convencional, desmineralización, evaluación económica

ABSTRACT

In this project, we designed and evaluated economically treatment plant water for the company Ajoever SA to solve the problem of availability of this resource. We realized a study to systems of treatment used, also, was characterized captured the raw water of Canal del Dique that reaches the company premises, and established a treatment approach based on a system for the purification of water and demineralization treatment to obtain process water. Finally, an economic evaluation was performed to assess the viability of the project.

It was concluded that treatment with the alternative posed, solved the problem of water availability in the company, in addition to economic savings obtained higher than expected with the installation and commissioning of the water treatment plant.

Keywords: Water, conventional treatment, demineralization, economic evaluation

1. INTRODUCCION

El agua es solvente universal por excelencia, y en la actividad industrial, es usada como medio de reacción, disolvente y regulador térmico. Debido a su gran importancia y la calidad en el servicio para los procesos productivos muchas empresas nacionales e internacionales han optado por la implementación de 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 [1]. En 2008 Quimipac (Cali) decide aprobar el diseño, suministro, montaje y puesta en marcha de una planta de agua potable con capacidad de 3lps. 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 [2]. Grandes empresas del sector Industrial de Mamonal como Ecopetrol SA, Abocol SA y Propilco SA, captan agua del Canal del Dique por medio de la Estacion de Gambote para abastecer sus plantas de tratamiento de agua, con la particularidad de que un porcentaje del agua tratada se destina para consumo humano y el resto se adecúa especialmente para aguas de proceso.[3]

La Empresa Colombiana Ajover S.A, situada en el km 11 del sector industrial de Mamonal en la ciudad de Cartagena, es líder en la producción de materiales plásticos, los cuales se han convertido en uno de los productos de mas alto consumo, más abundantes e importantes en la vida diaria. En los procesos de polimerización al igual que en los procesos de transformación de plásticos el consumo de agua juega un papel fundamental. La creciente demanda de estos materiales han llevado a la empresa a constantes aumentos en la producción y planes de expansión, lo cual trae consigo un incremento en el consumo de agua generando, una problemática interna pues la cantidad de agua que suministra la empresa prestadora del servicio (Aguas de Cartagena S.A) no es suficiente, por esta razón en muchos casos la empresa toma la decisión de parar la producción debido a esta situación. El consumo de agua por un día en Ajover S.A (302 m3) representa el gasto de

dos años de una vivienda con 5 integrantes. El consumo anual de agua es aproximadamente 95000 m³, alrededor de \$171.000.000 pesos.

El aumento constante de la producción trae consigo un incremento en el consumo de agua, representando un costo elevado con tendencia a aumentar, los razonamientos de agua previsto para el año 2014 por el fenómeno de la Niña, han hecho necesaria la creación de nuevas estrategias que permitan asegurar el abastecimiento, minimizar los costos de producción, y buscar una independencia de la empresa prestadora del servicio.

Aprovechando el suministro de agua cruda que llega directamente a las instalaciones de la empresa Ajover S.A (Captada de la Ciénaga de Dolores -tramo Canal del Dique) para el sistema contraincendios y en búsqueda de contrarrestar los posibles efectos económicos que puede generar la escasez de agua en los próximos años, han llevado a estudiar la posibilidad del montaje de una planta de tratamiento de agua, de un caudal máximo de 500 m³/día que satisfaga los requerimientos de agua que la empresa Ajover SA necesita (agua de enfriamiento, agua para calderas, agua clarificada y agua potable). El diseño del sistema de tratamiento de agua se realizará como un procedimiento convencional de potabilización el cual consta de seis unidades en su proceso; de igual manera el proceso de desmineralización se hará a través de un proceso de intercambio iónico por medio de resinas catiónicas y aniónicas. Finalmente, con la evaluación económica se identificará, valorará y comparará los costos y beneficios asociados a este proyecto. Con esta planta se espera que disminuyan los costos de producción, y que no haya dependencia de suministros externos.

Este proyecto se desarrollará en el grupo de investigación GIPIQ, 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 y permite fortalecer las relaciones entre el programa de Ingeniería Química y la zona industrial de Mamonal.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar económicamente una planta de tratamiento de agua en la empresa AJOVER S.A para resolver el problema de disponibilidad de este recurso mediante un sistema convencional.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características fisicoquímicas del agua cruda que será tratada para definir los parámetros de diseño de los equipos de la planta de tratamiento.
- Establecer los requerimientos de agua potable, desmineralizada y de proceso en la empresa AJOVER S.A. para definir el caudal de diseño.
- Estudiar diferentes sistemas de tratamiento de agua para uso industrial con el fin de seleccionar el más adecuado para los requerimientos de la empresa.
- Diseñar un sistema de tratamiento con base en los requerimientos y características del agua cruda para suplir las necesidades de consumo de agua potable, desmineralizada y de proceso.
- Evaluar la factibilidad económica de esta planta ajustada a la necesidad de la empresa AJOVER S.A.

3. ALCANCE E HIPOTESIS

3.1 Alcance de la Investigación

Este trabajo se limitará a diseñar y seleccionar una planta de tratamiento de agua para la empresa Ajoover S.A de Cartagena, de acuerdo a las características del agua cruda de la Ciénaga de Dolores y a la calidad de agua requerida para los procesos productivos de la empresa. Adicionalmente se realizará la evaluación económica de este proyecto con el fin de que la empresa tome la decisión de realizar o no el montaje de la planta

3.2 Hipótesis

El diseño y montaje de una planta de tratamiento de agua en la empresa Ajoover SA, representaría ahorros económicos de aproximadamente 20% en los costos de producción y ventajas en el proceso productivo.

Hipótesis nula:

El diseño y montaje de una planta de tratamiento de agua en la empresa Ajoover SA, no representará ahorros económicos en los costos de producción y ventajas en el proceso productivo.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

4.1.1 Proceso de Potabilización de Agua Cruda

Todo proceso de potabilización de agua plantea dos propósitos centrales: la remoción de sólidos, para mejorar el aspecto físico (turbidez) del líquido y la inactivación de organismos nocivos. Estos dos contenidos tienen una relación con el contenido del material sólido presente en el agua de una fuente superficial, comúnmente utilizada en el abastecimiento de agua. Se deduce entonces que el proceso de potabilización debe cumplir con la eliminación y reducción de contaminantes hasta niveles no agresivos. El sistema más usado para el tratamiento de agua potable se conoce como método convencional de potabilización el cual consta de seis unidades en su proceso: mezcla rápida o coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. [4].

4.1.1.1 Canal de ingreso de agua cruda: Permite transportar el agua cruda desde el ingreso de la planta de tratamiento hasta la canaleta Parshall donde se da el proceso de coagulación. No requiere ningún nivel de operación ya que se trata de un simple canal. Se deben verificar los siguientes aspectos en forma permanente:

- Que el canal se encuentre limpio, evitando la acumulación de materiales en el fondo, que impidan el paso del agua, produciendo rebalses con pérdida de caudal.
- Se debe verificar que no existan infiltraciones (depende del material del canal) que produzcan pérdidas de caudal del agua, que deterioren el canal o la plataforma donde se encuentra construido [5].

4.1.1.2 Mezcla rápida - coagulación: Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado o mezcla rápida. El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las

partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino que también reduce la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos [6].

La dosificación se realiza en la unidad de mezcla o mezcladores que tienen como objetivo la dispersión instantánea del coagulante en toda la masa que se va a tratar. Esta dispersión debe ser lo más homogénea posible, con el objeto de desestabilizar todas las partículas presentes en el agua y optimizar el proceso de coagulación. El tratamiento de coagulación óptimo de un agua cruda tiene como objetivo lograr un equilibrio muy complejo en el que están implicadas muchas variables como son PH, Sales disueltas, Temperatura, Tipo de coagulante y turbiedad.

La mezcla rápida puede efectuarse mediante turbulencia que puede ser provocada por medios hidráulicos o mecánicos. El proceso de coagulación se consigue introduciendo en el agua un producto químico denominado coagulante o sustancias aglomerantes, con el fin de obtener la formación de coágulos que faciliten la precipitación de los aglomerados por gravedad y su posterior separación del líquido. Los coagulantes que pueden emplearse son los coagulantes metálicos y los polímeros orgánicos e inorgánicos según las Normas RAS 2000 numeral C.4.4.1.1. [7]. Para su empleo se recomienda la realización de ensayos de jarras en rangos amplios de dosificaciones, para determinar la dosificación óptima.

4.1.1.3 Floculación: El término floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas, es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados [8].

El objetivo del floculador es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que la suspensión de agua y flóculos salga de la unidad [9]. De la misma manera 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 del flóculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración de los electrolitos. Los procesos de coagulación – floculación son procesos complejos, cuya dosificación depende de las características del agua cruda [10].

La mezcla lenta para floculación puede efectuarse mecánicamente, usando rotores de paletas, o hidráulicamente, como resultado del movimiento del agua. El paso de agua del mezclador o coagulador debe ser instantáneo y debe evitarse los canales y las interconexiones largas pues afectaran en la formación de los flocs. Para garantizar un buen diseño de la unidad, se debe tener en cuenta que el tiempo de retención y el gradiente de velocidad varían con la calidad del agua [11], por lo tanto estos parámetros deben ser seleccionados mediante una prueba de jarras.

4.1.1.4 Sedimentación: En el proceso de sedimentación permite la remoción de las partículas sólidas de una suspensión mediante gravedad, en algunos casos se denomina clarificación o espesamiento. Este tipo de proceso puede ser de dos tipos: sedimentación simple y sedimentación después de coagulación y floculación o ablandamiento, siendo esta última la más utilizada. La sedimentación después de coagulación y floculación, se usa para remover la carga de sólidos suspendidos sedimentables que han sido producidos por el tratamiento químico. Las variables que afectan el proceso de sedimentación son [12]:

- a. Corrientes de densidad: son las corrientes que se producen dentro del tanque por efecto de las diferencias de densidades en la masa de agua y son ocasionadas por un cambio de temperatura y/o por diferencias en la concentración de las partículas suspendidas en las distintas masas de agua
- b. Corrientes debidas al viento: el viento puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo.
- c. Corrientes cinéticas: pueden ser debido al diseño impropio de la zona de entrada o de salida (velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias) o por obstrucciones en la zona de sedimentación.

Los sedimentadores que pueden emplearse según las especificaciones RAS 2000 son el de flujo horizontal, flujo vertical y alta tasa. También puede realizarse la sedimentación en unidades con manto de lodos.

4.1.1.5 Filtración: El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Generalmente, se piensa del funcionamiento de los filtros como un tamiz que atrapa el material suspendido entre los granos, pero el mecanismo por el cual el filtro remueve el material suspendido es el resultado de la acción conjunta de diferentes acciones físicas, químicas y biológicas ocurrientes [13]:

Los filtros se clasifican de acuerdo a:

- Dirección de flujo: hacia arriba, hacia abajo o dual
- Tipo de lecho filtrante: generalmente un solo medio sea arena o antracita, medio dual: arena y antracita, y lecho mezclado: arena, antracita y grava
- Fuerza impulsora: Vence la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante. Se clasifican en: filtros de gravedad y de presión. El filtro por gravedad es el filtro más usado en plantas de purificación de agua, mientras que el filtro a presión se usa principalmente en la filtración de aguas para piscinas.
- Tasa de filtración: Entre mayor tasa de filtración menores son los requerimientos de área. Con el uso de medios filtrantes duales o mezclados, se logran diseños mucho más económicos de área, pues usan tasas de filtración mayores que los filtros rápidos convencionales de un solo medio
- Método de control: Diferentes métodos que permiten mantener la tasa de filtración constante, pues al iniciar la carrera de filtración, el filtro está limpio, a medida que empieza la filtración, los sólidos suspendidos removidos se acumulan en el medio filtrante; la fuerza impulsora debe vencer la resistencia ofrecida por el lecho taponado y el sistema de drenaje. Por tanto, si desea mantener una tasa constante de filtración, la fuerza impulsora debe aumentar proporcionalmente al aumento en la resistencia del filtro, por el contrario, el caudal a través del filtro declina y la filtración será declinante

4.1.1.6 Desodorización: Se denomina desodorización a los procesos que eliminan de una corriente los compuestos que provocan los malos olores. A menudo se trata de mezclas de sustancias liberadas en procesos de descomposición anaeróbica como el sulfhídrico, los mercaptanos, el amoníaco, las aminas o diversos compuestos orgánicos volátiles. Generalmente se hace uso de filtros de carbón activado, este material es fabricado a partir de compuestos de carbonos, con propiedades adsorptivas; el carbón activado remueve contaminantes orgánicos del agua por el proceso de adsorción, atrayendo y acumulando el adsorbato sobre su superficie. Este material ha tenido su éxito debido a que controla los olores y sabores causados principalmente por gases disueltos (ácido sulfhídrico y metano), materia orgánica proveniente de algas y microorganismos en descomposición, etc. Además, remueve residuos orgánicos tóxicos, metales pesados y compuestos orgánicos de cloro [14].

4.1.1.7 Desinfección: El objetivo fundamental de desinfectar el agua destinada al consumo humano y uso doméstico es asegurar la inactivación o destrucción de los agentes patógenos para el hombre, transmitidos por ésta. El agua a desinfectar debe estar libre de partículas coloidales causantes de turbiedad y color que puedan interferir con la acción del agente desinfectante. Así la desinfección alcanza su máxima eficiencia con las aguas claras. Por lo tanto es importante optimizar los procesos previos de clarificación del agua. Este proceso se lleva a cabo en tanques o cámaras de contacto que tienen como función asegurar un tiempo fijo entre el agua y el desinfectante, asegurando así la remoción de bacterias, virus y parásitos presentes en el agua.

Existen diferentes productos y tecnologías para realizar el proceso de desinfección del agua. Los más comunes incluyen el uso de halógenos (cloro, bromo y yodo), la luz ultravioleta, el ozono, el dióxido de cloro, etc. Sin embargo el cloro sigue siendo el desinfectante más popular por su bajo costo, facilidad para medir su concentración en el agua, alta eficiencia para remover microorganismos patógenos y la disponibilidad de tecnología simple para su aplicación y control, este se puede encontrar de varias formas dependiendo de las características de cada uno [15].

4.1.1.8 Almacenamiento y Distribución. Estas dos operaciones son importantes para la entrega de agua de calidad adecuada a los consumidores, por ello se debe de disponer de instalaciones con la capacidad suficiente para abastecer la demanda de los usuarios. Pero además, las instalaciones de almacenamiento deben estar protegidas contra las posibilidades de contaminación secundaria y deben someterse a actividades sanitarias con cierta frecuencia.

La distribución se hace a través de redes. Estas deben garantizar un porcentaje mínimo de fugas para que la dotación requerida por los usuarios se garantice, pero también debe construirse con los materiales adecuados para no comprometer la calidad del agua ofrecida a los usuarios [16].

4.1.2 Proceso de Desmineralización de Agua

El agua desmineralizada es aquella provista de minerales comunes presentes en el agua como calcio, hierro, sodio, entre otros. La función principal del proceso de desmineralización, radica en la eliminación de sólidos disueltos que contiene el agua, estas son partículas de tamaño reducido que se encuentran totalmente rodeadas por moléculas de agua y que poseen cierta carga eléctrica [17].

El proceso de desmineralización consiste en eliminar o disminuir considerablemente, la proporción de sales y minerales disueltos en el agua bruta. Generalmente, previa a la unidad de desmineralización, el agua bruta se somete a una secuencia de procesos físicos y químicos en las unidades de pre tratamiento y desalación [18].

Figura 1: Esquema Básico del proceso de desmineralización



Fuente: C.J. Gabelich, M.D. Williams, A.Rahardianto, J.C. Franklin, Y. Cohen, High-recovery reverse osmosis desalination using intermediate chemical demineralization, J. Membr. Sci. 301 (2007)

Existen diferentes procesos para la desmineralización del agua, lo más utilizados a nivel industrial son:

- Procesos de destilación, los cuales se basan en la separación de los componentes no volátiles mediante cambios de estado en el agua.
- Procesos de membrana, los cuales se basan en las propiedades que presentan ciertos tipos de membranas las cuales permiten el paso de moléculas de cierto tamaño a través de sus poros (Ósmosis inversa o electrodiálisis).
- Procesos de intercambio iónico, tienen lugar cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion del mismo signo que se encuentra unido a una partícula móvil. Se caracterizan por tener depósitos presurizados que contienen en su interior lecho de resinas donde quedan retenidos los sólidos disueltos [19].

La elección de un proceso u otro vendrá condicionada por las características físico-químicas del agua de alimentación, la producción necesaria y la fuente de energía disponible para impulsar la planta [20].

4.1.3 Evaluación Económica

La tarea de evaluar consiste en medir objetivamente ciertas magnitudes resultantes de la formulación del proyecto y convertirlas en cifras financieras, para obtener indicadores útiles para medir su bondad. La evaluación puede considerarse como el ejercicio teórico mediante el cual se identifica, valora y compara entre si los costos y beneficios asociados al proyecto. Tiene por objetivo identificar las ventajas y desventajas asociadas a la inversión

en un proyecto antes de la implementación del mismo. Es un método de análisis útil para adoptar decisiones racionales ante diferentes alternativas. Para realizar un análisis económico es preciso cuantificar los costos y beneficios del proyecto a estudiar, esta identificación resulta de contrastar los efectos generados por un proyecto con los objetivos que se pretenden alcanzar con su ejecución y puesta en marcha [21].

La evaluación de un proyecto se determina mediante *indicadores de rentabilidad*, herramientas lógicas que permiten tomar la decisión de aceptar o rechazar el proyecto de manera sencilla fundamentado en el principio de la racionalidad económica. Los más usuales son valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio costo (B/C) [21].

VPN: El valor presente neto corresponde a la diferencia entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de los egresos, nos permite pasar a valor presente (P) los valores futuros (F) estipulados en el flujo de caja. Utilizando la tasa de oportunidad, se aplica una fórmula sencilla aritmética para tomar la decisión de invertir en un determinado proyecto, cuando su $VPN > 0$ [21]

Tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa de interés que equipara el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos, es la tasa de interés que permite obtener un $VPN = 0$. Si la $TIR > t_o$ (tasa de oportunidad del inversionista), significa que el retorno del proyecto es suficiente para compensar el costo de oportunidad del dinero y además produce un rendimiento adicional, por lo tanto resulta llamativo. Si la $TIR < t_o$, el proyecto no alcanza a compensar el costo de oportunidad por lo tanto no será recomendable. Para el criterio de la TIR, no se necesita conocer tasa de interés, basta con precisar una tasa de oportunidad que permita su comparación [21].

Relación Beneficio-Costo: El análisis económico del "costo - beneficio" es una técnica de evaluación que se emplea para determinar la conveniencia y oportunidad de un proyecto, comparando el valor actualizado de unos y otros [21].

4.2 ANTECEDENTES

Los procesos de tratamiento de agua están en función de la calidad de esta en las fuentes de captación, pudiendo ser tan sencillo como la desinfección, o involucrar diversas operaciones unitarias como oxidación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, además de la desinfección. En algunos casos, se llega a requerir de procesos de intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado [22].

En las sociedades modernas, el agua deja de ser un recurso netamente para el consumo humano y se convierte en el compuesto de mayor importancia a nivel industrial, en donde no sólo se utiliza como componente de los productos que fabrica, sino también como agente refrigerante u otros usos.

La evolución en los procesos de potabilización comienza en 1804 cuando Paisley (Escocia) filtraba todo su suministro de agua y en 1829 se instaló el primer filtro de arena en Londres para clarificar el agua del Támesis. En el año 1952 ya era obligatorio filtrar todos los suministros de aguas de ríos a Londres, extendiendo este sistema de clarificación a varias ciudades Europeas y Norteamericanas [23].

Paralelamente a la proliferación del filtrado, se van desarrollando otros tratamientos como la coagulación, la aireación o la desinfección. La aireación artificial se utilizaba ya en el siglo XVIII, pero no fue hasta la segunda mitad del siglo XIX cuando se convirtió en uno de los procesos principales de los abastecimientos municipales. En cuanto a la coagulación, la primera vez que se recurrió a ella para el tratamiento de suministros municipales de agua fue en el año 1881, en Inglaterra. El coagulante utilizado fue el sulfato de alúmina, añadido en el punto de toma del abastecimiento. En 1885, investigadores de la Universidad de Rutgers publicaron estudios en los que confirmaban el sulfato de alúmina como el coagulante más ventajoso de los conocidos. En la actualidad los electrolitos acompañan, y en algunos casos sustituyen, a los coagulantes tradicionales en las plantas de tratamiento [23].

La desinfección es otro de los procesos que durante milenios se han utilizado en el acondicionamiento del agua, aunque sin conocer bien sus fundamentos. Se conocen

diversos sistemas de desinfección: cloración (y sus variantes), ozonización, utilización de rayos ultravioleta, siendo la cloración el más utilizado [24].

El sistema convencional de potabilización básico comprende coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección; se incluye la dosificación y alimentación de los reactivos (sulfato de aluminio y poli electrolito como coagulantes) y gas cloro en la desinfección. Con éste sistema se puede remover fundamentalmente la turbiedad, contaminación bacteriológica y disminución en los niveles de otros parámetros [25].

Por otro lado, todas las aguas en la naturaleza contienen una cierta cantidad de sales disueltas. Estas sales se encuentran homogéneamente distribuidas en el líquido, no pueden ser detectadas a simple vista y se presentan en formas de iones o partículas cargadas positivamente o negativamente. No se conoce exactamente la fecha en que se vio la necesidad de adecuar el agua para los procesos industriales y así evitar daños y disminuir costos por el arrastre de ciertos metales a los equipos. A través de los procesos de retención de iones o desmineralización [26].

4.2.1 Experiencias Plantas Potabilización Municipales

En Colombia, no se conoce fecha exacta de la instalación de la primera planta de agua potable en el país, el devenir histórico del sector de agua potable y saneamiento, las municipalidades tenían la responsabilidad de brindar servicios de agua potable en Colombia. En la primera mitad del siglo XX se instala la primera planta con tecnología convencional en las empresas públicas de Medellín (1955) [27].

La calidad de este servicio por ser un tema de interés global, ha llevado a varias universidades del país a realizar investigaciones acerca de este tema, aportando pautas importantes en el proceso de tecnología convencional:

En 2003, la Universidad Nacional sede Manizales realizó la evaluación de la planta de potabilización de agua en las Empresas Públicas de Armenia. Este estudio muestra que para la determinación de parámetros óptimos en el proceso de mezcla rápida el factor a controlar es la turbiedad la cual se determinó por prueba de jarras. Los resultados obtenidos con esta prueba no son datos confiables debido a las limitaciones del equipo, recomendando que los

parámetros óptimos hallados para la coagulación y mezcla rápida no sean los correctos al ser aplicados al diseño de la planta. Además se llegó a la conclusión que cuando se tiene bajos índices de turbiedad no es necesario emplear ayudantes de coagulación [28].

En 2005, la evaluación a la planta Aquamana E.S.P en el municipio de VillaMary- Caldas, la cual cuenta con dos tecnologías distintas para el proceso de lavado de filtros (filtrado convencional y autolavado) en donde se estudió la efectividad de esta parte del proceso en la potabilización de agua. Se determinó que el tiempo en los procesos de lavado oscilan entre 6 y 7 minutos para filtrado convencional, mientras que para los procesos de autolavado el tiempo oscila entre 8-10 minutos. Gracias a este aporte las empresas públicas de agua recurrieron a la utilización de filtros convencionales, pues se demostró que no tiene sentido alargar el proceso de lavado [29].

En 2006, en la evaluación de la planta de agua potable del municipio de Lérica-Tolima, se determinó que la eficiencia del proceso de sedimentación en la tecnología convencional depende de la turbidez del agua sedimentada. Se concluyó que los problemas en esta etapa del proceso se tienen cuando es necesario realizar un proceso de floculación-coagulación al agua a tratar, y si estos procesos no son eficientes, la sedimentación no será la adecuada [30].

4.2.2 Experiencias Internacionales Planta de tratamiento de agua en Industrias

Simpson Tacoma Kraft LLC, es una planta de producción de ClO_2 construida en 1988, desde sus inicios, la planta ha trabajado sus procesos con agua potable, pero debido al aumento del precio de la misma Simpson ha modificado sus procesos, las modificaciones incluyen: Ampliar condensador generador de tamaño, la instalación de un nuevo sistema de dos etapas de filtración química y la sustitución de agua desmineralizada para aguas de proceso [31].

Desde octubre de 2002, Rwe Nukem Corporations (RNC) ha operado una gran escala de residuos radioactivos líquidos, el sistema modular de procesamiento incluye ultrafiltración (Uf de equipos) y sistema de recolección de sólidos. En 2006 decide instalar un sistema de desmineralización (DEMIN) con el fin de montar un sistema completo que evitara la

retención de minerales en los equipos y evitar el problema de ensuciamiento y corrosión en los mismos [32].

4.3.3 Experiencias Nacionales plantas de tratamiento de agua en Industrias

Industrias Proton Ltda, es una empresa encargada del diseño, fabricación y puesta en marcha de plantas de tratamiento de aguas para uso potable e industrial en diferentes empresas nacionales [33]. Ejemplo de ello:

- En 2001, a AsohoFrucol(Fresno-Tolima), realizó el montaje de un suavizador para agua de reposición de caldera de 50 BHP y una rata de 0,1 L/s de agua.
- En 2003, Cial (Cali), realizó este mismo montaje al sistema de caldera de 30 BHP con una rata de 0.06 L/s de agua.
- En 2006, Colceramicas (Madrid-Cundinamarca), puso marcha de un sistema de tratamiento de agua potable e industrial con capacidad de 6 L/s
- En 2007, Vanylon(Barranquilla) puso en marcha de un sistema de desmineralización 0,7 L/s
- En 2008, Quimipac (Cali) realizó el diseño, suministro, montaje y puesta en marcha de una planta de agua potable con capacidad 3L/s. Para este mismo año, Aceites Manuelita (Meta) realizó el montaje una planta de desmineralización de agua industrial para utilización en calderas de generación de vapor con capacidad de 11,7 L/s con las siguientes características para el agua de salida: conductividad: 0,2 μ S/cm y contenido de sílice 20ppb.

4.3.4 Experiencias locales plantas de tratamiento de agua en Industrias

Algunas empresas del sector Industrial de Mamonal, captan agua por medio de la estacion de gambote del canal del dique para abastecer sus plantas de tratamiento de agua. Con la particularidad de que un porcentaje del agua tratada se destina para consumo humano y el restante lo adecuan para luego llevarlo a un tratamiento especial para aguas de proceso [34]. Estas son:

- Ecopetrol.S.A

- Propilco S.A
- Mexichem S.A
- Industrias Trululu
- Abocol S.A
- Malteria Tropical

Como vemos, es una tendencia del sector contar con plantas propias de agua potable pues se convierten en empresas autosuficientes y competitivas ya que no depende de servicios externos.

4.5 ESTADO DEL ARTE

Han sido poco los avances tecnológicos que se ha tenido en los procesos de potabilización de agua. Las investigaciones realizadas a partir del año 2008 acerca de la calidad y el funcionamiento de las plantas de tratamiento se mencionan a continuación:

En 2008, estudios realizados por la universidad Manuela Beltrán, evaluaron la aplicación de coagulantes naturales para desestabilizar las partículas coloidales presentes en el agua cruda. Se comparó la eficiencia de coagulantes convencionales (Sulfato de aluminio, polielectrolito) con coagulantes alternativos (almidón de yuca y almidón de maíz). Los resultados obtenidos señalan que el almidón de maíz tiene un alto rendimiento en comparación con coagulantes convencionales, considerándose a este como una tecnología adaptable y flexible, que se puede aplicar a las condiciones de operación de las plantas de potabilización convencionales [35].

En 2009, se realizó la evaluación de la planta de tratamiento de agua potable en el municipio de Valle San Juan- Tolima, la cual cuenta con tres tipos de sedimentadores (hidráulicos, compactos y mixtos) en donde a través de diferentes experimentaciones se estudió la eficiencia y los tiempos de retención para cada sedimentador. Se determinó que los sedimentadores hidráulicos tienen una eficiencia promedio de 85,9% y un tiempo de retención de 15,6 min, mientras que los otros tipos de sedimentadores presentan eficiencias menores a 81% y tiempos de retención mayores a 30 min, razón por la cual no recomiendan su uso. Además en este estudio se estableció que para cualquier tipo de agua que presenta turbiedad menor a 5 NTU no se recomienda sedimentar si no realizar filtración directa, y que cuando el agua cruda presenta altas turbiedades mayor a 20 NTU, la eficiencia de estos equipos disminuyen como consecuencia de un pretratamiento (floculación – coagulación) deficiente [36].

La empresa Pronton.SA desde el 2009 ha realizado distintos trabajos en cuanto a diseño y montaje de plantas de tratamiento de agua de uso industrial en empresas de todo el país, como ejemplo de ello: Aceites Manuelita pone en marcha una planta de tratamiento de agua potable e industrial, con capacidad total de 45 L/s, Pelpak SA en este mismo año, puso en

marcha una planta de tratamiento de agua potable, tipo compacta, con procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración por sistema de filtros de arena verticales a presión con una capacidad de 0.27 L/s. En 2010 Itacol realizó la evaluación y puesta en marcha de una unidad de filtración por carbón activado manual y suavización automática para agua de acueducto de Bucaramanga con una capacidad de 0.7 L/s [37].

En 2010, se realizó la evaluación a la planta Manantiales E.S.P en el municipio de Manantiales-Caldas, la cual usa tecnología de tren de filtros para el proceso de potabilización. Se determinó que los filtros a diferencia de las unidades de las plantas de tratamiento convencional producen en su lavado bajas concentraciones de lodos permitiendo reincorporar estas aguas al sistema de tratamiento y requiriéndose menos cantidad de agua para los procesos de lavado, constatándose que la instalación de este tipo de sistemas son definitivamente viables debido a la reducción de costos administrativos representados en la cantidad de agua necesaria para lavar los filtros en comparación con las unidades de un proceso convencional [38].

La empresa Aceites Manuelita de nuevo en 2011 pone en funcionamiento una planta de desmineralización de agua industrial para la utilización en calderas de generación de vapor de alta presión para la generación de energía eléctrica, con una capacidad de 11.7 L/s. Con agua de salida con las siguientes características: Conductividad: 0.2 us/cm, Sílice 20 ppb. Por ultimo en 2012 Quimipac realizo el diseño, suministro, montaje y puesta en marcha de una planta de agua potable con capacidad de 3 L/s [39].

En el ámbito Internacional, En 2011 la empresa Aqualia, ubicada en las Islas Canarias-España. Promueve la construcción de una torre de intercambio iónico de lecho mixto, en una instalación experimental, por la que se circula agua industrial que es utilizada para alimentar a diferentes calderas. Se detallan y analizan los datos experimentales obtenidos con aguas brutas procedentes de pozo y desaladora, así como del agua desmineralizada. Los resultados obtenidos facultan a indicar que frente a otros procedimientos, la desmineralización es más adecuada y resulta económicamente viable para tratar el agua de calderas [40].

Por otro lado, se ha incrementado la búsqueda de nuevos floculantes para conseguir un mayor peso y cohesión en las partículas sólidas, ya que en la medida que sean mayores estas características será más fácil su eliminación. Entre las nuevas tecnologías con el fin de mejorar este proceso se encuentra los procesos de coagulación iónica donde la tecnología disocia las moléculas de los sólidos contaminantes, libera los gases al medio ambiente sin peligro, los sólidos ligeros se transforman en natas y espumas, los más pesados los precipita como lodos inertes. De igual manera el uso de la mezcla Al-Fe como Coagulante ha sido de vital interés debido a que se alcanzan flóculos de mayor tamaño en un tiempo menor respecto a los coagulantes convencionales, así como también el uso de floculantes llamados “floculantes de ultra alto peso molecular” ha sido una nueva tecnología en este campo [41].

5. METODOLOGIA

Se llevo a cabo una investigación de campo para obtener la información necesaria para llevar a cabo el proyecto. El diseño metodológico constó de la realización de ensayos de laboratorios para conocer las características del agua cruda de la Ciénaga de Dolores, una prueba de jarras para establecer los parámetros de diseño, un estudio de los diferentes sistemas de tratamiento de agua, un trabajo de diseño y evaluación económica para cumplir con los objetivos propuestos y proponer una solución a la problemática planteada.

Se desarrolló en la ciudad de Cartagena en la empresa Ajover S.A (zona industrial de Mamonal) y en las instalaciones de la Universidad de Cartagena (sede Piedra de Bolívar). El proyecto se desarrolló mediante los siguientes pasos metodológicos:

5.1 Recopilación de la información

5.1.1 Fuente de información primaria

Las fuentes de información primaria son los datos obtenidos por las pruebas experimentales realizadas al agua cruda y los resultados de la prueba de jarras realizadas en las instalaciones de la empresa.

5.1.2 Fuente de información secundaria

Para la determinación del caudal máximo de la planta, las características finales del agua, costos anuales en el servicio de agua y la tasa de inversión con la que evalúan los proyectos fueron suministradas a través de entrevistas directamente con funcionarios de la empresa Ajover S.A. Para la determinación de algunas características del agua cruda (DBO, DQO, concentración de iones) fueron suministradas por la empresa Aguas de Cartagena, la cual hace un seguimiento mensual al agua cruda que llega a las instalaciones de la empresa Ajover. S.A.

A través de las tesis de la maestría de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena, tesis de pregrado de la Universidad de San Buenaventura y de la Universidad Nacional de Manizales, se obtuvo información necesaria para aplicar las metodologías de diseño de los diferentes equipos. A través de consultas en bases de datos como Science Direct y en el portal de la empresa Dow Chemical.

5.2 Calidad de la fuente de abastecimiento

Para evaluar la calidad de la fuente de agua a tratar, se realizaron estudios y análisis físico química en los laboratorios de la empresa Ajover SA, en donde se evaluaron los siguientes parámetros al agua cruda [42]:

Tabla 1: Normas ASTM para distintas propiedades

Parámetro	Norma ASTM
Alcalinidad	D 1067
Conductividad	D 1125
PH	D 1293
Hierro	D 1068
Solidos Suspendidos	D1478
Dureza alto rango	D 1126
Turbiedad	D 1889
Cloruros	D 512
Fosfatos	D 643
Cobre	D 1668
DBO	D 1998
DQO	D1252
[IONES]	D511-09, D516-7

Fuente: Seguimiento Agua Cruda- Ajover S.A. Sistema contratado por Aguas de Cartagena S.A

Además de esto, a través de la empresa Aguas de Cartagena, se realizó un análisis al agua cruda proveniente de la ciénaga de dolores para establecer los tres últimos parámetros y constatar los resultados obtenidos en las pruebas que se mencionan en la tabla anterior. (Ver tabla A1. Anexo A)

5.3 Caudal de diseño para la planta de tratamiento

Mediante la información suministrada por la empresa Ajover S.A. (Ver tabla B1-Anexo B), se tomó el caudal máximo a trabajar según los requerimientos de agua en la empresa, 500 m³/día (5,78 L/s), el cual se destinó el 17% para consumo humano, 18% agua clarificada, 26% agua de enfriamiento y el 39 % agua para calderas.

5.4 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 (Anexo C)

5.4.1. 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 términos de la variación de pH y la remoción de turbiedad, para establecer la dosis apropiada de coagulante. El procedimiento se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903. [44]

5.4.1.1 Materiales y equipos

- 10 L muestra de agua cruda
- Equipo Test de jarras
- 6 Beakers de 1000 mL
- 6 Beakers de 100mL
- Colorímetro
- Pipeta de 10 mL
- Pera de succión
- Coagulante

5.4.1.2 Elección de Coagulante

Según experiencias anteriores y basándonos en los criterios de la norma RAS numeral C.2.2, se escogió como coagulante el sulfato de aluminio tipo A, por no reportar efectos nocivos sobre la calidad física, química o biológica del agua tratada y representar un efecto favorable sobre el tamaño del flóculo y sobre la velocidad de asentamiento. [44]

5.4.1.3 Descripción del ensayo

1. Se midió el pH y turbiedad inicial de la muestra a analizar con un colorímetro marca Hanna instruments (modelo Hi 98713)
2. Se dispuso de 6 vasos de precipitados con un litro de agua cruda en cada uno de ellos.
3. Se preparó una solución de 1 gr de alumbre adicionando agua hasta completar 100 mL, concentración: 10 mg/mL.
4. Con ayuda de la pipeta (usando pera de succión) Se le agregó una cantidad determinada de la solución anterior: 0,5mL (5mg-vaso N°1), 1mL (10mg vaso N°2), 1,5ml (15mg vaso N°3), 2 ml (20mg vaso N°2), 2,5 ml (25mg vaso N°5) y 3ml (30mg vaso N°6) esto se realizó simultáneamente.
5. Se colocó en el equipo de test de Jarras (Controagua CA-modelo CA EJ 3903), los 6 beaker, se agitó a 100 rpm durante un minuto (mezcla rápida) y luego a una velocidad lenta de 40 rpm durante 30 minutos (Floculación), dejándose sedimentar por 20 minutos (Sedimentación).
6. Se midió con el colorímetro la turbiedad y el pH final en cada una de las jarras poniendo en funcionamiento el equipo hasta que la lectura sea estable.
7. Se tabuló los resultados obtenidos y se realizó un gráfico de turbiedad sedimentada o PH contra dosis de alumbre. (Ver Anexo E)
8. De acuerdo a la tabla cc 2.2 de las Normas RAS 2000, se escogió la dosis de 30mg/mL valor correspondiente para el vaso N° 6, ya que a medida que se aumentó la concentración de alumbre, las muestras empezaron a sedimentar más flocc. [45]

5.4.2. Diseño Unidades de Tratamiento

Se realizó una revisión bibliográfica para proponer las unidades de tratamiento, de acuerdo a las características del agua cruda, el 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 Anexo C y D respectivamente.

5.4.2.1 Coagulación-Mezcla Rápida

Para la primera 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 5,78 L/s el cual se encuentra entre el Q_{min} y Q_{max} . Se asumió 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 en 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 (ΔE) y el gradiente promedio de velocidad en el resalto (G), este valor debe ser mayor a $1000 s^{-1}$. Por último se estimó la cantidad de coagulante necesitado para realizar la solución a dosificar [48]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo E.

5.4.2.2 Floculación

Para la segunda unidad de tratamiento, se escogió: ***Floculador Hidráulico de Flujo Horizontal***. Se determinó de acuerdo a la Norma Ras C.5.5.1, el número mínimo de Floculadores de Flujo Horizontal proponiendo un número de 2 unidades en donde un floculador estará en operación permanente y el otro en Stand By. 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 [49], teniendo en cuenta un tiempo en cada sección de 10 minutos y un gradiente para la sección 1, 2 y 3 de $50 s^{-1}$, $40 s^{-1}$ y $25 s^{-1}$, respectivamente.

Para cada sección del floculador, se calculó el número adimensional 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: volumen total, longitud total, profundidad de flujo, ancho de la cámara, número de pantallas, distancia entre pantallas y la velocidad de

flujo[50]. Finalmente se calculó la longitud del recorrido, la distancia libre entre el extremo de cada pantalla y la pared de la cámara, la longitud de la pantalla, el radio hidráulico de la sección y las pérdidas total (por fricción y adicionales) [51]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo F.

5.4.2.3 Sedimentación

Para la tercera unidad de tratamiento se escogió un Sedimentador de flujo horizontal. Se determinó de acuerdo a la RAS 2000 numeral C.6.5. El número mínimo de sedimentadores de Flujo Horizontal proponiendo dos unidades un Sedimentador en operación y el otro en Stand By [52]. Para su diseño como primer paso metodológico se realizó el dimensionamiento de la zona de sedimentación en la cual se determinó el área superficial (AS) que es el área donde se llevará a cabo la sedimentación con esto se establecieron las dimensiones largo, ancho y altura de manera que se cumplieran los criterios de diseño de la RAS 2000 sobre estas dimensiones y sobre la carga superficial, 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. Por último, para el sistema de drenaje de lodos se asumió un tiempo de vaciado para determinar el área de la compuerta de evacuación de los lodos[54]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo G.

5.4.2.4 Filtración

Para la cuarta unidad de tratamiento, se escogió: *Filtro rápido Medio Dual estratificado*. Se determinó de acuerdo a la Norma RAS C.7.5.1.6 el número mínimo de filtros rápido con medio dual. Para filtros con fuente externa de lavado el número mínimo de filtros es 3. [55] Se escogió la composición de lecho filtrante:

Tabla 2: Composición Lecho Filtrante

	Antracita	Arena
Te	1,2	0,5
Cu	1,5	1,4
Po	0,4	0,45
L(m)	0,45	0,3
Ss	1,55	2,6

Fuente: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.7.5.1.1, pag C 64

Se seleccionó inicialmente la tasa de filtración y el método de control del filtro.[57] Posteriormente se calculó: relación largo-ancho, área de filtración, dimensiones del filtro. Se seleccionó el medio de soporte y de drenaje [58]. Se calcularon las pérdidas del filtro en operación (pérdidas en: el lecho estratificado, lecho de grava, soporte y en la tubería)[59]. Luego, se calculó la velocidad de lavado o fluidización[60], para calcular las pérdidas del filtro durante el proceso de lavado. Finalmente, se diseñó la canaleta de lavado[61]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo H.

5.4.2.5 Desinfección

Se calculó la cantidad de agua a desinfectar, que corresponde al 17% del caudal diario esto es $85 \text{ m}^3/\text{día}$, se escogió como desinfectante el Hipoclorito de Calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})$) o HTH con la cual se eligió como dosificador adecuado una bomba dosificadora y se calculó la dosis óptima de desinfectante (mg/L) y caudal necesario de solución de HTH para el proceso de desinfección [62]. Se asumió un tiempo de contacto entre el rango establecido

con el fin de determinar las dimensiones de la cámara o tanque de contacto [63]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo I.

5.4.2.6 Intercambio Iónico

Para el proceso de desmineralización de agua se seleccionó los procesos de intercambio iónico. Para el diseño de estos equipos, inicialmente se calculó el caudal máximo de agua para el tratamiento de desmineralización, correspondiente al 65% del caudal máximo diario. Se determinaron las características del agua clarificada y del agua desmineralizada o de salida. Se estableció un valor aumentado para los cationes de 5% y para los aniones de 8%, teniendo en cuenta la variación de las condiciones del agua, en las diferentes épocas del año, con lo cual se determinó la carga iónica para este caudal (CC)

Para el diseño de las columnas de intercambio catiónico y aniónica: se seleccionó el fabricante del material, luego se calculó la oferta iónica, volumen necesario de resina. Se realizó el dimensionamiento de las columnas, calculando: área de paso, altura del lecho, expansión máxima del lecho, altura del lecho expandido, altura de la resina inerte, velocidad de flujo, el volumen total del lecho de resina y la relación de esbeltez (altura/diámetro)[64]. Se diseñó el proceso de regeneración, estableciendo la velocidad y tiempo de compactación [65], 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 de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo J.

5.4.2.7 Tuberías y Bombas

Las dimensiones y material de las tuberías dependerán de la línea de instalación. Para la selección del tipo de tubería normalizada o comercial, se calculó el diámetro interno necesario por medio de la Ecuación de Continuidad, la cual depende fundamentalmente de la velocidad lineal sugerida del líquido y del caudal del mismo. Una vez que se obtuvo el

diámetro interior, se hizo uso de las tablas de tuberías, en las que se encuentra el valor del diámetro nominal, presión nominal y diámetro externo. Se tomó el diámetro nominal inmediatamente superior al diámetro obtenido [66].

La planta de tratamiento constará de 9 bombas centrifugas [ver Anexo xxx], las cuales 6 se encargarán de permitir el suministro de agua cruda a las diferentes unidades de tratamiento, estas estarán duplicadas por razones de seguridad. El resto de bombas serán las encargadas de suministrar las soluciones para el lavado de filtro y la regeneración de las resinas de intercambio iónico. Además de esto se dispone de dos bombas dosificadoras que suministrarán la solución de coagulante y de HTH en las respectivas unidades.

El cálculo de la potencia requerida por la bomba se realizó a través de la ecuación de Bernoulli en la cual se tuvo en cuenta la carga de presión, la carga estática, la carga de velocidad y la pérdida por fricción producida por accesorios y/o equipos. Para el cálculo de carga de presión se asumieron las condiciones más restrictivas, para la carga estática se tuvieron en cuenta la altura de desempeño de q cada bomba. La pérdida de carga se calculó a través de la ecuación de Fanning la cual depende del factor de fricción que se obtuvo mediante el diagrama de Moody teniendo en cuenta el régimen de flujo que se determinó a través del número de Reynolds y el factor de rugosidad. La potencia requerida finalmente será la obtenida aplicando la ecuación de Bernoulli antes mencionada. Se realizaron los cálculos de verificación para determinar si con esta potencia podría existir cavitación en las bombas mediante el cálculo del NPSHA y NPSHR[67]. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de estos equipos, se muestra en el anexo K.

5.4.2.8 Tanques

Se diseñaron 8 tanques: (1) tanque de almacenamiento de alúmina, (3) tanques de agua de lavado de filtro, (1) tanque de agua clarificada, (1) tanque de almacenamiento de HTH, (1) tanque mezcla de agua con H_2SO_4 y (1) tanque mezcla de NaOH con agua. Para esto se determinó el volumen necesario de sustancia a almacenar, se calculó el radio usando la ecuación de superficie mínima [68] y se determinó la longitud del tanque y el volumen. Finalmente se asumió un factor de seguridad de 10% y con esto se recalculó el volumen del

tanque. El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo L.

5.4.2.9 Tratamiento de Residuos

La norma RAS C.13.3.1 establece los lechos de secado de lodos, como el método más apropiado para eliminar los lodos que se producen en los procesos de sedimentación y filtración. Se propuso como método de tratamiento de lodos los lechos de secado, para esto se estimó la cantidad de lodo producida diariamente para así diseñar el depósito donde se llevará a cabo el secado de los lodos [69]. El agua usada para el lavado de la resina se diseñó un sistema de tubería para enviar esta agua contaminada hacia la planta de tratamiento de aguas de la empresa (PTAR). El Procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de este equipo, se muestra en el anexo M.

5.4.3. Métodos de Control

Se consultó de acuerdo a la Norma Ras [70] el sistema de control recomendado. Luego, se clasificó los parámetros que se pueden controlar manualmente y automáticamente, finalmente se cotizó con la empresa *Instrumatic Control* [71] los indicadores, válvulas, controladores e instalación del sistema de control. El tipo de control para las diferentes propiedades, se muestra en el anexo N.

5.4.4 Evaluación Económica

1. Los costos de materiales y equipos, se obtuvieron mediante cotizaciones realizadas en diferentes puntos de venta locales, nacionales e internacionales [72, 73, 74, 75]. Los costos por obras civiles se obtuvieron mediante presupuestos realizados por ingenieros civiles expertos en el tema. Finalmente se escogieron los proveedores que brindaron

mayor comodidad económica. El presupuesto del proyecto se muestra en la tablas O1-06 del Anexo O]

2. Para cálculos económicos, se asumió una vida útil de 10 años (como mínimo) suponiendo que la empresa Ajoever S.A no de a esta planta el uso y mantenimiento adecuado que esta necesite para garantizar el funcionamiento de esto
3. Se realizó una proyección del consumo de agua en los próximos 10 años, que inicia con un consumo de 264 m³/día aumentado progresivamente (teniendo en cuenta futuros proyectos de expansión y aumento en la producción) hasta 500 m³/día que representa el caudal máximo de operación de la planta. (Tabla O7- Anexo O)
4. De acuerdo con el Decreto 4742 sobre tasas de utilización de aguas en industrias [76], se estableció el costo del m³ de agua y los costos de insumos (reactivos) por año. Para esto, se consultó el índice de precio al consumidor (IPC) de acuerdo al escenario macroeconómico que maneja el Banco de la Republica de Colombia [77] (Tabla O8- Anexo O)
5. Se estimaron los flujos del proyecto, teniendo en cuenta que el flujo de inversión corresponde a los costos de construcción de la planta, los flujos positivos representan el ahorro económico por la implementación de la planta y los flujos negativos corresponden a la compra de insumos anual. No se tuvo en cuenta los costos de energía por bombeo, pues la empresa cuenta con un sistema de generación de energía (cogeneración), la cual produce más energía eléctrica de la que se necesita exportando energía al sistema eléctrico de la zona. Tampoco, los costos por operador, pues la empresa cuenta con personal encargado para la supervisión de los sistemas de aguas. Tabla O14- Anexo O)
6. **Calculo de tasa interna de retorno (TIR):** Se usaron los flujos proyectados, y utilizando la función TIR de la herramienta informática Microsoft Excel 2010

7. *Calculo de valor presente neto (VPN):* se calculó el costo de capital promedio ponderado (WACC) [78], consultando: tasa de interés del Banco de la Republica, rentabilidad libre de riesgo[79] y rentabilidad del mercado [80], finalmente se utilizó la función VPN de la herramienta informática Microsoft Excel 2010 para evaluar el proyecto.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 DISEÑO DE LAS INSTALACIONES

6.1.1 Canaleta Parshall

En esta unidad se lleva a cabo el control de caudal que ingresa a la planta de tratamiento de agua por medio de un medidor de flujo en este caso se utilizará un tubo Pitot 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 unidad. Previo a este equipo se encuentra una malla para la retención de sólidos suspendidos que puedan venir al agua.

Esta estructura se construirá directamente sobre el terreno con el uso de bloques de concreto fundido con concreto reforzado para obtener una 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 cruda. La dosificación del coagulante se llevará a cabo a través de una bomba dosificadora Serie Magdos: accionamiento tipo solenoide, caudal hasta 115 l/h, presión máx. 16 bares. El procedimiento de cálculo se muestra en Anexo E. El dimensionamiento de este equipo dio como resultado:

Tabla 3: Dimensionamiento Canaleta Parshall

Ancho de garganta (W)	7,6 cm
Ancho de Canal (B)	40,7 cm
Longitud de resalto(Lj)	40 cm
Altura de rampa (hc)	2 cm
Dosis de sulfato de aluminio	30 mg/L

Fuente: Autores

6.1.2 Floculador de flujo horizontal

Los floculadores horizontales serán construidos en concreto. El fondo de la unidad será construido con una pendiente igual a la pérdida 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 removibles de concreto prefabricados para que sea más fácil realizar la limpieza del equipo; el sistema de sujeción es un listón de madera, en el borde superior de cada pantalla, tomando también la longitud de la vuelta para sujetarlas en las paredes laterales del tanque. Con esto, se busca mantener las pantallas estables y alineadas, estas se sujetarán con otros a través de pernos perpendiculares, para mantener constante el ancho de los canales. El procedimiento de cálculo se muestra en Anexo F. El diseño de este equipo dio como resultado:

Tabla 4: Dimensionamiento Floculador Hidráulico

Volumen(V)	10,42 m³
Profundidad (h)	1m
largo(l)	5m
Ancho total (W)	2,1m
Ancho sección(w)	0,7m

Fuente: Autores

En la tabla 5, se muestra las características de cada sector:

Tabla 5: Características Sectores Floculador Hidráulico

	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Distancia entre tabiques(<i>e</i>)	0,15m	0,17m	0,19m
Tabiques (<i>N</i>)	34	28	23
Velocidad de flujo(<i>v</i>)	0,11 $\frac{m}{s}$	0,09 $\frac{m}{s}$	0,08 $\frac{m}{s}$
Longitud del recorrido (<i>Lt</i>)	65,71m	56,7m	47,7 m
Longitud tabique(<i>l</i>)	0,47m	0,44m	0,41m
Radio Hidráulico (<i>R_i</i>)	0,03m	0,06m	0,07m
Pérdida total (<i>htotal</i>)	0,08m	0,04m	0,032m

Fuente: Autores

6.1.3 Sedimentador de flujo horizontal

En esta estructura se lleva a cabo el proceso de sedimentación en el cual se remueve la carga de solidos 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 módulo 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 transversal, 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 de múltiple, para recolectar los lodos sedimentados y sacarlos hacia los digestores por medio de una válvula de apertura rápida la cual genera un tiro adecuado para realizar la purga de dichos lodos. El

procedimiento de calculo se muestra en Anexo G. El diseño de este equipo dio como resultado las siguientes características:

Tabla 6: Dimensionamiento Sedimentador de Flujo Horizontal

Ancho (B)	1,3m
Longitud(L)	4,47m
Profundidad(H')	0,88 m
Numero de orificios- pantalla de entrada(n)	20
Disposición orificios (Arreglo Rectangular)	4 columnas – 5 filas
Espaciamiento entre filas de orificios(a_1)	0,096m
Espaciamiento entre columnas de orificios (a_2)	0,5m
Área compuerta de lodos (A_2)	0,001m²

Fuente: Autores

6.1.4 Columnas de filtración

Las columnas están rellenas por material adsorbente: arena y carbón antracita, los cuales se encargan de retener los sólidos en suspensión que pueda llevar el agua y que puedan afectar la calidad del agua desinfectada y desmineralizada. En operación normal, la disposición de las válvulas será tal que trabajarán dos filtros y uno en Stand By. De acuerdo a la Norma RAS C.7.5.1.6, para filtros con fuente externa de lavado, como en este caso, es necesario la instalación de 3 equipos para garantizar la completa operación de la planta.

El material a emplear será Acero al carbón A-285, que es uno de los aceros más usados en la construcción de recipientes a presión. El depósito está dispuesto de forma vertical, con carcasa cilíndrica y fondo toriesferico tipo Korboggen. Los filtros usarán como material de soporte la grava para evitar el escape de pequeñas partículas de arena y/o antracita durante el proceso de operación o el lavado. Además, contará con un controlador de presión del lecho el cual indicará el momento a realizar el proceso de lavado. El procedimiento de calculo se muestra en Anexo H. El dimensionamiento de este equipo dio como resultado:

Tabla 7: Dimensionamiento Columna de Filtración

<i>Largo(m)</i>	0,73
<i>Ancho(m)</i>	1,1
<i>Area Filtracion (m²)</i>	2,375
<i>Lecho de grava(m)</i>	0,45
<i>Lecho de arena(m)</i>	0,45
<i>Lecho de antraicta(m)</i>	0,4
<i>Perdida total (m)</i>	1,29
<i>Perdida durante el lavado (m)</i>	0,1287

Fuente: Autores

6.1.5 Columnas de intercambio iónico

En estas columnas es donde se desarrollará el proceso de intercambio iónico, existe una columna para cada tipo de intercambiador. Las columnas están rellenas cada una con su respectiva resina de intercambio iónico.

El material a emplear será acero inoxidable 316, por su alta resistencia a la corrosión y grandes prestaciones en servicios con ácido sulfúrico y soda, que son los regenerantes para la resina catiónica y aniónica respectivamente. Se usará 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 toriesférico de tipo Korbboogen. Estas columnas tendrán 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.
- Limitadores de lecho, uno para retener el lecho de resina activa y el otro para retener el lecho de resina inerte y un
- Sistema de distribución para distribuir el caudal de alimentación de agua en la operación normal (parte superior) y otro para distribuir el caudal regenerante en la etapa de regeneración en la parte inferior:

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

Tabla 8: Dimensionamiento Columnas de Intercambio Iónico

<i>Columna</i>	<i>Cationica</i>	<i>Anionia</i>
Diámetro De la columna (D_c)	1m	1m
Área de paso de la columna (A)	0,79 m ²	0,79 m ²
Altura del lecho (h_l)	0,35m	0,51m
Altura del lecho expandido (h_{le})	0,39m	0,61m
Altura del lecho inerte (h_i)	0,32m	0,39m
Altura de la zona libre (h_{fb})	0,023 m	0,042 m
Altura cilíndrica (h_c)	0,73 m	1,04 m
Volumen de resina inerte (V_I)	0,25 m ³	0,3 m ³
Velocidad lineal del liquido (V)	0,005 $\frac{m}{s}$	0,005 $\frac{m}{s}$
Volumen del lecho(BV)	0,85m ³	0,78m ³
Relación Altura/ Diámetro (esbeltez) ($\frac{H}{D}$)	1,11	1,04
$P_{columna}$ (Kg)	577	636

Fuente: Autores

Además, en el medio de las columnas se instalará un desgasificador, en el cual se hará pasar el agua descationizada en sentido descendente por un relleno de anillos Rasching, en donde se pone en contacto en contracorriente con un flujo de aire para producir la desorción del dióxido de carbono, con el fin de a remover los iones carbonatos que se forma tras un intercambio catiónico y así conseguir una mayor eficiencia en el intercambio aniónico. Este equipo se construirá de PFVR por ser un material capaz de resistir las fuerzas mecánicas a las cuales estará sometido operativa, estará dispuesta en forma vertical con carcasa cilíndrica, el agua resultante del paso por este equipo será utilizada para la regeneración de la columna catiónica.

6.1.6 Depósitos

6.1.6.1 Tanque de Almacenamiento de solución HTH

En este depósito se almacenará la solución de HTH, la cual será utilizada para el proceso de coagulación en la unidad de mezcla rápida canaleta Parshall. Este tanque estará fabricado de PVRF.

6.1.6.2 Tanque de Cloración

En este depósito se llevará a cabo el proceso de desinfección por medio de la solución de HTH, desde aquí se abastecerá agua a los procesos que requieran agua potable. Este tanque estará fabricado de PVRF (Fibra de Vidrio) y tendrá de una bomba dosificadora modelo Watson Marlow de la empresa JESCO.

6.1.6.3 Tanque de Agua Clarificada

En este depósito se almacenará el agua, que ha sido tratada desde la captación hasta la filtración, desde aquí se abastecerá agua hacia el proceso de desinfección, desmineralización y a cualquier proceso de la empresa que requiera limpieza de moldes y/o mano de obra. El material a emplear será concreto fundido.

6.1.6.4 Tanque de Agua Desmineralizada

En este depósito se almacenara el agua, que ha sido tratada en la instalación de intercambio iónico y se abastecerá agua a todo los procesos que la empresa requiera. Además, de este depósito se tomará agua para diluir la sosa para regenerar la resina aniónica. El material a emplear al igual que los filtros será Acero al carbón A-285.

6.1.6.5 Tanques de Regenerantes

En estos depósitos se almacenará los compuestos regenerantes para cada uno de las resinas de intercambio: ácido sulfúrico al 8% para regenerar la resina catiónica y sosa al 2% para la

resina aniónica. 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 fondo planos.

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

Tabla 9: Dimensionamiento Tanques

<i>Tanque</i>	<i>P(m³)</i>	<i>R(m)</i>	<i>D(m)</i>	<i>L(m)</i>	<i>V(m³)</i>
Agua Clarificada	20,84	1,49	2,97	4,72	11,46
Agua Potable	7,3	0,945	1,89	1,5	3,54
Agua desmineralizada	13,54	1,29	2,58	4,08	7,45
Lavado filtro	4,28	0,88	1,76	2,76	2,35
Alúmina	0,062	0,22	0,44	0,65	0,03
HTH	0,00216	0,072	0,15	0,21	0,002
Regeneración catiónica	0,05	0,20	0,41	0,61	0,0275
Regeneración aniónica	0,02	0,148	0,30	0,44	0,011

Fuente: Autores

6.1.7 Tuberías

La planta consta de 16 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 como el caso de solución de sulfato de aluminio, solución de HTH, solución de hidróxido de sodio y solución de ácido sulfúrico.

Se utilizarán tuberías de PVC (Policloruro de Vinilo) para todas las corrientes de la planta, por su resistencia a cualquier tipo de corrosión, su inercia química y su bajo costo. 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 no, de manera que no permite que se obstruya el flujo transversal. Se utilizarán válvulas de diafragma en la dosificación del coagulante, desinfectante y adición de cal para corrección de pH 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 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 la siguiente tabla:

Tabla 10: Dimensionamientos Tuberías

	Línea	D (in)	Q (m^3/s)	V (Ft/s)	ID_N (in)	OD_N (in)	Nominal pipe size
Alimentación de agua cruda	1	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
Canaleta Parshall-Floculador	2	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
T-101-Canaleta Parshall	3	2,76	0,0062(m^3/h)	5	3,068	3,5	3
Floculador – Sedimentador	4	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
Sedimentador-Filtros	5	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
Filtro- T-102(Tanque de aguas claras)	6	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
T-102 - Torre Catiónica	7	3,08	0,0038	4	4,026	4,5	4
Torre Catiónica-Desgasificador	8	3,08	0,0038	4	4,026	4,5	4
Desgasificador – Torre Aniónica	9	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3
T-103-Torre Catiónica	10	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3
T-104- Torre Aniónica	11	2,75	0,0016	4	3,068	3,5	4
Torre Aniónica-Tanque Agua Desmineralizada	12	2,75	0,0016	4	3,068	3,5	4
T-102- Cámara de Desinfección	13	1,27	3,54 (m^3/h)	4	3,068	3,5	4
T-105- Cámara de Desinfección	14	0,3	2,16 $\frac{L}{h}$	5	0,824	1,050	¾
T106-Filtro	15	4,05	0,01	4	4,026	4,5	4
Desgasificador-T-103	16	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3

Fuente: Autores

6.1.8 Bombas

Para el suministro de agua y solución de reactivos a las diferentes unidades de tratamiento se utilizarán un total de 12 bombas centrífugas de diferentes modelos dependiendo del fluido a transportar. Para el suministro de agua en las respectivas unidades se contará con 10 bombas centrífugas de la empresa ITT Industries modelo 3656/3676 S-Group, de las cuales 5 estarán duplicadas por razones de seguridad y mantenimiento, estas son las que suministran el agua de un unidad a otra hasta el tanque de agua clarificada, para impulsar el agua a través de cada filtro para su lavado se utilizan 3 bombas y las dos restantes se utilizan para el suministro de agua al proceso de intercambio iónico.

Las otras dos bombas centrífugas restantes Serie X – 3196 se utilizarán para hacer pasar a los respectivos regenerantes por sus respectivas columnas de intercambio iónico, produciéndose de esta manera la regeneración de las resinas.

El dimensionamiento de las bombas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11: Características de las Bombas

BOMBA	POTENCIA(hp)
P-101	0,83 ≈ 1
P-102	2,23
P-103	3,01
P-104	2,92
P-105	2,7
P-106	2,5
P-107	1,79
p-108	1,89
P-109	0,45 ≈ 1
P-110	0,35 ≈ 1
P-111	0,45 ≈ 1
P-112	1
P-113	2,5

Fuente: Autores

6.1.9 Tratamiento de lodos

El método que será adoptado para el tratamiento de lodos de la planta de tratamiento, son los lechos de secado generalmente están equipados con bases de arena y grava y tubería de

drenaje. El tiempo de secado dependerá de las condiciones climáticas pueden oscilar entre uno o dos días o varias semanas : el lodo seco se puede remover fácilmente para luego ser transportado a los sitios de disposición final donde puede ser aprovechado debido a la gran cantidad de minerales como abono.se aplican lodos de capas de 15 a 30 cm. El número mínimo de unidades de secado debe ser 2 con drenaje y tubería perforada 4", capa de arena de 15 a 25 cm de espesor con un tamaño efectivo de 0,3 a 1,2 y lecho de grava de 20 cm a 30 cm de espesor. El dimensionamiento del lecho de secado se muestra a continuación:

Tabla 12: Dimensionamiento Lecho de Secado

Ancho (<i>B</i>)	0,8m
Profundidad (<i>L</i>)	2,4m
Altura (<i>h</i>)	0,2m
Espesor capa de arena	0,10m
Espesor capa de grava	0,05m

Fuente: Autores

La distribución de los equipos y las líneas de tuberías se requiere de un área de 42 m x 30 m lo que corresponde a 1260 m², y la empresa dispone de un área de 3200 m² para futuras expansiones/ proyectos. En el anexo P, se muestra las actividades de mantenimiento de la planta [81, 82, 83], y en el Anexo Q, el diagrama de procesos de la planta y una descripción grafica de los equipos.

6.2 RESULTADO EVALUACION ECONOMICA

Los valores de los indicadores de rentabilidad obtenidos tras aplicar la metodología planteada para la evaluación económica (Ver Anexo O), se muestran en la tabla 12

Tabla13: Resultados Indicadores de Rentabilidad

<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	47%
<i>Valor Presente Neto (VPN)</i>	\$ 1.445.724.857,96

Fuente: Autores

6.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Para determinar la factibilidad del proyecto desde el punto de vista financiero, se tomaron en cuenta, criterios ampliamente aceptados como la TIR y VPN, para conocer si el proyecto conviene o no a la empresa.

Aplicando, el criterio de VPN (valor presente neto) se analizó el flujo de fondo del proyecto, descontando la tasa del costo de capital promedio ponderado WACC (6,10%) y se obtuvo un $VPN = \$1.445.724.857,96$, resultado mayor que cero, lo que indica, que la inversión generará riqueza a la empresa, es decir, la inversión hecha al proyecto rendirá más que la tasa del costo de capital de descuento, o del costo de oportunidad, por tanto el proyecto es rentable y muy atractivo para los inversionistas, en este caso la Empresa Ajoever S.A.

Aplicando, el criterio TIR (tasa interna de retorno) se comparó con el costo de capital promedio ponderado WACC (6,10%), esta es la tasa de descuento que se utilizó para actualizar los flujos de fondos de un proyecto y corresponde a la rentabilidad que el accionista le exigirá al proyecto al renunciar a un uso alternativo de estos recursos. Luego de calcular la TIR de los flujos de caja del proyecto, se obtuvo un valor de (47%), el cual es mayor al WACC, lo que significa que el proyecto renta más de lo que se obtuviese en inversiones alternativas.

Estos dos criterios de evaluación de proyectos, muestran indicadores de rentabilidad que permiten determinar que invertir \$437.384.530,83 en la construcción y operación de la planta de tratamiento de agua de la empresa, es una inversión rentable y segura ya que representan ahorros económicos de 38% por año, 18% más de lo esperado en la hipótesis planteada inicialmente. Además, analizado el sector, observamos que la instalación de plantas de tratamiento de agua potable en otras empresas del Sector Industrial de Mamonal (Ecopetrol, Propilco, Abocol, Maltería Tropical), muestran que la mejor alternativa para resolver el problema de disponibilidad de agua, es, a través de la implementación de

sistemas independiente de suministro de agua en este caso una planta de tratamiento de agua cruda, que les garantice ahorro y disponibilidad continua de este recurso.

7. CONCLUSIONES

El diseño y análisis del sistema de tratamiento de aguas de la empresa Ajover S.A (Sector Industrial de Mamonal), se elaboró a través de un estudio realizado a los diferentes sistemas de tratamiento de agua potable e industrial, con base a las normas y conceptos presentados por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.

Teniendo en cuenta las características del agua cruda captada del Canal del Dique (zona Ciénaga de Dolores) en diferentes épocas del año, siguiendo los parámetros y recomendaciones sugeridas, y de acuerdo a las necesidades de la empresa Ajover S.A 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, dos floculadores hidráulicos de flujo horizontal, dos sedimentadores de flujo horizontal, tres equipos de filtración rápida terminando con un tratamiento de desinfección y el tren de desmineralización, está conformado por una resina de intercambio catiónico, un desgasificador y una resina de intercambio aniónico. 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 agua que la empresa Ajover S.A necesita.

Además de esto, realizada la evaluación económica del proyecto, la implementación del sistema de tratamiento de agua en la empresa Ajover S.A, es una alternativa viable, desde el punto de vista financiero. Tanto el VPN como la TIR arrojaron resultados positivos. Por un lado, el VPN es mayor que cero, lo que indica que el proyecto es factible y puede generar riqueza. Y por otro, la TIR es mayor que la tasa de costo de capital promedio ponderado, lo que hace que el proyecto sea viable y atractivo para los accionistas de la empresa Ajover S.A.

Con la implementación de esta planta, en la empresa Ajover S.A se disminuirán los costos de producción ya que según los resultados se obtendrán ahorros económicos del 38% confirmándose la hipótesis planteada inicialmente, no habrá dependencia de suministros externos y consolidará a la empresa como una de las más competitivas del Sector Industrial de Mamonal.

7. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO Y ASPECTO SOCIAL

7.1 Importancia del Estudio

Este proyecto aporta a la solución de las necesidades de la industria local específicamente la empresa Ajovert S.A, 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 entre el programa de Ingeniería Química y la zona Industrial de Mamonal.

7.2 Aspecto Social

Para la ejecución de las obras inherentes a la implementación de la planta de tratamiento de aguas y sus actividades complementarias se obtendrán licencias para aquellas actividades que puedan producir deterioro grave a los recursos que sirven de apoyo económico para las comunidades asentadas en este territorio, tal como lo expresen las disposiciones legales vigentes.

8. RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

8.1 Recomendaciones

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

- **Coagulación e intercambio iónico:** Instalación de una columna catiónica y aniónica respectivamente, para garantizar total operación de desmineralización y en caso tal de que una columna falle, se ponga en funcionamiento la que se encuentra en Stand By y no se afecte el proceso. Por las mismas razones anteriores, se recomienda instalar otra canaleta Parshall
- **Dilución de regenerantes:** Instalar un sistema de bombas dosificadores de regenerantes, para no hacer la dilución manual.
- **Lodos Residuales:** Usar coagulantes poliméricos como sustitución al Sulfato de Aluminio, para disminuir hasta en un 50% los lodos residuales. Además, adoptar equipos mecánicos de limpieza de lodos en el proceso de sedimentación, para que este proceso se haga automáticamente y no se necesite de un operador que realice la operación de cerrar y abrir válvulas para este fin.
- **Ampliación o Instalación de una nueva Poza de Agua:** Para garantizar almacenamiento del agua que se necesita.
- **Revisión del contador de Agua Cruda:** Para corroborar que el rango de medición de este si satisfaga el caudal nuevo a tratar.

La comparación de este proyecto con estudios previos de implementación de sistemas de tratamientos de aguas en empresas del Sector industrial de Mamonal 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, el costo de

inversión, el costo de operación, la calidad final del agua y por tanto el porcentaje de ahorro que tuvieron las empresas del Sector con la implementación de sus sistemas de tratamientos de Agua.

9. REFERENCIAS

- [1] Denton, M.S.1; Ahrendt, M.1; Wilson, J.H.1 1RWE NUKEM Corporation, 3800 Fernandina Road, Columbia, SC 29210 2007
- [2] Experiencias en diseño, fabricación y puesta en marcha en operaciones de plantas de tratamiento de aguas .industrias PROTON LTDA [consulta el 2 de octubre de 2012].Disponible en: <http://www.proton-colombia.com/es/images/ptap.pdf>
- [3] Consulta Personal Interno Corporación Autónoma Regional Canal del Dique. Benjamín DiFillipo.
- [4] Di B. Métodos e técnicas de tratamento de agua associacao brasileira. 3a Ed. Sao Paulo: engenharia sanitaria e ambiental; 2003.
- [5] Pérez JA. Manual de potabilización de agua. Medellín: Universidad nacional de Colombia; 1997
- [6]Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 49
- [7]Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.4.4.1.1, pag C36
- [8] Bratby, J. R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 73, n.o 6, junio, 1981, pp. 312–318.
- [9] Bhargava, D. S. y C. S. P. Ojha. “Models for Design of Flocculating Baffled Channels”, *Water Research*, vol. 27, 3, 1993.
- [10] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000 , pag 90
- [11] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000
- [12]Ramalho, R.S. Tratamiento de aguas. Ed. Reverté, S.A, 2005

[13] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 197

[14] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 315.

[15] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente Ciclo: Tratamiento, Serie: Desinfección. Manuales IV, V Organización Panamericana de la Salud. Oficina Regional de la Org. Mundial de la Salud, División Salud y Ambiente. Washington D.C., EE.UU.

[16] [17] Arboleda V. Teoría y práctica de la purificación del agua. 2a Ed. México: McGraw Hill; 2000

[17] C.J. Gabelich, M.D. Williams, A.Rahardianto, J.C. Franklin, Y. Cohen, High-recovery reverse osmosis desalination using intermediate chemical demineralization, J. Membr. Sci. 301 (2007) 131

[18] Larios A, Mujíca V [página web en línea] [consulta: 2012, octubre 4] Disponible:<http://www.aquaplant.el/aguadulce/implementos/index.htm>

[19] Brown, T. ,Le May E., y Burten B. Química la ciencia central. 7a Ed. México: pretince Hill hispanoamericana; 1998

[20] Larios A, Mujíca V [página web en línea] [consulta: 2012, octubre 4] Disponible:<http://www.aquaplant.el/aguadulce/implementos/index.htm>

[21] Baca, U. Evaluación de proyectos. 5a Ed. México: Mc Graw Hill; 2011

[22] Arboleda v, “Teoría y práctica de la purificación del agua”, 3a ed. Colombia: McGraw Hill; 2000

[23] J Marquez, Tratamiento de agua, [página web en línea] [consulta: 2012, octubre 4] Disponible:http://www.elaguapotable.com/tratamiento_del_agua.htm

[24] White C. The handbook of chlorination and alternative disinfectants. 3a Ed. New York: 1992.

[25] Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. [Página web en línea] [Consulta 29 de Julio de 2012]. Disponible en: http://www.cra.gov.co/apc-afiles/37383832666265633962316339623934/5._Sistemas_de_potabilizacion.pdf

[26] Shaposhnik, N, Zubets, B.E. Mill and I.P. Strygina, Demineralization of water by electro dialysis with ion-exchange membranes. Elsevier Science. 2000; 38(24): 50-6

[27] Prada A, Soluciones individuales en potabilización de agua a pequeña escala. 3a Ed. Argentina: McGraw Hill; 2002

[28] Martínez G. Evaluación de la planta de potabilización de agua en las empresas públicas de Armenia. Manizales: Universidad Nacional de Manizales; 2003

[29] Garzón O, Rosas W. Evaluación de la planta de potabilización de agua del municipio de VillaMary “AQUAMANA ESP”. Manizales: Universidad Nacional de Manizales; 2005

[30] Cárdenas J, León J. Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lérida. Manizales: Universidad Nacional de Manizales; 2006[33] Hinck, Matthew L.; Rollbuhler, Tom L. Expansion of a chlorine dioxide plant: Mechanical aspects and demineralized water supply for success, Membr. Sci. 2002

[31] Simpson Tacoma Kraft Company, LLC [página web en línea] [consulta: 2012, octubre 5] Disponible: [http://www.simpson.com/Contact-Us/Contact-Us-\(1\).aspx](http://www.simpson.com/Contact-Us/Contact-Us-(1).aspx)

[32] Denton, M.S.1; Ahrendt, M.1; Wilson, J.H.1 IRWE NUKEM Corporation, 3800 Fernandina Road, Columbia, SC 29210 2007

[33] Experiencias en diseño, fabricación y puesta en marcha en operaciones de plantas de tratamiento de aguas .industrias PROTON LTDA [consulta el 2 de octubre de 2012]. Disponible en: <http://www.proton-colombia.com/es/images/ptap.pdf>

- [34] Consulta Personal Interno Corporacion Autonoma Regional Canal del Dique (CARDIQUE). Benjamin DiFillipo
- [35] Rodríguez J, Lugo I, Rojas A y Malvaer C. Evaluacion del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. Bogotá :Universidad Manuela Beltrán;2008
- [36] Castillo N. Evaluación de la planta de tratamiento del municipio Valle de San Juan-Tolima. Manizales: Universidad Nacional de Manizales; 2009
- [37] Experiencias en diseño, fabricación y puesta en marcha en operaciones de plantas de tratamiento de aguas .industrias PROTON LTDA [consulta el 2 de octubre de 2012].Disponible en: <http://www.proton-colombia.com/es/images/ptap.pdf>
- [38] Martínez F. Evaluación económica de la recirculación de aguas de lavado proveniente de las unidades de filtración rápida de la planta de potabilización los manantiales. Manizales: Universidad Nacional de Manizales; 2010
- [39] Experiencias en diseño, fabricación y puesta en marcha en operaciones de plantas de tratamiento de aguas .industrias PROTON LTDA [consulta el 2 de octubre de 2012].Disponible en: <http://www.proton-colombia.com/es/images/ptap.pdf>
- [40] Pedro Susial Badajoz, J. C. González Bauza, J. A. Peña. Localización: Tecnología del agua, ISSN 0211-8173, N° 198, 2000, págs. 42-53R
- [41] Kuusik R, Viisima A. A new dual coagulant for water purification Elsevier Science: 2000;30(15): 45-7
- [42]ASTM international y desarrollo global de normas. [Consulta el 2 de octubre de 2012]- Disponible en: http://www.astm.org/GLOBAL/images/swb_spanish.pdf
- [43]Seguimiento Agua Cruda- Ajover S.A. Sistema contratado por Aguas de Cartagena S.A
- [44] [Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), Norma Técnica Colombiana 3903, Gestión Ambiental. Procedimiento para el Método de jarras en la Coagulación-Floculación del Agua, 2011.
- [44] Álvarez J, Ensayos de Jarras, Curso de Tratamiento de Aguas, Departamento de ingeniería ambiental, Universidad de los Andes, 2009

- [45] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.2.2, pag C 22
- [46] Pedroza E, Serie Autodinámica de Medición, Tecnología hidráulica, 2007
- [47] Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Manual V: Diseño. Tomo I. Criterios de diseño para la dosificación y mezcla rápida. Lima, CEPIS/OPS, 1992
- [48] Vargas L, Diseño de Mezcladores Hidráulicos Cap II, [consulta el 3 de Marzo de 2013]. Disponible en: <http://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/111/pdf>
- [49] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.5.5.1, pag C 46
- [50] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 90.
- [51] Ruiz L, Diseño de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable en la Cabecera Municipal de Montecristo, Departamento De Bolívar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cartagena, 2007, pag 48
- [52] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.6.5.1.1, pag C53
- [53] Canepa de Vargas L, Guía para el Diseño de Desarenadores y Sedimentadores, [consulta el 20 de Marzo de 2013]. Disponible en: <http://www.bvsde.opsoms.org/tecapro/documentos/agua/158esp-diseno-desare.pdf>
- [54] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 163.
- [55] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.5.5.1, pag C 46
- [56] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.7.5.1.1, pag C 64
- [57] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 204
- [58] Diseño del sistema de filtracion con la tecnologia de Falsos fondos marca itt leopold para la implementacion del lavado de filtros. Empresa Jorge Triana y Cia Ltda-empresa Empopasto S.A E.S.P, 2009, Pasto

[59] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 229.

[60] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 219.

[61]Ruiz L, Diseño de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable en la Cabecera Municipal de Montecristo, Departamento De Bolívar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cartagena, 2007, 73

[62] Ente Nacional de Obras Hídricas de saneamiento, Desinfección, Cap. X [consulta el 4 de abril de 2013]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/123790292/ENOHSa-Fundamentaciones-Desinfeccion>

[63] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.8.5, C 79

[64]CARRILLON, A. Diseño de una planta de intercambio de Iones para producir agua desionizada de proceso. Universidad de Cádiz-España, 2007, pag 189.

[65] Resinas AMBERLYST. [Consulta 29 de Abril]. Disponible en: http://www.carloerbareagenti.com/Repository/DIR005/ES/catchem100_sez2_resin_es.pdf

[66] Ludwig E, Applied Process Desing for Chemical and petrochemical plants, 3ª ed, volume 1, pag 80

[67] Diseño de equipos e instalaciones, Tuberías y Bombas, Cap. V [consulta el 25 de abril de 2013]. Disponible en: http://web.usal.es/~tonidm/DEI_05_Bombas_compresores.pdf

[68] CARRILLON, A. Diseño de una planta de intercambio de Iones para producir agua desionizada de proceso. Universidad de Cádiz-España, 2007, pag 201.

[69] Méndez A. Tratamiento de Lodos, Cap. VIII[consulta el 4 de Mayo de 2013]. Disponible en http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/capitulo8.pdf

[70] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.11.7, pag C 104

[71] Consulta personal interno “Instrumatic Control”, Ing. Cristina Páez A. [Consulta 6 Mayo-2013]

[72] Consulta personal interno “Useche & Cia”, Sr Julio Useche. [Consulta 4 Mayo 2013]

[73] Sistema de Tratamiento de Agua. Ingeniería y Servicios Técnicos Integrales de Venezuela [consulta el 5 de Mayo de 2013]. Disponible en: http://www.insatecnica.com/s_tratamientodeagua.html

[74] Mexichem Colombia S.A.S, PAVCO. [Consulta el 5 de Mayo de 2013]. Disponible en: <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=9>

[75] Catalogo bombas, ITT Industries, Goulds Pump, [página web en línea][Consulta 7 de Mayo de 2013 Disponible en <http://www.gouldspumps.com/Home/>]

[76] Consulta personal interno Quimicos y Esencia RI, Andrea Suarez [Consulta 8 Mayo]

[77] Presidencia de la Republica, Decreto 4742 de 2005, Tasas por utilización de aguas,[página web en línea][Consulta 10 de Mayo de 2013 Disponible <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18725>

[78] Banco de la República de Colombia, Series Estadísticas Índice de Precio al Consumidor [Consulta 15 de Mayo de 2013 Disponible http://www.banrep.org/series-estadisticas/see_precios.htm]

[79] Villareal Samadiego J, Administración Financiera II, Cap. 1, 2007, ISBN-13: 978-84-691-6192-0, N° Registro: 08/80955, pag34

[80] Bolsa de Valores de Colombia, Rentabilidad del Mercado, [Consulta 15 de Mayo de 2013 Disponible en: <http://www.bvc.com.co/pps/tibco/portalbvc>

[81] Romero JA. Purificación del agua. 2a Ed. Medellín: Escuela Colombia de ingeniería; 2000, pag 247

[82] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.4.4.1.1. pag C170

[83] Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, sección II, Título C, numeral C.4.4.1.1. pag C174.

ANEXO A: Caracterización Agua Cruda

Tabla A-1: Caracterización Agua Cruda Ajovert

DOLORES																	
2012	fecha	ene	feb	Mar	Abr	may	Jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	PROMEDI O	MAXIM O	MINIM O	
pH in situ	UpH	6,87	7,05	7,28	7,09	6,89	7,04	6,90	6,81	6,96	7,30	7,06	6,89	7,01	7,30	6,81	
temperatura	°C	29,2	29,6	31,6	31,9	30,3	32,8	30,0	29,1	30,3	28,7	27,3	28,3	29,9	32,8	27,3	
Oxígeno disuelto	mg/L	4,0	6,0	3,7	4,5	6,0	7,0	6,8	1,0	6,8	3,6	4,1	4,7	4,8	7,0	1,0	
Color	UC	24	27	14	23	33	33	27	16	16	28	32	26	25	33	14	
Turbiedad	UNT	2,1	2,5	1,8	2,1	2,0	1,5	3,2	1,4	1,8	7,6	6,2	5,6	3,2	7,6	1,4	
Cloruros	mg/L	15,4	17,2	22,0	23,0	24,7	20,8	21,5	18,7	28,4	41,7	33,1	34,8	25	42	15	
Sulfatos	mg/L	18,5	21,5	12,8	17,4	15,8	15,5	15,3	5,2	6,6	16,3	9,6	8,3	14	22	5	
Dureza total	mg/L	71	77	65	81	84	79	78	69	76	75	81	78	76	84	65	
Ca	mg/L	20,1	21,1	18,4	21,5	28,4	23,8	21,6	21,9	22,6	21,8	24,5	20,8	22	28	18	
Mg	mg/L	5,1	5,9	4,6	6,7	3,2	4,8	5,8	3,5	4,7	5,0	4,8	6,3	5	7	3	
Conductividad	uS/cm	214	231	214	208	244	249	263	226	274	292	243	228	241	292	208	
Alcalinidad Total	mg/L	72	73	57	61	67	69	67	65	72	61	58	62	65	73	57	
Materia orgánica	mg/L	4,2	4,5	6,0	8,6	6,2	6,7	7,2	6,7	5,9	6,6	4,3	5,8	6,1	8,6	4,2	
Amonio	mg/L	0,089	0,041	< 0,013	0,019	0,048	0,138	0,102	< 0,013	0,054	0,09	< 0,013	0,022	0,07	0,14	0,02	
Nitritos	mg/L	0,093	0,216	0,119	0,05	0,04	0,05	0,133	0,054	0,061	0,07	0,055	0,017	0,08	0,22	0,02	
Nitratos	mg/L	3,0	< 2,2	< 2,2	< 2,2	< 2,2	3,6	5,5	7,4	< 2,2	2,8	2,6	3,5	4,05	7,40	2,58	
Fluoruros	mg/L	0,247	0,276	0,140	0,222	< 0,1	0,175	0,456	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,303	0,26	0,46	0,14	
Hierro	mg/L	0,11	0,10	0,03	0,06	0,10	0,53	0,06	0,02	0,03	0,14	0,07	0,11	0,11	0,53	0,02	
Sólidos Totales	mg/L	145	158	146	140	145	149	205	151	178	181	209	202	167	209	140	

DBO	mg/L	3,2	4,4	9,3	5,4	6,9	6,5	9,9	6,2	6,1	2,6	1,3	1,5	5,28	9,90	1,30
DQO	mg/L	< 50	< 50	< 50	< 50	87	62	< 50	< 50	70	< 50	< 50	< 50	73,00	87,00	62,00
Manganeso	mg/L	< 0,03	0,05	0,03	0,05	< 0,03	< 0,03	0,04	0,04	0,03	< 0,03	< 0,03	0,04	0,04	0,05	0,03
Sodio	mg/L	13,7	14,2	17,6	15,6	14,5	15,3	14,5	13,5	16,5	21,0	19,0	18,2	16,1	21,0	13,5
SST	mg/L	10,3	x	2,5	X	x	X	X	2,0	x	X	x	5,6	5,10	10,30	2,00
Coliformes Totales	NMP/100 mL	170	20	700	490	330	170	7,8E+01	7,0E+02	230	110	45	x	277	700	20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	20	2	400	490	230	170	7,8E+01	7,0E+02	2,3E+02	78	20	x	220	700	2
E. coli	UFC/100 mL	0	0	124	8	7	7	20	10	0	28	0	x	19	124	0
Fosfatos	mg/L	0,171	x	0,058	0,039	0,175	0,099	0,057	0,039	0,079	0,135	0,159	0,056	0,10	0,18	0,04

Fuente: Estudio Aguas de Cartagena, Agua Cruda Ajover

ANEXO B: Caracterización corrientes de Agua Ajover S.A

TablaB-1: Caracterización corrientes de agua Ajover S.A

Fuente: Personal Interno Ajover S.A

ANEXO C: 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 L/s pero generalmente se utilizan en plantas con caudales pequeños menores a 10 L/s. La mezcla rápida se produce gracias a la generación de un resalto hidráulico que causa un gradiente de velocidad de alrededor de 1.000 s. Estas unidades tienen la ventaja que involucran la medición del caudal de ingreso a la planta. ¹

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 recomendado para caudales menores a 50 L/s, usando pantallas de asbesto-cemento, siempre y cuando no se tenga aguas acidas o agresivas. ²

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

- De acuerdo a evaluaciones realizadas en plantas de América Latina y Japón, los cortos circuitos y espacios muertos que se producen son mínimos, de tal modo que el tiempo de retención teórico 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 un funcionamiento continuo y economizan energía eléctrica
- Se autorregulan cuando se producen variaciones de caudal, haciendo que el número de Camp se mantenga más o menos constante

3. Sedimentadores Horizontales: Se utilizan en plantas pequeñas donde se manejan caudales menores a 50 L/s, 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. Están 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 un sumidero para la recolección de lodos.³

Está constituida 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 sedimentadas y la zona de recolección de lodos que está constituida por un tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, una tubería y una válvula para su evacuación periódica.

4. Filtro rapido medio dual estratificado: En tratamiento de aguas, el filtro por gravedad es el tipo de filtro mayormente usado en tratamiento de aguas. Con los filtros rápidos de medio dual estratificado, se obtiene mayor eficiencia en la operación de filtración, menores perdidas del lecho en el lavado, y por trabajar con velocidades de filtración alta, los requerimientos de área son mínimos.

5. Desinfeccion con Hipocloritos: Es el tipo de desinfeccion más utilizado por su bajo costo y facil manejo, estas sustancias siempre se dosifican en solucion. El hipoclorito de calcio se disuelve para formar un solucion a la concentracion deseada, y el hipoclorito de sodio se diluye para alcanzar esa concentracion para la medicion se usan rotametros, bombas dosificadoras y los equipos de orificio a carga constante.⁴

6. Intercambiador iónico: 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 ⁵:

- 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 verterlos.

- Metodo de destilación presenta un elevado consumo de energía y no elimina totalmente los elementos que contiene el agua
- Metodo de Osmosis 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 las resinas, se seleccionó sistema en contracorriente por las siguientes razones:

- Alta eficiencia química
- Menor consumo de 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 más eficiente debido a que el agua atraviesa capas de resina cada vez mejor regeneradas.
- Tiempo de regeneración menores
- Menor volumen de regenerante
- Instalación y control simple

7. Lecho de secado de lodos

En general los residuos de una planta de tratamiento proviene de las operaciones y procesos como:

- Coagulación
- Sedimentación simple
- Lavado de filtros

Los residuos de la coagulación química están constituidos, básicamente, por el lodo de los sedimentadores. El lodo está compuesto por los precipitados de aluminio o de hierro, provenientes del uso de alumbre o de ales de hierro como coagulantes, así como material orgánico e inorgánico removido, arena, arcilla, limo, polímeros o ayudas de coagulación usados , y por el agua de arrastre utilizada para su transporte. Generalmente los lodos de los sedimentadores de agua coagulada son estables, no se descomponen rápido ni causan problemas de septicidad.

La operación de lavado de filtro produce un lodo o agua residual de concentración de lavado de sólidos, la cantidad puede ser del orden del 2 al 6 % del agua filtrada y los sólidos son los retenidos en el filtro durante la carrera de filtración. La porción de sólidos retenido en el filtro depende del tipo de pre tratamiento y de tipo de filtro.

ANEXO D: Parámetros de diseños de equipos

Los siguientes criterios son establecidos por 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 numeral C.4.5.2.1 los siguientes criterios de diseño:

- La velocidad mínima en la garganta debe ser mayor de 2 m/s.
- La velocidad mínima del 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 numeral C.5.5.5.1 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 flóculos 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 70 s⁻¹ y el tiempo de retención entre 20 y 30 minutos
- La longitud de floculador, se escoge generalmente entre 6 a 12 m
- La profundidad del floculador, se escoge generalmente entre 1 a 2 m
- 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 diseño del Sedimentador horizontal se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de diseño según las RAS C.6.5.1.1:

- Periodo de operación 24 h/día
- Tiempo de retención máximo de 2 – 4 h
- Carga superficial debe estar entre 15 – 60m³/m²/día
- Carga superficial baja 15 – 30m³/m²/día
- Carga superficial alta 35 – 60m³/m²/día
- La velocidad horizontal máxima del flujo de agua debe ser 1cm/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

$$\frac{L}{H} = \frac{V_H}{V_S}$$

- La compuerta de evacuación de lodos A_2 debe mantener la relación

$$A_2 = \frac{A_s \sqrt{H}}{4870 t}$$

- Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a 1/5 o 1/6 de la altura (H) a partir de la superficie del agua y los más bajos entre 1/4 o 1/5 de la altura (H) a partir de la superficie de fondo
- La velocidad en los orificios se debe sumir menor de 0,15m/s para no crear perturbaciones
- La planta de tratamiento debe contar como mínimo con 2 unidades de sedimentación diseñadas teniendo en cuenta el total del caudal de diseño, por razones de seguridad y mantenimiento.

4. Filtro de gravedad de Medio Dual

Para el diseño de filtros rápidos de medio dual se tuvieron en cuenta según la RAS 2000 numeral C.7.5 los siguientes criterios de diseño:

- Debe formarse una interfase de los dos materiales donde ellos se juntan, que no puede ser mayor a 0.15 m. Por tanto los tamaño de los granos de cada lecho deben ser tales que el diámetro del medio de antracita más grueso (que va encima: d_1) sea como máximo cuatro a seis veces mayor que el diámetro del medio menor de arena (d_2) que va debajo. ($d_1 = 4$ a $6 d_2$).
- El lecho de soporte que sustenta la arena debe ser de grava, con unas dimensiones y características que dependen del sistema de drenaje adoptado.
- Para lechos de antracita sobre arena y profundidad estándar, la tasa máxima es de $300 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{día})$, siempre y cuando la calidad del floc lo permita.

- La altura del agua sobre el lecho puede ser variable o constante, según el tipo de control que se use pero no puede ser inferior a 0.5 m. El lecho filtrante en ningún momento debe trabajar seco.
- La hidráulica del filtro debe diseñarse para que como mínimo pueda disponer de 2 m de pérdida de carga durante la carrera de filtración. La sumatoria de los descensos de nivel en un filtro de tasa variable declinante durante la carrera debe ser por lo menos igual a 2.0 m.
- Cuando el lavado de los filtros se hace con fuente externa (tanque de lavado), el número mínimo de unidades deben ser tres; y para lavado mutuo el número mínimo de unidades debe ser cuatro.

5. Desinfección

Según la RAS 2000 numeral C.8.5 se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- El tiempo de contacto no debe ser menor a 20 min.
- La cámara de contacto debe estar provista de baffles o pantallas.
- La determinación de la dosis de desinfectante debe hacerse con el método concentración tiempo.

ANEXO E: Dimensionamiento Canaleta Parshall

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 Q max en esta tabla

Tabla E-1: Dimensiones de la Canaleta Parshall

Dimensiones de la canaleta Parshall (cm)	Q(m ³ /s) Ha(m)																	
	Q= aH ^{1,5}																	
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 L/s	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 L/s	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 - 55L/s	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 L/s	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 L/s	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 L/s	30,5	137,2	134,4	61	84,5	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	149,2	5,1	7,6	0,69	1,522	0,69Ha ^{1,522}
7 4,3 - 700 L/s	45,7	144,9	142	76,2	102,6	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	167,6	5,1	7,6	1,054	1,538	1,054Ha ^{1,538}
8 12 - 950 L/s	61	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	185,4	5,1	7,6	1,426	1,55	1,426Ha ^{1,55}
9 17 - 1400 L/s	91,5	167,7	164,5	122	157,2	91,5	61	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	222,3	5,1	7,6	2,182	1,566	2,182Ha ^{1,566}
10 37 - 1900 L/s	122	183	179,5	152,5	193,8	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	271,1	5,1	7,6	2,935	1,578	2,935Ha ^{1,578}
11 60 - 2400 L/s	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 L/s	182,5	213,5	209	213,5	266,7	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	344,2	5,1	7,6	4,515	1,595	4,515Ha ^{1,595}
13 115 - 3450 L/s	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 L/s	244	244	239,2	274,5	340	91,5	61	91,5	7,6	22,9	61	45,7	417,2	5,1	7,6	6,101	1,606	6,101Ha ^{1,606}
15 250 - 5660 L/s	305	274,5	427	366	475,9	112	91,5	183	15,3	34,3	---	---	---	30,5	22,9	7,463	1,6	7,463Ha ^{1,6}

Fuente: Serie Autodinámica de Medición, Tecnología hidráulica, Pedroza E.

Para el caudal de diseño de 5,78L/s, se escogió un $W = 7,6 \text{ cm}$

2. Se escogieron los parámetros N y K de la tabla E1 y se calculó la altura de agua:

$$Q = KH_a^N$$

$H_a = \text{nivel del agua (m)}$

$$Q = \text{caudal} \frac{m^3}{s}$$

$$H_a = 0,35 \text{ m}$$

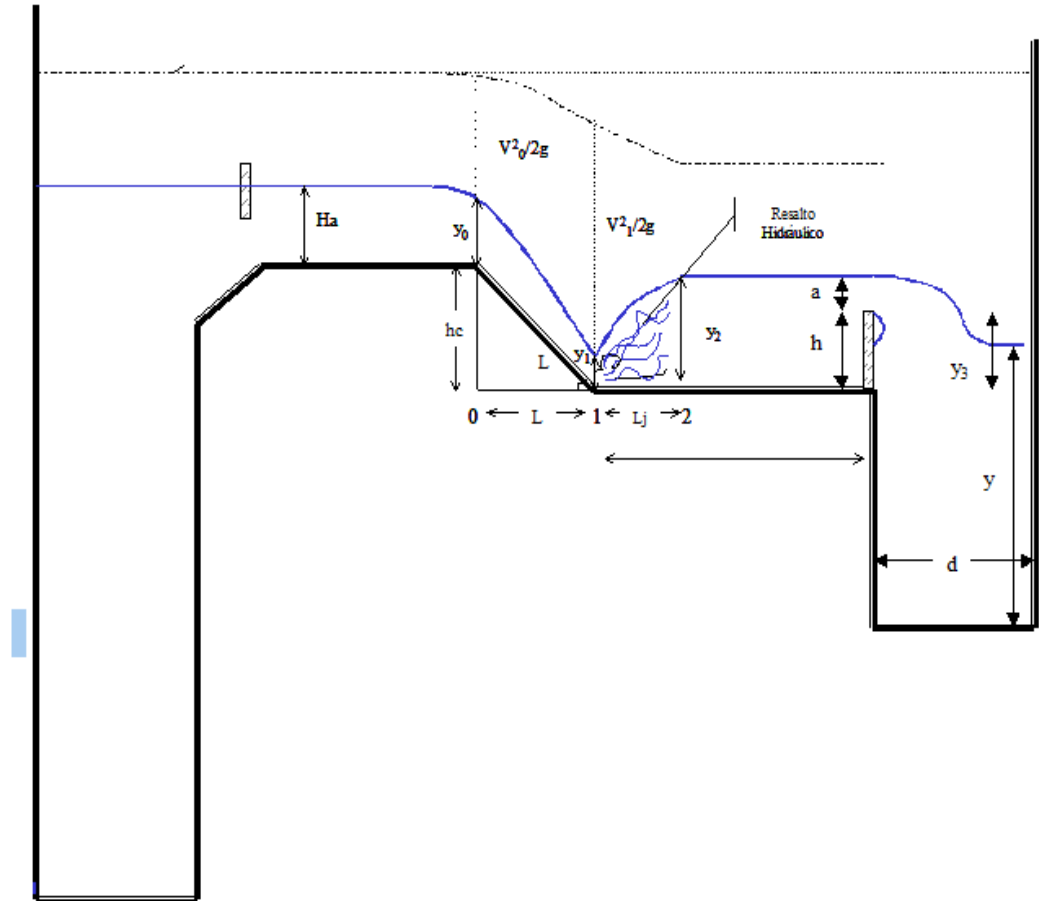
3. Se determinó el ancho del canal de la zona de resalto utilizando la tabla E1.

$$B = 45,7 \text{ cm}$$

4. Se fijó el Número de Froud (F) en el punto 1 de la canaleta donde inicia el resalto este es el punto donde se dosificará la solución de coagulante (Fig E1), para resaltos estables este número debe estar entre 4.5 y 9. Por experiencia, para unidades de caudal similares a este proyecto, se tomó el Numero de Froud como:

$$F = 9$$

Figura E2: Corte longitudinal canaleta Parshall



Fuente: Serie Autodinámica de Medición, Tecnología hidráulica, Pedroza E.

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

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

$$y_1 = 0,006 \text{ m}$$

6. Se determinó la velocidad media en la sección 1

$$v_1 = \frac{Q}{By_1}$$

$$v_1 = 2,15 \frac{m}{s}$$

7. Se calculó la altura de la lámina de agua en la sección 2, esta corresponde a la altura que se produce después del resalto.

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{g} + \frac{2y_1v_1^2}{g}}$$

$$y_2 = 0,0718 \text{ m}$$

8. Se calculó la velocidad media en la sección 2

$$v_2 = \frac{Q}{By_2}$$

$$v_2 = 0,18 \frac{m}{s}$$

9. Se determinó la longitud del resalto (L_j)

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

$$L_j = 0,40 \text{ m}$$

10. Se calculó la velocidad media en el resalto

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

$$v_m = 1,17 \text{ m/s}$$

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

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

$$t = 0,34 \text{ s}$$

12. Se calculó la pérdida de energía en el resalto (ΔE)

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

$$\Delta E = 0,1702 \text{ m}$$

13. Se utilizó la tabla E2 para determinar la relación del peso específico respecto a la temperatura ambiente con esto, se halló el gradiente promedio de velocidad en el resalto.

$$G = \left(\frac{\gamma \Delta E}{\mu T} \right)^{0,5}$$

$$G = 2390 \text{ s}^{-1}$$

Este valor debe ser mayor a 1000 s^{-1}

Tabla E-2: Variación de la viscosidad y peso específico del agua respecto a la temperatura

temperatura	$(\gamma/u)^{0,5}$
0	2336,94
4	2736,53
10	2920,01
15	3114,64
20	3266,96
25	3374,08

Fuente: Propuesta de Diseño Canaleta Parshall, Juárez R, Cap.IV

14. Se calculó la altura de la rampa por medio de la siguiente relación :

$$h_c = \frac{h_2}{3}$$

$$h_c = 0,02 \text{ m}$$

Dosificación de coagulante

15. Se calculó la cantidad en Kg/h 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 30 mg/L

$$q = QD$$

$$q = 173,4 \text{ mg/s}$$

$$q = 0,625 \text{ Kg/h}$$

16. Se calculó el caudal de solución de coagulante que se dosificará en el resalto de la canaleta Parshall.

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

$$C = 10\text{mg/mL}$$

$$Q_{\text{solucion coagulante}} = 0,062 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 62 \text{ l/h}$$

ANEXO F: Floculador Hidráulico de Flujo Horizontal

Floculador Hidráulico de flujo horizontal

1. Se determinó de acuerdo a la Norma Ras C.5.5.1, el número mínimo de Floculadores de Flujo Horizontal:

$$N = 2 \text{ Floculadores}$$

Un floculador en operación y el otro en Stand By

2. 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 F-1: parámetros diseño floculador

Sección	Tiempo (min)	Gradiente (s^{-1})
1	10	50
2	10	40
3	10	25

Fuente: Prueba de Jarras-Autores

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

$$C = \left[\frac{G_1 + G_2 + G_3}{3} \right] T$$

$$C = \left[\frac{50 + 40 + 25}{3} \right] (30min) \frac{60 \text{ seg}}{1min} = 69000$$

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

4. Se calculó el volumen total del floculador

$$V = Qt$$

Q : caudal (m^3)

t: tiempo (min)

$$V = 10,42 \text{ m}^3$$

5. Por experiencia, para unidades de caudal similares a este proyecto, asumió la longitud total y profundidad de flujo:

$$L(m) = 5,1$$

$$h(m) = 1$$

6. Se calculó el Ancho útil del floclador:

$$W = \frac{Q}{Lh}$$

L: Longitud (m)

h: profundidad (m)

$$W = \frac{10,42 \text{ m}^3}{(5\text{m})(1\text{m})} = 2,1\text{m}$$

8. Se calculó el ancho de cada cámara:

$$w = \frac{W}{3}$$

$$w = \frac{2,1\text{m}}{3} = 0,7\text{m}$$

8. Se calculó el número de pantallas para la primera sección del floclador, usando la expresión de Ritcher:

$$N = \left\{ \left[\frac{1\mu t}{\rho(1,44 + f)} \right] \left[\frac{HLG}{Q} \right]^2 \right\}^{1/3}$$

$$N = \left\{ \left[\frac{(0,000734 \text{ } Ns/m^2)(30min)(60)}{(1000Kg/m^3)(1,44 + 0,5)} \right] \left[\frac{(1m)(5m)(50s^{-1})(86400)}{500m^3/dia} \right] \right\}^{0,33} = 94$$

10. Se calculó la distancia entre pantallas:

$$e = \frac{L}{N} = \frac{5m}{94} = 0,05m$$

La norma Ras C.5.5.1, para una mejor limpieza de estos equipos recomienda una distancia mínima de 15 cm entre pantallas, por tanto se recalculó el número de pantallas:

$$N = \frac{L}{e} = \frac{5m}{0,15m} = 34$$

11. Se calculó la velocidad de flujo

$$v = \frac{Q}{A} = 0,11 \frac{m}{s}$$

12. Se calculó la longitud del recorrido:

$$Lt = vt = (0,11 \text{ } m/s)(10min)60 = 65,71m$$

13. Se calculó la distancia libre entre el extremo de cada pantalla y la pared de la cámara de floculación

$$d = 1,5e = 0,225m$$

14. Se calculó la longitud de la pantalla:

$$l = W - d = 0,7m - 0,225m = 0,47m$$

15. Se calculó el radio hidráulico

$$R_i = \frac{eh}{2e + 2h}$$

$$R_i = \frac{(0,15m)(1m)}{2(0,15m) + 2(1m)} = 0,03m$$

16. Calculo de Perdidas:

16.1 Perdida por fricción según Manning

$$h_{f1} = \left(\frac{0,013v}{R^{2/3}} \right)^2 Lt$$

$$h_{f1} = \left(\frac{0,013(0,11 \text{ m/s})}{(0,03m)^{2/3}} \right)^2 (65,71m) = 0,018m$$

16.2 Perdida adicional

$$h_{f2} = \frac{3(n-1)v^2}{2g}$$

$$h_{f2} = \frac{3(34-1) \left(0,11m/s \right)^2}{2 \left(9,8m/s^2 \right)} = 0,04m$$

La pérdida total será:

$$htotal = h_{f1} + h_{f2}$$

$$htotal = 0,018m + 0,04m = 0,058m$$

En la tabla D4, se muestran las dimensiones del floculador:

Tabla F-2: Dimensiones Floculador

Volumen(V)	10,42 m³
Profundidad (h)	1m
largo(l)	5,1m
Ancho total ((W)	2,1m
Ancho sección(w)	0,7m

Fuente: Autores

En la tabla F3, se muestra las características de cada sector

Tabla F-3: Características de cada sector

	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Distancia entre tabiques(e)	0,15m	0,18m	0,19m
Tabiques (N)	34	28	27
Velocidad de flujo(v)	0,11 $\frac{m}{s}$	0,09 $\frac{m}{s}$	0,08 $\frac{m}{s}$
Longitud del recorrido (Lt)	65,71m	56,7m	47,7 m
Longitud tabique(l)	0,47m	0,44m	0,41m
Radio Hidráulico (R_i)	0,03m	0,06m	0,07m
Pérdida total (htotal)	0,08m	0,04m	0,032m

Fuente: Autores

ANEXO G: Sedimentador de Flujo Horizontal

1. Se determinó el área superficial A_s que corresponde a el área de la zona de sedimentación, asumiendo una velocidad de sedimentación de $V_s = 0,0011m/s$, este valor se toma de la literatura recomendada:

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$
$$A_s = 5,25m^2$$

2. Se calcularon las dimensiones del Sedimentador. Para esto se asumió un ancho del Sedimentador $B = 1,3m$. De acuerdo con esta asunción se determinó la longitud de la zona de sedimentación L_2

$$L_2 = \frac{A_s}{B}$$

$$L_2 = 4,04m$$

3. Se asumió la distancia de separación entre la entrada y la pantalla difusora

$$L_1 = 0,7m$$

4. Se calculó la longitud de la unidad completa

$$L_1 + L_2 = 4,74 m$$

5. Se verificó que se cumplieran la relación (L/B) que debe estar entre 3-6.

$$L/B = 3,7$$

6. Se asumió la profundidad del Sedimentador

$$H = 0,8m$$

7. Se verificó que se cumplieran la relación L/H que debe estar entre 5- 20

$$L/H = 5,9$$

8. Se calculó la carga superficial para verificar los criterios de diseño de las RAS 2000

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

$$CS = \frac{500m^3/dia}{(4,7m)(1,3m)(2)}$$

$$CS = 40 m^3/m^2dia$$

9. Se determinó la velocidad horizontal de la unidad

$$V_H = \frac{100Q}{BH}$$

$$V_H = 0,55 cm /s$$

10. Se calculó el tiempo de retención

$$T_o = \frac{A_s H}{3600 Q}$$

$$T_o = 0,20 h$$

$$T_o = 727,27 s$$

11. Se asumió la pendiente en el fondo de la unidad de 10%

12. Se calculó la altura máxima del equipo

$$H' = H + 0,1H$$

$$H' = 0,88 \text{ m}$$

13. Se calculó la altura del agua sobre el vertedero

$$H_2 = \left(\frac{Q}{1,8B} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H_2 = 0,018 \text{ m}$$

La entrada del agua a los sedimentadores debe ser realizada por un dispositivo hidráulico como las pantallas perforadas capaces de distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme, de igual intensidad y dirección. Para los sedimentadores el dispositivo de entrada a la unidad debe trabajar con un gradiente igual al de la última cámara de floculación. El trayecto entre las dos unidades debe ser lo más corto posible, por lo cual los floculadores deben quedar próximos a la estructura de entrada de los sedimentadores.

14. Se determinó el número de orificios

$$A_o = \frac{Q}{V_o}$$

$A_o = \text{Area total de los orificios}$

$V_0 =$ *velocidad en los orificios, esta se asume con un valor de 0,1m/s*

$$A_o = 0,06 \text{ m}^2$$

15. Se asumió un diámetro de orificio

$$d = 0,06 \text{ m}$$

16. Se calculó el área de cada orificio

$$a_o = \pi r^2$$

$$a_o = 0,0028 \text{ m}^2$$

17. Se calculó el número total de orificios

$$n = \frac{A_o}{a_o}$$

$$n = 20$$

$a_o =$ *area de cada orificios*

$n =$ *numero de orificios*

18. Se determinó la altura de la pantalla difusora con orificios

$$h = H - \frac{2}{5} H$$

$$h = 0,48 \text{ m}$$

19. Se asumió el número de filas de orificios

$$n_f = 5$$

20. Se calculó el número de columnas

$$n_c = \frac{20}{5} = 4$$

21. Se determinó el espaciamiento entre filas

$$a_1 = \frac{h}{n_f} = 0,096m$$

22. Se determinó el espaciamiento entre columnas

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2}$$

$$a_2 = 0,5m$$

23. Se calculó el área de la zona de evacuación de lodos

$$A_2 = \frac{A_s \sqrt{H}}{4870 t}$$

Dónde:

A_2 = *seccion del tubo de desague m2*

A_s = *area superficial*

H = *profundidad del sedimentador*

t = *tiempo de vaciado*

Según las normas RAS 2000 el tiempo máximo de vaciado debe ser de 6 h, por tal motivo se asumió un tiempo de vaciado de 1 hora, por lo tanto

$$A_2 = 0,001m^2$$

ANEXO H: Filtro rápido lecho dual estratificado

1. Se determinó de acuerdo a la Norma Ras C.7.5.1.6 el número mínimo de filtros rápido con medio dual. Para filtros con fuente externa de lavado el número mínimo de filtros es 3
2. Se escogió la composición de lecho filtrante:
3. Se calculó la relación largo-ancho:

$$\frac{B}{L} = \frac{2N}{N + 1}$$

B: ancho (m)

L: largo (m)

N: número de filtros

$$\frac{B}{L} = 1,5$$

4. Se escogió una tasa de filtración según la literatura, para lechos de antracita sobre arena de profundidad convencional, la tasa máxima de filtración corresponde a $\frac{300 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$ según el reglamento de agua potable y saneamiento. De acuerdo a esto la tasa de filtración seleccionada para el diseño fue:

$$q = \frac{280 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

5. Se calculó el área de filtración:

$$A = \frac{1,33Q}{q}$$

$$A = \frac{1,33 \left(\frac{500 \text{ m}^3}{\text{día}} \right)}{\frac{280 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}} = 2,375 \text{ m}^2$$

6. Se determinaron las dimensiones del filtro:

$$L = \frac{A}{\left(\frac{B}{L}\right)}$$

$$B = L \left(\frac{A}{L}\right)$$

$$L = 0,73m$$

$$B = 1,1 m$$

7. Se seleccionó como medio de soporte, un lecho de 0,45m de grava

8. Se seleccionó para el drenaje: Falso fondo con viguetas prefabricadas, el cual está diseñado para asegurar una larga estabilidad en la operación, ser resistente a cambios en la pérdida de carga, uniformidad de flujo u otros efectos que podrían causar pérdida de eficiencia en la operación del filtro. Además de esto su principal función, es permitir la captación uniforme de agua filtrada, la distribución uniforme de agua de retrolavado sobre el área total del piso del filtro. El falso fondo son bloques de polietileno de alta densidad, impermeable y resistente a la corrosión. El bloque es de tipo campana, este sistema está diseñado para resistir una temperatura máxima de 93,3 °C durante el lavado.

9. Se determinó las pérdidas del filtro en operación.

9.1 Perdidas en el lecho estratificado:

9.1.1 Se realizó la distribución o tamizado del lecho de acuerdo a los filtros rápidos duales convencionales.

9.1.2 Para cada zona (diámetro) del lecho se calculó:

- Numero de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{qd}{\nu}$$

q: velocidad de filtracion

d: diametro particula

v: viscosidad

- Coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{24}{N_{Re}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re}}} + 0,34$$

- Parámetro sumatoria:

$$\sum \frac{P_i}{d_i} C_d$$

P_i: Porosidad

9.1.3 Se calculó la perdida en el lecho, para la arena y antracita, de acuerdo a la ecuación de Rose:

$$h_{li} = 0,178L \frac{q^2}{gPo} \frac{\alpha}{\beta} \sum \frac{P_i}{d_i} C_d$$

Los resultados se muestran en las tablas H1y H2, la escala de los tamices para este equipo, se tomó a las especificaciones mas usadas para filtros rápido de medio dual:

Tabla H-1: Parámetros perdida del lecho de antracita

ANTRACITA						
tamiz	<i>d_i</i>(cm)	<i>X_i</i> (%retenida)	<i>N_{re}</i>	<i>C_d</i>	<i>P_i/d_i</i>	
8 a 12	0,00225	0,05	8,72	4,55	22,22	101,09
10 a 12	0,0018	0,15	6,98	5,35	83,33	445,79
12 a 14	0,0015	0,29	5,81	6,14	193,33	1186,25
14 a 16	0,00113	0,28	4,38	7,65	247,79	1896,18
16 a 18	0,0011	0,16	4,26	7,82	145,45	1137,22
18 a 20	0,0009	0,07	3,49	9,20	77,78	715,33
						5481,85

Fuente: Autores

$$h_{lantracita} = 0,62m$$

Tabla H-2: Parámetros pérdida del lecho de arena

<i>arena</i>						
<i>tamiz</i>	<i>di(cm)</i>	<i>Xi (%retenida)</i>	<i>Nre</i>	<i>Cd</i>	<i>Pi/di</i>	
14 a 16	0,00133	0,05	5,16	6,73	37,59	253,07
16 a 18	0,00113	0,15	4,38	7,65	132,74	1015,81
18 a 20	0,0009	0,29	3,49	9,20	322,22	2963,51
20 a 25	0,00076	0,28	2,95	10,58	368,42	3897,52
25 a 30	0,00067	0,16	2,60	11,76	238,81	2809,08
30 a 35	0,00057	0,07	2,21	13,51	122,81	1658,51
35 a 40	0,00045	0,0006	1,74	16,59	1,33	22,12
						12619,61

Fuente: Autores

$$h_{larena} = 0,59m$$

9.14 Se calculó la pérdida total en el lecho:

$$h_l = h_{larena} + h_{lantracita}$$

$$h_l = 0,62m + 0,59m = 1,21m$$

9.1.5 Se calculó la pérdida en el lecho de grava:

$$h_g = \frac{qL_g}{3}$$

L_g : longitud lecho de grava

$$h_g = 0,0005m$$

9.1.6 Se calculó la pérdida en el falso fondo (Determinada por el fabricante)

$$h_d = 0,063m$$

9.1.7 Se calculó la pérdida en la tubería de entrada y salida del filtro

La distribución de las tuberías se encuentra detallada en el Anexo K

La pérdida por tubería y accesorios es igual a:

$$h_t = 0,015m$$

9.1.8 Se calculó la pérdida de carga total en el filtro:

$$H = h_l + h_g + h_d + h_t$$

$$h = 1,21m + 0,0005m + 0,063m + 0,015m = 1,29m$$

Un filtro está bien diseñado y operará sin problemas, si la pérdida de carga total es menor a 2m.

10. Hidráulica de Lavado

10.1 Se determinó la velocidad de lavado o de fluidización de la siguiente manera:

10.1.1 Se calculó la velocidad de arrastre para cada lecho:

$$v_t = 10D_{60} = 10S_s T_e$$

Donde T_e corresponde al tamaño efectivo de la partícula (mm) y S_s corresponde a la densidad relativa de la partícula

$$v_{t-arena} = (10)(1,4)(0,55) = 7,7 \text{ m/min}$$

$$v_{t-antracita} = (10)(1,5)(1,1) = 7,755 \text{ m/min}$$

10.1.2 Se determinó la velocidad apropiada de lavado teniendo en cuenta los esfuerzos de corte producido por el agua de lavado, los efectos de abrasión y el frote máximo (10%)

$$v_b = 0,1v_t$$

$$v_{b-arena} = 0,1(7,7 \text{ m/min}) = 0,77 \text{ m/min}$$

$$v_{b-antracita} = 0,1(7,755 \text{ m/min}) = 0,7755 \text{ m/min}$$

La velocidad apropiada de lavado se toma como el promedio entre ambas:

$$v_b = 0,773 \text{ m}/\text{min}$$

Usando esta velocidad se calcularon, las pérdidas del filtro durante el proceso de lavado.

10.2 Se calculó la pérdida de lecho en el lavado para cada zona:

- Volumen del lecho:

$$Vol_{li} = (1 - P_o)L$$

- Velocidad ascensional:

$$v_s = 36 \left[\frac{(P_o - 1)d_i}{L^{0,5}} \right]$$

- Porosidad lecho expandido, se calculó mediante la ecuación propuesta por el modelo experimental de Fair y Geyer para la suspensión del medio granular del filtro:

$$P_{ei} = \left(\frac{v_b}{v_s} \right)^{0,22}$$

- Expansión del lecho:

$$E = \frac{P_{ei} - P_o}{1 - P_{ei}}$$

- Expansión en cada zona:

$$Ex_i$$

- Longitud del lecho expandido en cada zona:

$$L_{ei} = \frac{P_o}{1 - P_{ei}}$$

- Pérdida en cada zona:

$$h_{ei} = L_{ei}(1 - P_{ei})(1 - P_o)$$

Se calculó la pérdida total en lecho durante el lavado para ambos lechos:

$$h_{ll} = \sum h_{ei}$$

Los resultados se muestran en las tablas H3 y H4

Tabla H-3: Parámetros pérdida del lecho de antracita

ANTRACITA								
tamiz	di(cm)	Xi	Vs	Peantracita	Expansion	Exi	L(cm)	hl(cm)
8 a 12	0,23	0,05	11,11	0,62	0,59	0,03	0,72	0,15
10 a 12	0,18	0,15	9,93	0,64	0,66	0,10	0,75	0,15
12 a 14	0,15	0,29	9,07	0,65	0,72	0,21	0,77	0,15
14 a 16	0,11	0,28	7,87	0,67	0,83	0,23	0,82	0,15
16 a 18	0,11	0,16	7,77	0,67	0,84	0,13	0,83	0,15
18 a 20	0,09	0,07	7,02	0,69	0,93	0,06	0,87	0,15
		1,00					4,75	0,89

Fuente: Autores

Tabla H-4: Parámetros pérdida del lecho de arena

ARENA								
tamiz	di(cm)	Xi	Vs	Pearena	Expansion	Exi	L(cm)	hl(cm)
14 a 16	0,13	0,05	13,13	0,60	0,38	0,02	0,41	0,26
16 a 18	0,11	0,15	12,10	0,61	0,41	0,06	0,42	0,26
18 a 20	0,09	0,29	10,80	0,63	0,47	0,14	0,44	0,26
20 a 25	0,08	0,28	9,92	0,64	0,52	0,15	0,46	0,26
25 a 30	0,07	0,16	9,32	0,65	0,56	0,09	0,47	0,26
30 a 35	0,06	0,07	8,59	0,66	0,61	0,04	0,48	0,26
35 a 40	0,05	0,00	7,64	0,68	0,70	0,00	0,51	0,26
		1,00					3,19	1,85

Fuente: Autores

$$h_{l-l} = 0,89cm + 1,85cm = 2,74cm$$

La pérdida de carga del lecho durante el lavado debe ser menor a 5cm.

10.3 Se calculó la pérdida de carga en el lecho de grava durante el lavado:

$$h_g = \frac{v_b L_g}{3} = 0,10m$$

10.4 Se calculó la pérdida en el sistema de drenaje durante el lavado:

$$h_{dl} = \frac{1}{2g} \left[\frac{v_b}{\alpha\beta} \right]^2$$

Se tomó el valor recomendado para alfa (coeficiente del orificio) de 0,6

Se tomó el valor recomendado para beta (Relación entre el área del orificio y el área del lecho filtrante), de 0,7%

$$h_{dl} = \frac{1}{2(9,8)(3600)} \left[\frac{0,7725}{(9,6)(0,07)} \right]^2 = 0,00014m$$

10.5 Se calculó la pérdida de carga en la tubería de entrada de agua de lavado y salida de agua de lavado como en el punto 9.17

$$h_t = 0,0012m$$

10.5 La pérdida de carga durante el lavado, se calculó:

$$H_L = h_{ul} + h_{gl} + h_{dl} + h_{tl}$$

$$H_L = 2,74cm + 10cm + 0,13cm + 0,0012m = 12,87$$

La operación de lavado de filtros debe proporcionar una pérdida menor a 20 cm

12. Caudal de agua de lavado

$$Q_{lavado} = (v_b)(A) = (0,7725 \text{ m/min})(0,79m^2) = 0,6118 \frac{m^3}{min} = 10,2 \frac{L}{s}$$

El lavado para filtros oscila entre 7 a 10 min. En este caso por ser filtros de dimensiones pequeñas se tomó un tiempo de lavado de 7min. El volumen de agua necesario se calculó:

$$V_{agua \text{ lavado}} = (Q_{lavado})(t_{lavado}) = \left(0,6118 \frac{m^3}{min} \right) (7min) = 4,28 m^3$$

13. Método de Control: Se seleccionó como método de control: Pérdida de carga variable-tasa declinante. Es el tipo de control más usado en los filtros rápidos por gravedad. Presenta menores dificultades de mantenimiento en comparación con el control de filtro

convencional y tienen un bajo costo, lo cual ha hecho que la utilización de este método de control sea mayor. Además, se recomienda usar este método cuando la pérdida de carga en operación sea menor 2m (en este caso). El operador sabrá que el filtro en operación llegó al límite de carga cuando se detecte una diferencia de presión de 1 Kg/cm². Además el uso de este tipo de control no requiere de costos en aditamentos hidráulicos y tanques de gran profundidad.

En este punto del diseño, se obtiene agua clarificada y desodorizada.

ANEXO I: Unidad de desinfección

1. Se asumió un tiempo de contacto entre el agua y la solución de HTH

$$T_c = 30 \text{ min}$$

2. Se calculó el volumen del tanque o cámara de contacto

$$V_{tc} = QT_c$$

$$V_{tc} = 3,54 \text{ m}^3$$

3. Se asumió la altura de la cámara de contacto

$$H = 1,5 \text{ m}$$

4. Se calculó el área de la cámara de contacto

$$A = \frac{V_{tc}}{H}$$

$$A = 2,36 \text{ m}^2$$

5. Se calculó el ancho de la cámara

$$a = \left(\frac{A}{H}\right)^2$$

$$a = 1,26 \text{ m}$$

6. Se asumió una relación Largo –Ancho

$$\frac{L}{a} = 2$$

7. Se calculó la longitud de la cámara teniendo en cuenta la relación Largo-ancho

$$\frac{L}{a} = 2$$

$$L = 1,89 \text{ m}$$

8. Para evitar cortocircuito es necesario, colocar pantallas de manera que el volumen quede dividido por lo menos en tres sectores. Para esto se asumió un número total de 3 baffles a lo largo de la cámara, donde cada tabique estará ubicado a 0,62 m uno del otro, garantizando de esta manera un contacto mayor con el desinfecte.

Dosis de Desinfectante

9. De acuerdo con tabla de las propiedades fisicoquímicas del agua cruda (Tabla A1) se tiene un pH = 7,03. Usando la tabla I1 para un tiempo de 30 minutos de retención se calculó la dosis optima de desinfectante

Tabla 0-1: Dosificación de Cloro respecto a la variación de PH

Dosis de Cloro aplicada mg/L	10°C				15°C				25°C			
	6	6,5	7	7,5	6	6,5	7	7,5	6	6,5	7	7,5
0,4	49	59	69	83	33	39	47	44	16	19	23	28
0,6	50	60	71	85	33	40	48	57	17	20	24	29
0,8	52	61	73	87	35	41	49	59	17	21	25	29
1	53	63	75	89	35	42	50	60	17	21	25	30
1,2	53	63	76	91	36	43	51	61	18	21	25	31
1,4	55	65	77	93	37	43	52	63	18	22	26	31
1,6	55	66	79	96	37	44	53	64	19	22	27	32
1,8	57	67	81	98	38	45	54	65	19	23	27	33
2	58	69	83	100	39	46	55	67	19	23	27	33
2,2	59	70	85	102	39	47	57	70	20	23	28	34
2,4	60	71	86	105	40	48	57	70	20	24	29	35
2,6	61	73	87	107	41	49	59	71	21	25	29	35
2,8	62	74	89	109	41	49	59	73	21	25	30	36
3	6	75	91	111	42	51	61	74	21	25	31	37

Fuente: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, Título C, numeral C.8.5, Tabla C.8.2.B pag C 80

$$K = 31\text{mg}/\text{min}/\text{L}$$

$$C(\text{dosis de desinfectante}) = 1,2 \text{ mg/L}$$

10. Se calculó la carga de cloro necesaria para todo el caudal

$$\left(\frac{0,98 \text{ L}}{\text{s}}\right) \left(1,2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{1,18 \text{ mg}}{\text{l}} = 0,102 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}$$

11. Se calculó el volumen de agua de agua para preparar la solución, asumiendo una concentración del 2%

$$\% \text{ peso} = \left(\frac{\text{Kg soluto}}{\text{Kg soluto} + \text{Kg agua}}\right) \times 100\%$$

$$2\% = \left(\frac{0,102 \text{ Kg HTH}}{\frac{0,102 \text{ Kg}}{\text{dia}} \text{ HTH} + \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \text{ agua}}\right) \times 100 \%$$

$$4,998 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \text{ agua}$$

$$V_{\text{Agua}} = \frac{4,998 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}}{1000 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V_{\text{Agua}} = 0,005 \text{ m}^3/\text{dia}$$

12. Se determinó el caudal de solución que ingresará al tanque de contacto

$$Q_{\text{solucion HTH}} = \frac{Q}{DC}$$

$$C = 2 \text{ mg/mL}$$

$$Q_{\text{solucion HTH}} = 0,0006 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 2,16 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

ANEXO J: Intercambio Iónico

Características agua de entrada

Las condiciones fisicoquímicas del agua clarificada a la entrada de las columnas de desmineralización, una vez pasada por los filtros es:

Tabla J-1: Parámetros agua de entrada

Propiedad	Valor
PH	7,9
Temperatura	33 °C
Conductividad	292 uS/cm
Dureza total	84 mg/L
Turbidez	1,4

Fuente: Tabla A1

Características agua de salida

Una vez que el agua clarificada, haya sufrido el proceso de intercambio iónico, el agua que sale de la planta debe tener unas características determinadas para que pueda ser usada en los distintos procesos en los que sea necesario utilizar agua desmineralizada

Tabla J-2: Parámetros agua de salida

Propiedad	Valor
PH	7±0,5
Temperatura	32,8 °C
Conductividad	100 uS/cm
Dureza total	10 ppm
Turbidez	0
Total cationes	<0,1 ppm
Total aniones	<0,1 ppm

Fuente: Autores

Se diseñaron las torres asumiendo 10 ppm de dureza. Actualmente, la empresa utiliza en los procesos agua proveniente de Aguas de Cartagena con 70 ppm de dureza, el rango aceptado para los equipos es de 200 a 400 ppm (como se muestra en la tabla B1 del Anexo B) para evitar corrosión e incrustaciones en tuberías y equipos. Por ahorros en el costo de las resinas y de acuerdo al funcionamiento de los equipos, se espera que agua de salida tenga un contenido de 10 ppm.

Respecto a la conductividad, el valor máximo permitido por los equipos es 500 uS/cm, en el proceso de intercambio iónico se reducirá la conductividad térmica del agua de entrada en un 35% pensando en la instalación de futuros equipos que diseñara el proceso de tal forma que la conductividad de salida sea de 100 uS/cm por si en algún momento, el proceso así lo requiera

Determinación Concentración de Iones

La concentración de iones varía de acuerdo a la época del año, como se observa en la tabla A1. Por cuestiones de diseño se tomaran los valores promedios aumentados en un 5% como margen de seguridad para los cationes y 8% para los aniones, para cumplir el requerimiento principal para el diseño de intercambiadores iónicos que afirma que la suma de cationes debe ser igual a la suma de aniones.

Se toman los valores máximos de concentraciones de la tabla A1 pues estos valores se presentan en los meses de fuerte invierno de la región (33% del año) y no en el resto del año (67%). En la tabla J3, se muestra la concentración de iones seleccionada para el diseño

Tabla J-3: Concentración de iones

CATIONES	Promedio [mg/L]	Máximo [mg/L]	Mínimo [mg/L]	Diseño [mg/L]
Calcio	22	28	18	33
Sodio	16,1	21,0	13,5	24
Magnesio	5	7	3	8
Total	43			65
ANIONES				
Cloruros	25	42	15	45
Sulfatos	14	22	5	24
Amonio	0,07	0,14	0,02	0,12
Nitritos	0,08	0,22	0,02	0,14
Nitratos	4,05	7,40	2,58	7,29
Fluoruros	0,26	0,46	0,14	0,47
Fosfatos	0,10	0,18	0,04	0,17
Total	43			65

Fuente: Tabla A1

Característica de las resinas

La resina AMBERLYST 119 WET, es una resina catiónica fuertemente acida, 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 la de otras resinas catiónicas acidas fuerte.

La resina AMBERLYST A26 OH (resina aniónica básica fuerte), su matriz es de tipo macrorreticular basada en polímero entrecruzado de estireno con divinilbenceno. Su grupo funcional en este caso es un amonio cuaternario. Su estructura porosa hace que sea una buena elección para utilizarla en medios acuosos o no acuosos. Su estructura reticular y la

distribución de tamaños de poros, le concede una resistencia superior al choque mecánico y osmótico.

DISEÑO DE LA COLUMNA CATIONICA

1. Se calculó el caudal máximo de agua para las columnas, corresponde al 65% del caudal de la planta:

$$Q = 0,65 \left(500 \frac{m^3}{dia} \right) = 325 \frac{m^3}{dia} = 13,54 \frac{m^3}{h} = 13542 \frac{L}{h}$$

2. Se calculó la carga catiónica (CC) será la suma de todas las especies catiónicas antes nombradas:

$$CC = 65 \frac{mg \text{ de } CaCO_3}{L} = 1,37 \frac{meq}{L}$$

3. Se definió el ciclo de operación de las columnas. Estos depende de:

- Caudal a tratar
- Carga iónica aportada
- Especificaciones técnicas de cada resina
- Relación de esbeltez

Se toma como tiempo de duración de cada ciclo de operación de 24 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.

4. Se calculó la oferta iónica:

$$OI = CC Q t_c$$

$$OI = \left(1,29 \times 10^{-3} \frac{eq}{L} \right) \left(13542 \frac{L}{h} \right) \left(24 \frac{h}{L \text{ ciclo}} \right) = 418,38 \frac{eq}{L \text{ ciclo}}$$

5. Se determinó la capacidad operática (CO). Esta depende del regenerante usado, en el caso actual hablamos de H_2SO_4 al 8% en peso; el sistema de regeneración se tomará en contracorriente, pues en los últimos años el desarrollo de nuevos procesos de regeneración han desplazado totalmente al sistema de regeneración en cocorriente al permitir obtener las ventajas simultaneas de una mejor calidad, un menor consumo y equipos más sencillos y económicos. El valor de la capacidad operativa viene dada por el fabricante:

6. Se calculó el volumen necesario de resina:

$$V_R = \frac{OI}{C_{OP}} = \frac{418}{1,8} = 232,44 L$$

Se escogió e un factor de seguridad de 10%.

$$V_R = (232,44 L)(1,1) = 272 L$$

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

$$\text{sacos a comprar} = \frac{272 L}{25 L} = 10,8 \text{ saco} = 11 \text{ sacos}$$

$$V_R \text{ a comprar} = (11)(25) = 275 L \text{ de resina} = 0,275 m^3$$

7. Se calculó la capacidad instalada:

$$C_{ins} = V_R C_{OP} = (275L) \left(1,8 \frac{eq}{L}\right) = 495 \frac{eq}{ciclo}$$

Dimensionamiento de la columna

1. Generalmente las columnas de intercambio iónico son de 1,6 m de diámetro, para cargas catiónicas grandes, en este caso se toma de 1 m

$$D_c = 1m$$

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

$$A = \frac{\pi}{4} D_c^2 = \frac{\pi}{4} (1 \text{ m})^2 = 0,79 \text{ m}^2$$

3. Se determinó la altura del lecho (h_l)

$$h_l = \frac{V_R}{A} = \frac{0,275 \text{ m}^3}{0,79 \text{ m}^2} = 0,35 \text{ m}$$

4. Se calculó la Expansión máxima (E_{max}). Por indicaciones del fabricante, esta expansión es del 10%

$$E_{max} = 0,1 h_l = 0,1 (0,35\text{m}) = 0,035\text{m}$$

5. Se determinó la altura del lecho expandido (h_{le})

$$h_{le} = h_l + E_{max} = 0,35\text{m} + 0,035 = 0,39\text{m}$$

6. Por recomendaciones del fabricante, el volumen de la resina inerte es de 250 L

7. Se calculó:

- Altura del lecho inerte (h_i)

$$h_i = \frac{V_i}{A} = \frac{0,250\text{m}^3}{0,79 \text{ m}^2} = 0,32\text{m}$$

Esta altura 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 23mm

$$h_{fb} = 0,023\text{m}$$

- Altura cilíndrica de la columna (h_c)

$$h_c = h_{le} + h_i + h_{fb} = 0,39\text{m} + 0,32\text{m} + 0,023\text{m} = 0,73\text{m}$$

8. Se calculó la velocidad de flujo (V)

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\left(13,54 \frac{m^3}{h}\right)}{(0,79 m^2)} = 0,005 \frac{m}{s}$$

9. Se determinó el volumen del lecho (BV): corresponde al volumen que ocupa los dos tipos de resina: catiónica y la inerte

$$BV = (h_{le} + h_i)A = (0,39m + 0,32m)(0,79 m^2) = 0,55m^3$$

10. Se estableció la relación de esbeltez:

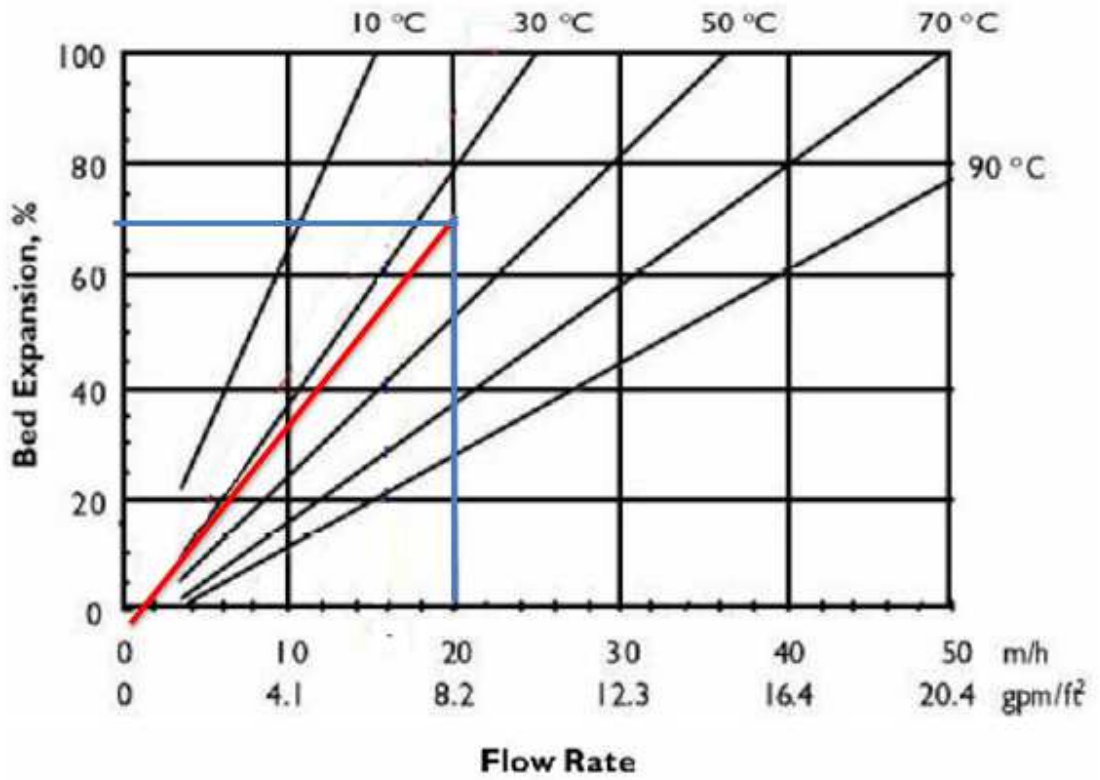
$$\frac{H}{D_c} = \frac{h_c}{D_c} = \frac{0,73m}{1m} = 0,73$$

Según relaciones del fabricante debe estar comprendido entre 0,65 a 1,5

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 corresponda a tres veces la velocidad en función de la expansión del lecho y la temperatura, esta velocidad la denominan *velocidad de compactación*. Se usó un dato medio de expansión (70%) y usando la grafica proporcionada por el fabricante en función del lecho y de la temperatura.

Figura J-1: Velocidad de retrolavado



Fuente: Fabricante-Resina Amberlyts

$$V_{retrolavado} = 20,5 \frac{m}{h}$$

$$v_{compactacion} = 3 \left(20,5 \frac{m}{h} \right) = 61,5 \frac{m}{h}$$

El tiempo de compactación (t_{comp}) se obtiene de la experiencia:

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

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

$$Q_{comp} = (v_{compactacion})A = \left(61,5 \frac{m}{h}\right)(2,01 m^2) = 43,59 \frac{m^3}{h}$$

$$V_{comp} = (Q_{compactacion})t_{comp} = \left(43,59 \frac{m^3}{h}\right)(0,17h) = 7,27m^3$$

3. La cantidad de regenerante a usar viene dada por el fabricante. Este, proporciona que por 1 saco de resina se necesita $175 \frac{g \text{ de } H_2SO_4}{L}$. Con la cantidad de regenerante necesaria por volumen de resina y con el volumen de esta, se calculó la cantidad necesaria de H_2SO_4

$$\begin{aligned} masa_{H_2SO_4} &= V_R (\text{cantidad regenerante}) = (400L) \left(175 \frac{g \text{ de } H_2SO_4}{L}\right) \\ &= 48125 g \text{ de } H_2SO_4 = 48,125 Kg \text{ de } H_2SO_4 \end{aligned}$$

4. Fue necesario, calcular un excedente estequiométrico para saber si con esta cantidad se consigue regenerar totalmente la columna:

$$masa_{H_2SO_4} = 48,125 Kg \text{ de } H_2SO_4 = 491 \frac{eq \ H_2SO_4}{ciclo}$$

$$Excedente_{H_2SO_4} = \frac{eq \ H_2SO_4}{eq \ OI} 100 = \left(\frac{491}{418,38}\right) 100 = 117\%$$

5. Comercialmente, el ácido sulfúrico se encuentra al 98%, el fabricante indica que a la hora de regenerar la resina, este ácido debe estar diluido entre 1 al 8%. Se calculó el volumen de agua de agua para preparar la solución del 8% y un peso de ácido sulfúrico de 48,125Kg

$$\% \text{ peso} = \left(\frac{Kg \text{ soluto}}{Kg \text{ soluto} + Kg \text{ agua}}\right) \times 100\%$$

$$8\% = \left(\frac{48 \text{Kg acido sulf.}}{\frac{48 \text{Kg}}{\text{dia}} \text{ acidosul.} + \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \text{ agua}} \right) \times 100 \%$$

$$\frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \text{ agua} = 575 \text{ kg}$$

$$V_{\text{Agua}} = \frac{575 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}}{1000 \text{Kg/m}^3}$$

$$V_{\text{Agua}} = 0,575 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Se agregarán entonces $0,575 \text{ m}^3$ de agua proveniente del desgasificador

6. De acuerdo a los datos del caudal de regeneración proporcionados por el fabricante, $(5,07 - 50,74) \text{ m}^3/\text{h}$. Se escogió para la determinación de la velocidad y tiempo de regeneración un caudal de:

$$Q_{\text{reg}} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,33 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

5. Se determinó la velocidad y tiempo de regeneración:

$$v_{\text{reg}} = \frac{Q_{\text{reg}}}{A} = \frac{\left(20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}{2,01 \text{ m}^2} = 9,95 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$t_{\text{reg}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 8\%}}}{Q_{\text{reg}}} = \frac{0,0458 \text{ m}^3}{0,33 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 0,14 \text{ min}$$

6. 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 lavado, serán iguales que la velocidad y el caudal de regeneración, por tanto el tiempo de lavado:

$$t_{lav} = \frac{V_{H2O}}{Q_{reg}} = \frac{0,55 \text{ m}^3}{0,33 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 1,68 \text{ min}$$

7. Se calculó el peso de la columna, teniendo en cuenta que la densidad empaquetada de la resina AMBERLYST 119 WET es de 800 g/L, mientras que la densidad de la resina inerte es de 620 g/L. Se calculó el peso de la columna catiónica así:

$$P_{resina\ cationica} = V_r \rho_r = (0,275 \text{ L}) \left(800 \frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = 220 \text{ Kg}$$

$$P_{resina\ inerte} = V_i \rho_i = (0,25 \text{ L}) \left(620 \frac{\text{g}}{\text{L}} \right) = 150 \text{ Kg}$$

8. Se calculó el peso del volumen de agua contenida en la columna de intercambio catiónico, que equivale a la suma del agua que está en el freeboard o espacio libre y el agua contenida el empaque, según la experiencia del fabricante, el espacio en lecho para la circulación de agua es el 33% del volumen del lecho:

$$P_{H_2O} = \left[(h_{fb}A) + \frac{1}{3}(h_{le} + h_i)A \right] \rho_{H_2O}$$

$$P_{H_2O} = \left[(0,023\text{m})(0,79\text{m}^2) + \frac{1}{3}(0,39 \text{ m} + 0,32\text{m})(0,79\text{m}^2) \right] \left[1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] = 203 \text{ Kg}$$

El peso de la columna es:

$$P_{columna} = 203 \text{ Kg} + 220 \text{ Kg} + 150 \text{ Kg} = 577 \text{ Kg}$$

DISEÑO DE LA COLUMNA ANIONICA

1. Se siguió la metodología del diseño de la columna catiónica teniendo en cuenta los siguientes parámetros.

La capacidad operativa C_{OP} depende del regenerante usado, en el caso de resina aniónica es $NaOH$ al 2% en peso en un sistema de regeneración en contracorriente.

La cantidad de regenerante por litro de resina es 50g/l. Los parámetros recomendados por el fabricante:

$$C_{OP} = 1,2 \frac{eq}{L}$$

$$h_{fb} = 0,042m$$

$$E_{max} = 0,2 h_l$$

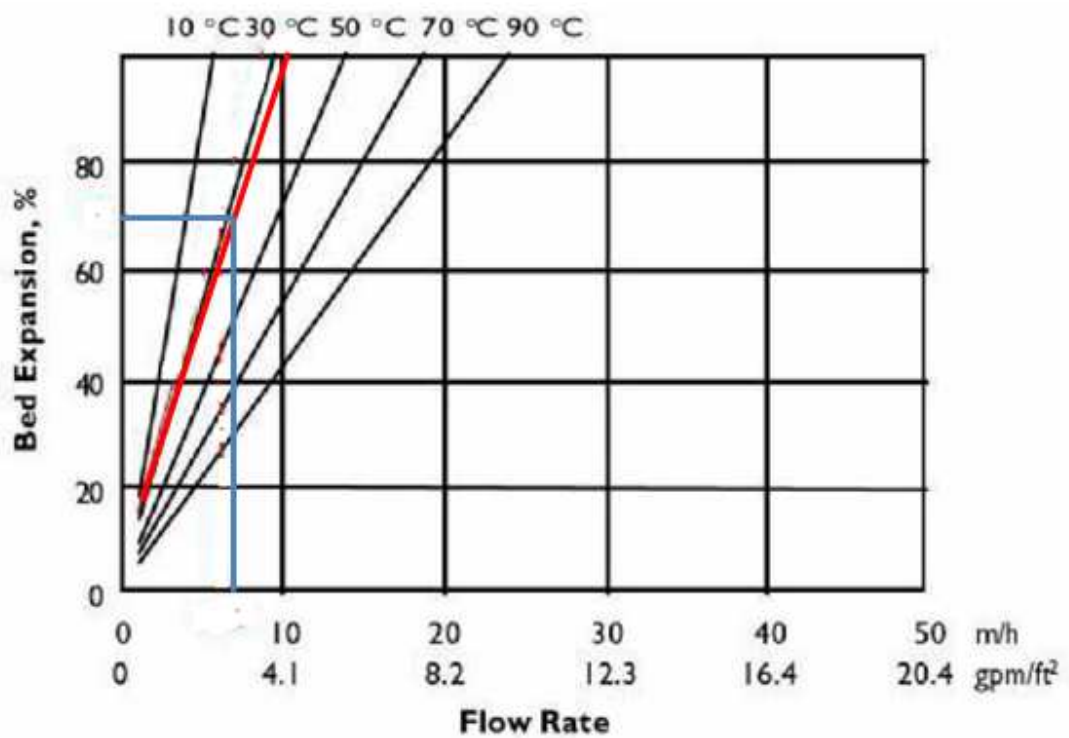
$$V_i = 0,3m^3$$

$$\rho_{ranionica} = 675 g/L$$

$$\rho_i = 620 g/L$$

2. La velocidad de retrolavado de la resina Amberlyst A26OH en función de la expansión del lecho y temperatura

Figura J-3: Velocidad de Retrolavado



Fuente: Fabricante Resina-Amberlyst

$$V_{retrolavado} = 7,5 \frac{m}{h}$$

$$v_{compactacion} = 3 \left(7,5 \frac{m}{h} \right) = 22,5 \frac{m}{h}$$

El tiempo de compactación (t_{comp}) se tomó igual que la columna catiónica

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

$$Q_{comp} = (v_{compactacion})A = \left(22,5 \frac{m}{h} \right) (0,79 m^2) = 17,67 \frac{m^3}{h}$$

$$V_{comp} = (Q_{compactacion})t_{comp} = \left(17,67 \frac{m^3}{h} \right) (0,17h) = 2,99m^3$$

3. La cantidad de regenerante a usar viene dada por el fabricante. Proporciona que por 1 saco de resina se necesita $50 \frac{g \text{ de NaOH}}{L}$. Con la cantidad de regenerante necesaria por volumen de resina y con el volumen de esta se calcula la cantidad necesaria de *NaOH*

$$\begin{aligned} masa_{NaOH} &= V_R (\text{cantidad regenerante}) = (400L) \left(50 \frac{g \text{ de NaOH}}{L} \right) \\ &= 20000 \text{ g de NaOH} = 20 \text{ Kg de NaOH} \end{aligned}$$

Se calculó el excedente estequiométrico

$$\begin{aligned} masa_{NaOH} &= 20 \text{ Kg de NaOH} = 500 \frac{eq \text{ H}_2\text{SO}_4}{\text{ciclo}} \\ \text{Excedente}_{NaOH} &= \frac{eq \text{ NaOH}}{eq \text{ OI}} 100 = \left(\frac{500}{418,38} \right) 100 = 120\% \end{aligned}$$

4. Dilución de soda al 50%: Comercialmente la soda se encuentra a 50%, el fabricante indica que a la hora de regenerar la resina, este ácido debe estar diluido al 2%. Para realizar la dilución de hidróxido de sodio al 2%, se debe agregar 20 Kg de *NaOH* y 0,98 m³ de agua

5. Para la velocidad de regeneración, El fabricante proporciona el caudal de regeneración (2,81 – 11,25) m³/h. Se escogió:

$$\begin{aligned} Q_{reg} &= 6 \frac{m^3}{h} = 0,1 \frac{m^3}{min} \\ v_{reg} &= \frac{Q_{reg}}{A} = \frac{\left(6 \frac{m^3}{h} \right)}{0,79 \text{ m}^2} = 7,64 \frac{m}{h} \\ t_{reg} &= \frac{V_{NaOH \text{ 2\%}}}{Q_{reg}} = \frac{0,02 m^3}{0,1 \frac{m^3}{min}} = 0,2 \text{ min} \end{aligned}$$

6. Para el tiempo de lavado, tanto la velocidad y caudal se asumieron iguales al caudal de regeneración.

$$t_{lav} = \frac{V_{H2O}}{Q_{reg}} = \frac{0,06 \text{ m}^3}{0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 0,60 \text{ min}$$

ANEXO K: Tuberías y Bombas

Tuberías

Las dimensiones de las tuberías dependerán de la línea de instalación. La tabla K1 muestra las diferentes líneas de tuberías que se definieron para la planta.

Tabla K-1: Líneas de tuberías de la planta de tratamiento de aguas

	Línea	Fluido
Alimentación de agua cruda	1	Agua cruda
Canaleta Parshall- Floculador	2	Agua cruda
T-101-Canaleta Parshall	3	Solución Sulfato de aluminio
Floculador – Sedimentador	4	Agua cruda
Sedimentador- Filtros	5	Agua cruda
Filtro- T-102(Tanque de aguas claras)	6	Agua Clarificada
T-102 - Torre Catiónica	7	Agua clarificada
Torre Catiónica-Desgasificador	8	Agua Cationizada
Desgasificador –Torre Aniónica	9	Agua Cationizada
T-103-Torre Catiónica	10	Solución ácido sulfúrico
T-104- Torre Aniónica	11	Solución Hidróxido de Sodio
Torre Aniónica-Tanque Agua Desmineralizada	12	Agua Desmineralizada
T-102- Cámara de Desinfección	13	Agua Clarificada
T-105- Cámara de Desinfección	14	Solución HTH
T106-Filtro	15	Agua para lavado filtros
Desgasificador-T-103	16	Agua para solución de ácido sulfúrico

Fuente: Autores

Línea de Tubería 1

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

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v\pi}}$$

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

$$v_{sug.} = 4ft/s$$

$$v_{sug.} = 1,2 m/s$$

Tabla K-2: Velocidades medias de circulación de fluidos

Fluid	Suggested trial velocity	Pipe material
Sodium Hidroxiide	6 fps	Steel
0-30%	5 fps	Steel
30-50%	4 fps	Nickel
50-73%	4 fps	Nickel
Sodium Chloride Solution		
No solids	5 fps	Steel
With solids	7,5 fps	Steel
Perchloroethylene	6 fps	Steel
Sulfuric Acid (88-93%)	4 fps	S.S-N316
Sulfuric Acid (93-100%)	4 fps	Cast iron and Steel
Sulfur Dioxide	4 fpm	Steel
Styrene	6 fps	Steel
Trichloroethylene	6 fps	Steel
Vinylidene Chloride	6 fps	Steel
Water		

Average service	3- 8 fps	Steel
Boiler feed	4- 12 fps	Steel
Pump suction lines	1- 5 fps	Steel, PVC
Concrete	5- 12 fps	

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

3. Se recalculó el diámetro de tubería utilizando la velocidad sugerida del agua

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v\pi}}$$

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

4. Para el diámetro calculado, se escogió un diámetro comercial utilizando la tabla K3 en las que se encuentra el valor del diámetro nominal, presión nominal y diámetro externo. Se tomó el diámetro nominal inmediatamente superior al diámetro obtenido con sh.40 ya que esta cedula es la más recomendada cuando el sistema no es a alta presión.

Tabla K-3: Catálogo de diámetros de tubería

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	2,374	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. 3ª ed, volume 1, pag 60

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

A continuación se resume en la siguiente tabla 1 resto de líneas de tuberías, siguiendo el mismo esquema de cálculo que en el caso anterior.

Tabla K-4: Dimensionamiento líneas de tuberías

LÍNEA	D (in)	Q (m^3/s)	V (Ft/s)	ID_N (in)	OD_N (in)	Nominal pipe size
1	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
2	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
3	2,76	0,0062 (m^3/h)	5	3,068	3,5	3
4	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
5	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
6	3,08	0,0058	4	4,026	4,5	4
7	3,08	0,0038	4	4,026	4,5	4
8	3,08	0,0038	4	4,026	4,5	4
9	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3
10	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3
11	2,75	0,0016	4	3,068	3,5	4
12	2,75	0,0016	4	3,068	3,5	4
13	1,27	3,54 (m^3/h)	4	3,068	3,5	4
14	0,3	$2,16 \frac{L}{h}$	5	0,824	1,050	$\frac{3}{4}$
15	4,05	0,01	4	4,026	4,5	4
16	3,022	0,0056	4	3,068	3,5	3

Fuente: Autores

Bombas

En la tabla K5 se muestra el número de bombas para la planta de tratamiento y la unidad inicial y final para el suministro del fluido en cada una de ellas.

Tabla K-5: Bombas planta de tratamiento de agua

Bomba	Deposito inicial	Deposito final
P-101	Reserva agua cruda	Canaleta Parshall
P-102	Canaleta Parshall	Floculador
P-103	Floculador	Sedimentador
P-104	Sedimentador	filtros
P-105	Filtros	Tanque agua clarificada
P-106	Tanque agua clarificada	Torre Catiónica
P-107	Torre Catiónica	Desgasificador
P-108	Desgasificador	Torre Aniónica
P-109	T-106	filtro
P-110	T-103	Torre Catiónica
P-111	T-104	Torre Aniónica
P-112	Desgasificador	T-103
P-113	Torre Aniónica	Tanque de Agua Desmineralizada

Fuente: Autores

Para el suministro de agua clarificada al tanque de desinfección no se necesitará de una bomba que suministre el agua, pues el tanque de almacenamiento de agua clarificada estará más alto que la cámara de desinfección aprovechándose de esta manera la gravedad y la presión del fluido para el transporte. Sólo se utilizará una válvula que controle el paso del agua.

Bomba P -101

1. Se verificó la línea de tubería a la que pertenece la bomba P -101

2. Se realizó un recalcu de la velocidad tomando como referencia las dimensiones de la línea de tubería 1.

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

$$v = \frac{0,072m}{s} = \frac{0,24ft}{s}$$

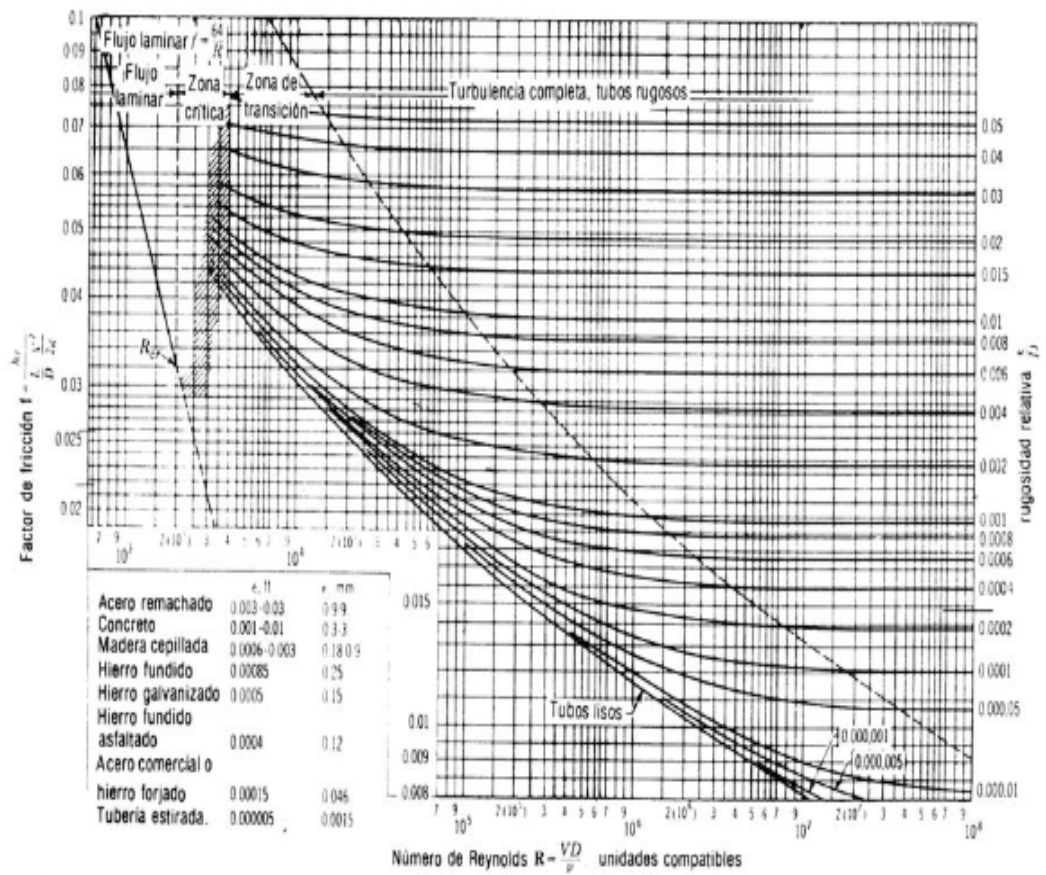
3. Se determinó el régimen del flujo a través del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$Re = 10526,09$$

4. Se calculó f haciendo uso de Reynolds y el factor de rugosidad del PVC (0,0015) mediante la figura K1

Figura K-1:Diagrama de Moody



Fuente: Applied Process Desing for Chemical and petrochemical plants, Ludwig E. 3ª ed, volume 1, pag 68

$$f = 0,022$$

5. Se calculó la Perdida de fricción en tubería recta en la succión y descarga a de la bomba

$$h_{f_{tubería\ recta}} = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

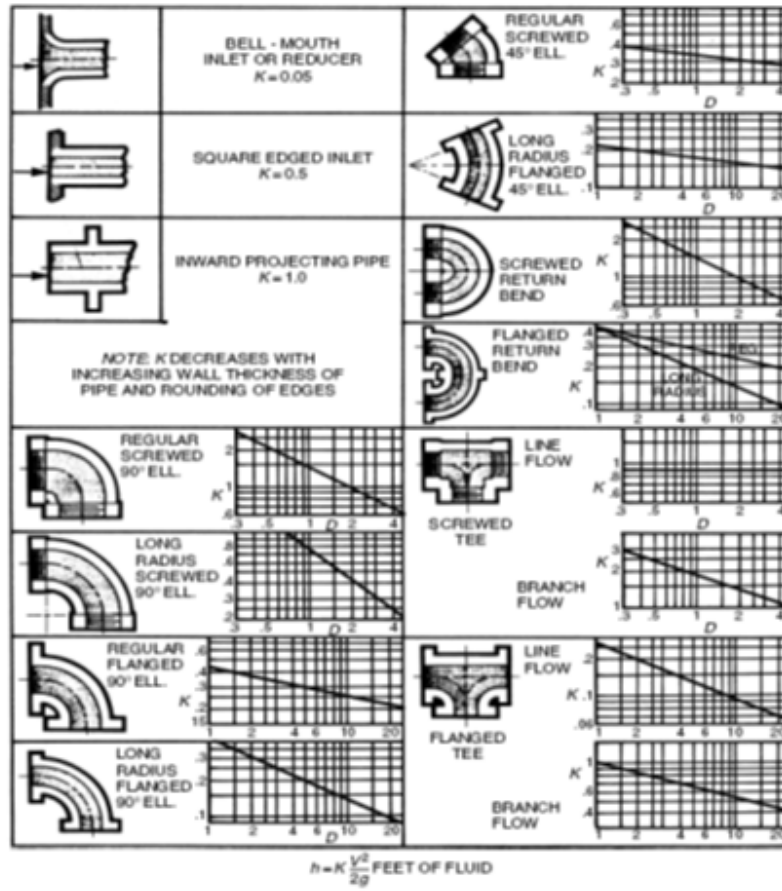
Tabla K-6: perdida tubería P-101

	<i>L(m)</i>	<i>D(m)</i>	<i>h_f</i>
Succión	2	0,10	0,00011
Descarga	3	0,10	0,001

Fuente: Autores

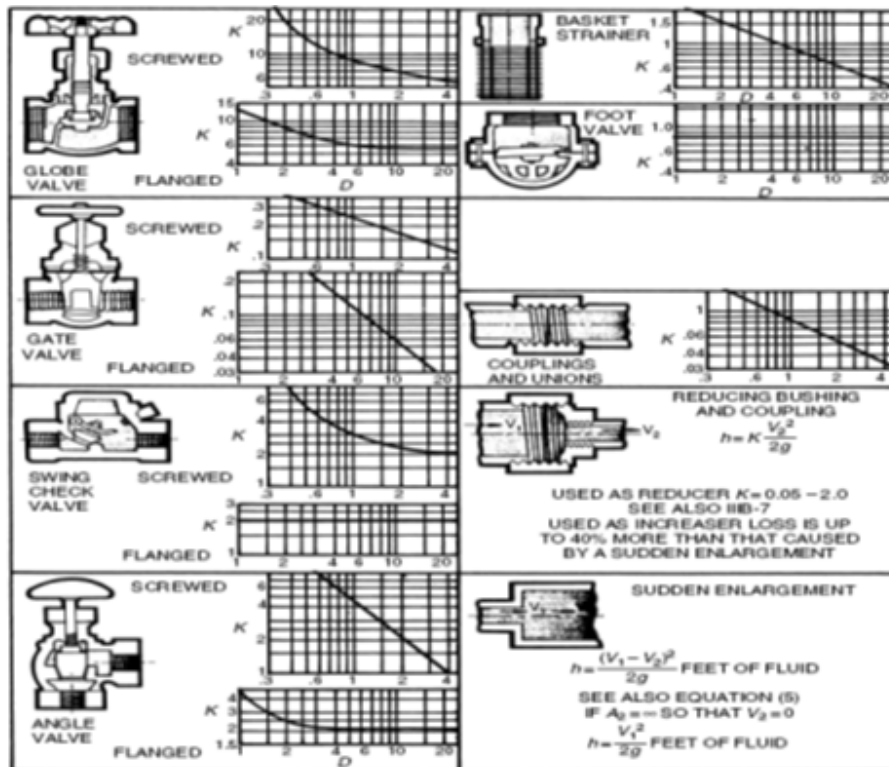
6. Se determinaron los valores de las constantes (k) para cada accesorio en las tuberías de succión y descarga teniendo en cuenta el diámetro comercial de la tubería y haciendo uso de las gráficas K6a y K6b .

Figura K-2a: Coeficientes de resistencias por fricción



Fuente: Applied Process Desing for Chemical and petrochemical plants, Ludwig E. 3ª ed, volume 1, pag 83

Figura K-2b: Coeficientes de resistencias por fricción



Fuente: Applied Process Desing for Chemical and petrochemical plants, Ludwig E. 3ª ed, volume 1, pag 83

Tabla K-7: Accesorios línea P-101

Accesorio	K	Unidades succión	Unidades descarga
Codo regulares con brida 90°	0,15	0	1
Válvula compuerta	0,3	1	2

Fuente: Autores

7. Se calcularon las perdidas por accesorios en la succión y descarga de la bomba

$$h_{f\text{accesorio}} = k \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{f\text{accesorio succion}} = 0,00015 \text{ m}$$

$$h_{f\text{accesorio Descarga}} = 0,00016 \text{ m}$$

8. Se calcularon las pérdidas por equipos en la succión y descarga de la bomba a través de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f\text{equipo}}$$

Se debe tener en cuenta que las pérdidas por velocidad son nulas pues las tuberías de succión y descarga presentan el mismo diámetro y por tanto la misma velocidad, al igual las pérdidas por diferencias de alturas son nulas ya que la bomba no tendrá que vencer ningún tipo de altura. Respecto a las pérdidas de presión, se establece que el depósito inicial está abierto a la atmosfera.

$$h_{f\text{equipo}} = 10,33 \text{ m}$$

9. Se calcularon las pérdidas totales de succión y descarga

$$h_{f\text{sucion}} = h_{f\text{equipo}} + h_{f\text{accesorios}} + h_{f\text{salida recta}}$$

$$h_{f\text{descarga}} = h_{f\text{equipo}} + h_{f\text{accesorios}} + h_{f\text{salida recta}}$$

$$h_{f\text{total}} = h_{f\text{sucion}} + h_{f\text{descarga}}$$

$$h_{f\text{total}} = 0,00016\text{m} + 10,40\text{m}$$

$$h_{f\text{total}} = 10,4016\text{m}$$

10. Se calculó la cabeza total de la bomba

$$H_T = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 - \frac{p_1}{\rho g} - \frac{v_1^2}{2g} - z_1 + h_{f\text{total}}$$

$$H_T = 11,38m$$

11. Se calculó altura en metros de agua

$$H_{T(mH2O)} = H_T(0,86)$$

$$H_{T(mH2O)} = 10,91mH2O$$

12. Se calculó la potencia requerida por la bomba

$$P = g\rho H_{T(mH2O)}Q$$

$$P = 619,33W = 0,83 \text{ hp}$$

13. Tomando la presión de vapor de la tabla 3 se calculó el NPSHA de la bomba

$$NPSHA = H_a + H_s - H_{vpa} - H_f$$

H_{vpa} = presión de vapor del fluido

H_a = presión atmosférica

H_s = Cabeza estática de succión

H_f = pérdidas

$$NPSHA = 7,64mH2O = 25 \text{ Ft H2O}$$

Tabla K-8: Presión de vapor del agua a diferentes temperaturas

Presión de vapor		Temperatura	
Ft de agua	Psia	°C	°F
0,2	0,0886	0	32
0,29	0,126	5	41
0,4	0,173	10	50
0,56	0,242	15	59
0,78	0,338	20	68
2,47	1,07	40	104
6,68	2,89	60	140
15,87	6,87	80	176
33,96	14,7	100	212

Fuente: Whitepaper Net Positive Suction, Wilson Steve

13. Se determinó el NPSHR de la bomba por medio de la Fig. K3, eligiendo una bomba Centrifuga modelo 3656/ 3756 S -Group.

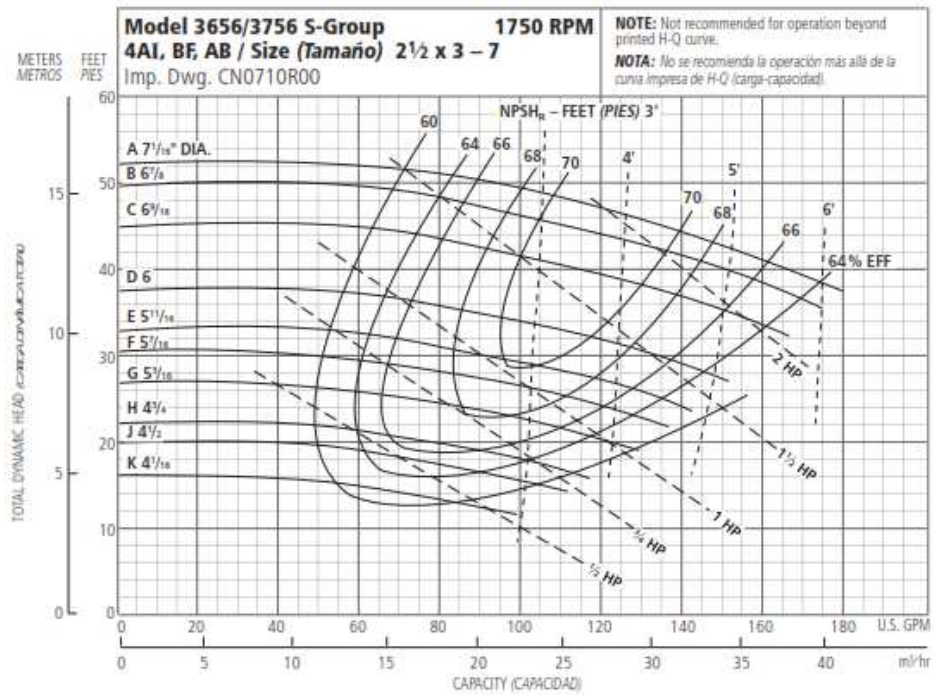
$$NPSHR = 4Ft$$

14. Se verificó que no pueda existir riesgo de cavitación de la bomba

$$NPSHA > NPSHR$$

Entonces la potencia de la bomba es la propicia para el suministro del fluido sin que se produzca cavitación.

Figura K4: Curva característica de la bomba



Fuente: Catálogo ITT industries, Goulds pumps

Siguiendo el mismo procedimiento anterior para el resto de las bombas se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación

Tabla K-8: Bombas planta de tratamiento

BOMBA	POTENCIA(hp)
P-101	0,83 ≈ 1
P-102	2,23
P-103	3,01
P-104	2,92
P-105	2,7
P-106	2,5
P-107	1,79
p-108	1,89
P-109	0,45≈ 1
P-110	0,35≈ 1
P-111	0,45≈ 1
P-112	1
P-113	2,5

Fuente: Autores

Las bombas dosificadoras de solución de HTH y sulfato de aluminio (P-111- P-112) fueron escogidas de acuerdo al caudal manejado en cada una.

Tabla K-9: Bomba Sulfato de Aluminio y HTH

Solución	Caudal	Tipo de bomba
Sulfato de aluminio	62 l/h	Serie Magdos: accionamiento tipo solenoide, caudal hasta 115 l/h, presión máx. 16 bares.
HTH	2,16 $\frac{L}{h}$	Watson Marlow Caudales de trabajo de entre 0,001 ml./min. y 3.000 L/h

Fuente: Autores

ANEXO L: Tanques

1. Se estableció el volumen necesario de cada depósito (P).
2. Se calculó el radio del tanque, mediante:

$$R = \sqrt[3]{\frac{P}{2\pi}}$$

3. Se estableció el diámetro:

$$D = 2R$$

3. Se obtuvo la longitud de la envolvente:

$$L = \frac{P}{2R^2}$$

4. Se calculó el volumen final del tanque:

$$V = \pi R^2 L$$

5. Se recalculo el volumen final del tanque, asumiendo un factor de seguridad de 10%

Se diseñaron:

- Tanque de agua clarificada
- Tanque de agua desmineralizada
- Tanque de almacenamiento agua de lavado de filtro
- Tanque de almacenamiento de sulfato de aluminio (Alúmina)
- Tanque de almacenamiento de hipoclorito de calcio (HTH)
- Tanques de degenerantes

Los resultados se muestran en la tabla L1

Tabla L-1: Dimensionamiento Tanques

<i>Tanque</i>	<i>P(m³)</i>	<i>R(m)</i>	<i>D(m)</i>	<i>L(m)</i>	<i>V(m³)</i>
Agua Clarificada	20,84	1,49	2,97	4,72	11,46
Agua desmineralizada	13,54	1,29	2,58	4,08	7,45
Lavado filtro	4,28	0,88	1,76	2,76	2,35
Alúmina	0,062	0,22	0,44	0,65	0,03
HTH	0,00216	0,072	0,15	0,21	0,002
Regeneración catiónica	0,05	0,20	0,41	0,61	0,0275
Regeneración aniónica	0,02	0,148	0,30	0,44	0,011

Fuente: Autores

Anexo M: Tratamiento De Lodos

1. Se calculó la masa del lodo seco a partir de la siguiente ecuación:

$$W = (S + 03D)Q * 86400 * 10^{-3}$$

Donde

$W =$ masa del lodo

$S =$ Turbiedad UNT

$D =$ Dosificación de coagulante mg/L

$Q =$ Caudal L/s

$$W = 8,28Kg/dia$$

2. Se calculó la masa diaria de lodo suponiendo un porcentaje de lodos del 2%, con una densidad relativa de 1,010

$$masa\ diaria = \frac{W}{\% \text{ lodos}}$$

$$m = 414 Kg/dia$$

$$Volumen\ diario = \frac{m}{\rho_{rel}}$$

$$V = 0,4m^3/dia$$

3. Se realizó el dimensionamiento del depósito teniendo en cuenta la siguiente expresión

$$V = L * B * h$$

Se asumió una relación $L/V=3$ y una profundidad $h=0,2m$, por lo tanto las dimensiones del depósito de secado son:

$$B = 0,8m$$

$$L = 2,4m$$

$$h = 0,2m$$

ANEXO N: Control del Proceso

Toda planta de tratamiento de agua debe tener un sistema de instrumentación y control, que permita una adecuada operación de la planta para producir continuamente el caudal de diseño y satisfacer las normas de calidad establecidas.

La planta de tratamiento debe ser analizada como un proceso total para el diseño del Sistema de Instrumentación y Control, el cual debe aplicar instrumentos para visualización, registro y control, que permitan lograr los siguientes objetivos:

- Mantener las variables de proceso dentro de los límites seguros de operación.
- Detección de situaciones peligrosas.
- Prevención de procedimientos peligrosos de operación.
- Anticiparse a condiciones particulares de operación por medio del conocimiento oportuno de parámetros que incidirán en la operación de la planta.
- Producción de archivos históricos de datos de operación de la planta que permitan análisis estudios posteriores tendientes a optimizar el proceso.
- Mantener la disponibilidad y confiabilidad del servicio.
- Mantener la composición del efluente de la planta dentro de los estándares de calidad especificados
- Operación de la planta al menor costo posible, respetando las normas de calidad.

El sistema de control diseñado para la planta, permitirá tanto el control manual como el control automático de la misma, de manera que ante un eventual fallo en cualquiera de los sistemas no impida su adecuado funcionamiento.

Control Manual: Este control es la forma más simple, pero indispensable en el caso de fallo en el sistema automático. Se basa en una distribución correcta de válvulas que cierran o regulan el paso de los fluidos.

Control Automático: El funcionamiento de la instalación precisa de unos elementos de medida para comprobar que la misma cumple con las prescripciones con las cuales ha sido diseñada.

Control Automático Planta de Tratamiento

Se instalará un control secuencial de procesos, para esto se usará un controlador lógico programable (PLC) de gama, que son sistemas digitales especialmente diseñados para estos fines e incorporan funciones como contadores, temporizadores y reguladores PID. El seguimiento de la operación se realiza a través de un computador

1. Control de Nivel (Tanques)

La medición del nivel debe ser muy cuidadosa para asegurar el funcionamiento correcto de cada proceso y obtener el balance adecuado de materias primas o del efluente de la planta.

Se dispondrá de varios lazos de control de nivel repartidos por todo el sistema con el objetivo de señalar y controlar los niveles de los líquidos en los tanques. Para los tanques de volumen pequeño (alúmina, HTH, Regenerantes) por efectos de ahorro económico, se recomienda usar un flotador de nivel de agua, al cual se le acoplara una resistencia variable (0 a 12 Voltios dc), donde 0V es el nivel bajo y 12V es el nivel alto del tanque, a medida que aumente el nivel varía la resistencia y directamente el voltaje. Para los tanques de volúmenes mayores (Agua Clarificada, Agua Desmineralizada, lavado de filtros), se usará un transmisor de nivel esta señal con señales de 4 a 20 mA. Ambas señales serán visualizadas en el sistema Scada del PLC

Con estos controles de nivel (lazo cerrado) se pretende conocer en todo momento los niveles en cada tanque y si el nivel no es el adecuado se tomen las acciones correspondientes

2. Control de Presión (filtros)

Se instalaran 4 sensores de presión, para las tres columnas de filtración y el desgasificador.

En los filtros, se debe instalar un indicador de presión en la parte superior como en la parte inferior de los rellenos. Cuando se detecte una diferencia de presión de 1 Kg/cm², se transmitirá una señal a la válvula y se dispondrá en funcionamiento el filtro que no está en operación. Una vez esto ocurra, el PLC transmitirá una alarma para que el operario procesada a realizar el lavado del filtro

Para el desgasificador, no se dispone de un lazo de control, sino que solo se instalará un sensor de presión para controlar la perdida de carga dentro de la columna.

3. Control de Conductividad (Columnas de intercambio iónico)

A la salida de la columna de intercambio aniónica, antes del depósito de almacenamiento de agua desmineralizada se instalara un conductímetro que proporciones la información de la calidad de agua de salida en un modo continuo. Cuando el conductímetro detecte una conductividad igual a 100 uS/cm, se cerrara automáticamente el flujo del tanque de agua clarificada hacia la resina y se pondrá en funcionamiento la regeneración de las columnas de intercambio iónico.

Control de dosificaciones de reactivos: Este tipo de control debe realizarse en la etapa de coagulación y desinfección permitiendo una monitorización en continuo y un control de los valores óptimos de concentración de solución de HTH y solución de sulfato de aluminio a través de las bombas dosificadoras utilizadas para el suministro de los reactivos, las cuales están diseñadas para ofrecer un control automático de la dosificación

dependiendo del caudal manejado. Cuando estas detecten un cambio en el caudal de agua a tratar, actuará de manera inmediata cambiando el caudal de solución de reactivo.

Control Manual: Seguimiento de propiedades

Además de los controles mencionados anteriormente se llevara a cabo un seguimiento a las siguientes propiedades:

Turbiedad: La medición continua de la turbiedad por la falta de transparencia del agua debido a la presencia de partículas extrañas que suelen ser nocivas se realizara por medio de analizadores de turbiedad como el equipo de unidad nefelometría de turbiedad (UNT) o Turbidímetro. Se recomienda controlarlo en forma estricta y evaluarlo en las diferentes fases del tratamiento (agua cruda, sedimentada y filtrada). El monitoreo de este parámetro debe efectuarse mediante la toma de muestras cada hora, o por periodos más cortos si se producen cambios bruscos que lo ameriten. Para garantizar la calidad del agua la turbiedad debe ser menor a 5 UNT antes de la filtración y menor que 1UNT después de la filtración para así obtener una desinfección óptima.

Aluminio residual: Debe monitorearse el efluente de la planta mediante toma de muestras con el fin de lograr mediciones objetivas que permitan un control adecuado del proceso de coagulación y filtración. Este control es necesario pues el aluminio en altas concentraciones trae como consecuencia la enfermedad de Alzheimer y causa además problema de corrosión en las tuberías. El valor admisible debe ser menor o igual a 0,2 mg/L para garantizar la calidad del agua.

PH: La medición de pH se realizará manualmente tomando muestras de agua cada dos horas en los efluentes de los procesos de coagulación y desinfección, pues este control nos indica el índice de alcalinidad o acidez del agua a tratar. Para garantizar la calidad del agua el pH debe estar en el rango de 6,0-9,0

Cloro residual: Este control se realiza sobre el proceso de desinfección con el fin de establecer la concentración óptima de cloro libre sobre el agua potabilizada y así proteger el agua de eventuales infecciones de bacterias que pueden causar daños en la salud. La medición debe realizarse cíclicamente en el punto mas alejado de consumo de agua potable mediante toma de muestras cada 2 horas en el efluente de desinfección, la concentración de cloro residual debe estar entre 0,2-3 mg/L para garantizar la calidad del agua.

En la tabla N-1 se establecen los parámetros que se deben controlar en cada operación en la planta de tratamiento

Tabla N-1: Parámetros a controlar

Operación	Parámetros a controlar
Alimentación de agua	pH, turbiedad, alcalinidad, flujo
Coagulación	pH, Al residual , nivel de agua, dosificación de coagulante, flujo
Floculación	pH, nivel de agua, flujo
Sedimentación	Turbiedad, Al residual, nivel de agua, flujo
Filtración	Caudal por filtro, Turbiedad, color, pH, presión, nivel de agua, flujo
Desinfección	Cl residual, pH, turbiedad, alcalinidad, dureza, dosificación de desinfectante, flujo
Manejo de lodos	Concentración de lodos , nivel de lodos
Intercambio iónico	Conductividad
Almacenamientos de agua y soluciones	Caudal de efluente y nivel de fluido

Fuente: Autores

El buen funcionamiento de todos los sistemas de instrumentación y control obedecen a una adecuada instalación de los mismos. La operación y el control que debe llevarse a cabo sobre cada uno de los sistemas deben ser muy cuidadosos debido a que estos elementos son muy sensibles a cambios bruscos que se puedan presentar. A continuación se describe en la tabla xx la instrumentación que se debe utilizar para el control de cada parámetro.

Tabla N-2: Instrumentación de Control

Parámetro	Instrumentación/Control	Tipo de Control	Registro
PH	Toma de muestras	Manual	Planilla de datos
Aluminio residual	Toma de muestras	Manual	Planilla de datos
Cloro residual	Toma de muestras	Manual	Planilla de datos
Turbiedad	Toma de muestras	Manual	Planilla de datos
Flujo	Controlador de flujo	Automático	Continuo
Nivel	Controlador de nivel	Automático	Continuo
Presión	Medidores manométricos	Automático	Continuo
dosificación reactivos	Bombas Dosificadoras	Automático	Continuo

Fuente: Autores

ANEXO O: Evaluación Económica

1. Se realizaron las cotizaciones de materiales, equipos y costos de obras civiles.

Tabla O-1: Presupuesto equipos

Planta de tratamiento presupuestada	
Descripción	Costo(\$)
Adecuación de terreno –Cimiento	14.000.000,00
Canaleta Parshall	7.281.758,00
Floculador	48.934.567,00
Sedimentador	52.210.730,00
Lecho de secado	10.285.327,00
Filtro	74,366,400,00
Columnas Intercambio Iónico	100.633.600,00
SUBTOTAL(\$)	307.712.382,00

Fuente: Autores

Tabla O-2: Costos Tuberías

Costos Tubería PVC-Pavco			
Diámetro Nominal	Valor x 6m (\$)	Longitud de Tubería (m)	Costo total (\$)
4	43.605,00	80	581.400,00
3	25.555,00	10	42.591,67
3/4	16.055,00	4	16.055,00
SUBTOTAL(\$)			640.046,67

Fuente: Pavco

Tabla O-3: Accesorios

Accesorios (Válvulas y codos)			
Válvulas	Precio(\$)	Cantidad	Costo Total(\$)
Válvula de compuerta 4"	184.450,00	51	9.406.950,00
Válvula de bola	60.333,00	2	120.666,00
Válvula de diafragma	60.690,00	4	242.760,00
Codos regulares	830,00	40	33.200,00
SUBTOTAL(\$)			9.803.576,00

Fuente: Autores

Tabla O-4: Costos Bombas

Costos Bombas

Bombas				
Tipo de Bomba	Potencia(Hp)	Valor (\$)	Cantidad	Costo total
Centrifuga-modelo 3656/3776 S-group	1	449.900,00	2	899.800,00
Centrifuga Serie X- 3196	1	749.860,00	2	1.499.720,00
Centrifuga-modelo 3656/3776 S-group	2	1.319.900,00	1	1.319.900,00
Centrifuga-modelo 3656/3776 S-group	2,5	859.900,00	4	3.439.600,00
Centrifuga-modelo 3656/3776 S-group	3	1.036.900,00	4	4.147.600,00
Dosificadora- solenioide Serie Magdos		560.000,00	1	560.000,00
Dosificadora- diafragma-Watson Marlow		855.000,00	1	855.000,00
SUBTOTAL(\$)				12.721.620,00

Fuente: Autores

Tabla O-5: Costos Instrumentación y Control

Instrumentación y Control			
Tipo Instrumentación	Valor (\$)	Cantidad	Costo Total (\$)
Control de Nivel	1.250.000,00	8	10.000.000,00
Control de Presión	1.650.000,00	1	1.650.000,00
Control de Flujo	1.230.000,00	6	7.380.000,00
SUBTOTAL(\$)			19.030.000,00

Fuente: Instrumatic Controls

Entonces el costo final de la planta proyectada es

Tabla O-6: Presupuesto Final

Costo Total (\$)	349.907.624,67
AIU (25%)	87.476.906,17
COSTO FINAL(\$)	437.384.530,83

Fuente: Autores

- Se estableció la vida útil de la planta con el fin de determinar los periodos de la proyección.

$$n = 10 \text{ años}$$

- Se realizó la proyección del consumo de agua en los años de vida útil de la planta como lo muestra la tabla O7 Para el inicio de la proyección se tuvo en cuenta el consumo de agua en los años anteriores (2011-2012) aumentando progresivamente hasta un consumo de 500 m³/día que representa el caudal máximo de operación de la planta teniendo en cuenta los proyectos de expansión de la empresa.

Tabla O-7;proyección anual del consumo de agua

AÑO	CONSUMO ANUAL (m³)
2011	77628
2012	86484
2013	95213
2014	103941
2015	112670
2016	121399
2017	130128
2018	138856
2019	147585
2020	156314
2021	165043
2022	173771
2023	182500

Fuente: Autores

4. Se determinó el aumento anual de m³ de agua de acuerdo a lo establecido por el Decreto 4742, el cual sugiere que este aumento sea determinado por la variación anual del índice de precio al consumidor (IPC) como lo muestra la ecuación.

$$C_F = C_I + (C_I * IPC)$$

Donde

C_F = costo del m³ de agua para el año de interes

C_I = costo del m³ de agua para el año inmediatamente anterior

En la tabla O8 se muestra la variación de IPC y el aumento en el costo de m³ de agua.

Tabla O-8: Aumento en el costo de m3 de agua respecto a la variación del IPC

AÑO	IPC	COSTO (\$/m³)
2011	3,30	1.852
2012	3,36	1.921
2013	3,24	1.984
2014	3,09	2.045
2015	2,95	2.105
2016	2,82	2.164
2017	2,70	2.223
2018	2,70	2.283
2019	2,70	2.345
2020	2,70	2.408
2021	2,70	2.473
2022	2,70	2.540
2023	2,70	2.608

Fuente: Autores

5. Se calculó el costo total anual por consumo de agua en todo el periodo de proyección como se muestra en la tabla O-9:

Tabla O-9: Costo total anual por consumo de agua

AÑO	CONSUMO ANUAL (m³/año)	COSTO (\$/m³)	COSTO TOTAL ANUAL (\$/año)
2011	77628	1.852	143.737.048
2012	86484	1.921	166.158.841
2013	95213	1.984	188.855.957
2014	103941	2.045	212.540.164
2015	112670	2.105	237.185.190
2016	121399	2.164	262.767.081
2017	130128	2.223	289.265.179
2018	138856	2.283	317.002.617
2019	147585	2.345	346.027.002
2020	156314	2.408	376.387.609
2021	165043	2.473	408.135.436
2022	173771	2.540	441.323.258
2023	182500	2.608	476.005.692

Fuente: Autores

6. Se realizó la proyección de la cantidad de insumos necesario anualmente dependiendo de la cantidad de agua utilizada, esta se muestra en la tabla O-10:

Tabla O-10: Proyección cantidad de insumos anual

AÑO	Hidróxido de Sodio (Kg)	Sulfato de Aluminio (Kg)	Ácido Sulfúrico (L)	Hidróxido de Calcio (Kg)
2014	166,3	125,3	644,7	1,1
2015	180,3	135,8	698,9	1,2
2016	194,2	146,3	753,0	1,3
2017	208,2	156,9	807,1	1,4
2018	222,2	167,4	861,3	1,5
2019	236,1	177,9	915,4	1,6
2020	250,1	188,4	969,6	1,7
2021	264,1	199,0	1023,7	1,8
2022	278,0	209,5	1077,9	1,9
2023	292	220	1132	2

Fuente: Autores

7. Se determinó el aumento anual del precio de los insumos teniendo en cuenta la variación del IPC.

Tabla 0-11: Proyeccion costos insumos

AÑO	Hidróxido de Sodio (\$/Kg)	Sulfato de Aluminio (\$/Kg)	Ácido Sulfúrico (\$/L)	Hidróxido de Calcio (\$/Kg)
2013	80.000	70.000	30.000	280.000
2014	82.472	72.163	30.927	288.652
2015	84.905	74.292	31.839	297.167
2016	87.299	76.387	32.737	305.547
2017	89.656	78.449	33.621	313.797
2018	92.077	80.567	34.529	322.270
2019	94.563	82.743	35.461	330.971
2020	97.116	84.977	36.419	339.907
2021	99.738	87.271	37.402	349.085
2022	102.431	89.627	38.412	358.510
2023	105.197	92.047	39.449	368.190

Fuente: Autores

8. Se calcularon los costos anuales por compra de insumos o reactivos químicos como se muestra en la tabla O12, estos serán los gastos anuales que tendrá la empresa para el funcionamiento de la planta de tratamiento.

Tabla 0-12: Costo total por compra de insumos anual

AÑO	Hidróxido de Sodio (\$/Kg)	Sulfato de Aluminio (\$/Kg)	Ácido Sulfúrico (\$/L)	Hidróxido de Calcio (\$/Kg)	Costo Total Insumo Anual (\$)
2013	12.187.229	8.034.389	17.717.393	292.160	38.231.171
2014	13.715.615	9.041.972	19.939.311	328.799	43.025.698
2015	15.306.005	10.090.431	22.251.367	366.925	48.014.729
2016	16.956.853	11.178.747	24.651.315	406.500	53.193.414
2017	18.666.825	12.306.040	27.137.216	447.492	58.557.573
2018	20.456.773	13.486.058	29.739.385	490.402	64.172.618
2019	22.329.771	14.720.825	32.462.288	535.303	70.048.187
2020	24.288.998	16.012.439	35.310.547	582.271	76.194.255
2021	26.337.745	17.363.068	38.288.948	631.384	82.621.146
2022	28.479.418	18.774.958	41.402.441	682.726	89.339.543

2023	30.717.540	20.250.433	44.656.150	736.379	96.360.502
------	------------	------------	------------	---------	------------

Fuente: Autores

9. Se calcularon los costos por utilización de agua cruda proveniente del canal del dique como se muestra en la tabla O13. Esto representa la tasa retributiva por utilización de aguas de conformidad con lo establecido en la Resolución 240 de 2004, el cual indica que esta aumenta con el aumento del IPC.

Tabla O-13: Costo anual de agua cruda

Año	Costo m^3 agua cruda (\$)	Costo Anual Agua Cruda (\$)
2013	0,74	70.457
2014	0,76	79.293
2015	0,78	88.488
2016	0,80	98.032
2017	0,82	107.96
2018	0,85	118.266
2019	0,87	129.094
2020	0,89	140.421
2021	0,92	152.265
2022	0,94	164.647
2023	0,97	177.587

Fuente: Autores

10. Se estimaron los flujos del proyecto, teniendo en cuenta que el flujo de inversión corresponde a los costos de construcción de la planta, los flujos positivos representan la diferencia entre el ahorro económico anual en el pago de consumo de agua por la implementación de la planta y la compra de insumos anual. Los resultados se muestran en la tabla O14:

Tabla O-14: Flujos del Proyecto

AÑO	Flujos del Proyecto (\$)
2013	- 437.384.530,83
2014	169.514.466
2015	189.170.461
2016	209.573.667
2017	230.707.606
2018	252.829.999
2019	275.978.815
2020	300.193.354
2021	325.514.290
2022	351.983.715
2023	379.645.190

Fuente: Autores

11. Se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR) a partir de los flujos proyectados, por medio de la función TIR de la herramienta informática EXCEL 2010

$$TIR = 47\%$$

12. Se calculó la tasa o costo de capital promedio ponderado (WACC) con el fin de determinar el Valor Presente Neto (VPN)

$$WACC = \frac{E}{D + E} K_e + \frac{D}{D + E} K_d(1 - taxes)$$

$$WACC = 6,10 \%$$

Donde

$E = Patrimonio$

$D = Deuda$

$K_e = Costo del patrimonio$

$K_d = Costo de la deuda$

$taxes = impuestos = 0,33$

Para lo anterior se asumió que la empresa hará la inversión con un 50% de su capital y el 50% restante será adeudado al banco, es decir

$$E = 0,5$$

$$D = 0,5$$

El costo de la deuda representa la tasa de interés del banco, para esto se consultaron diversos créditos y se escogió el crédito BANCOLDEX para capital de trabajo y desarrollo empresarial el cual trabaja tasas de crédito de

$$i = DTF + 3,70\% EA$$

Con un DTF = 3,96% EA, lo cual representa una tasa de

$$K_d = 7,8 \%$$

El costo del patrimonio fue calculado por el modelo CAPM

$$K_e = R_f + \beta(R_m - R_f)$$

$$K_e = 6,98\%$$

Donde R_f es la rentabilidad libre de riesgo, esa fue obtenida de los bonos del tesoro del colombiano para un periodo de 10 años.

$$R_f = 2\%$$

La rentabilidad del mercado R_m fue obtenida de la Bolsa de Valores de Colombia

$$R_m = 5\%$$

El beta para el sector petroquímico (β) es escogido de la base de datos de Value Line, de 6.177 empresas.

$$\beta = 1,45$$

13. Se calculó el Valor Presente Neto (VPN) a partir de los flujos proyectados y la tasa o costo de capital promedio ponderado (WACC), por medio de la función VPN de la herramienta informática EXCEL 2010

$$\mathbf{VPN = \$ 1.446.606.128,04}$$

ANEXO P: Operación y Mantenimiento

En todos los sistemas de tratamiento de agua, existen cuatro factores principales que determinan si una planta posee las condiciones requeridas para una operación y mantenimiento óptimos como son confiabilidad, flexibilidad, mano de obra, automatización y control. La planta de tratamiento debe estar diseñada para funcionar en épocas de invierno y verano, situación que interviene directamente de la fuente haciendo oscilar la concentración de las sustancias disueltas de agua cruda, se debe asegurar la producción normal de la planta por lo cual debe estar en capacidad para operar continuamente con uno o más unidades fuera de servicios para mantenimiento y reparación. En todo el programa de operación y mantenimiento el personal de planta debe vigilar por el correcto funcionamiento de todas las unidades de tratamiento, controlar la calidad de agua que está suministrando a los diferentes procesos, adecuar la dosificación de sustancias químicas y el grado de tratamiento a las variaciones del agua cruda. El grado de automatización y control debe ser tal que provea la confiabilidad en la que opera la planta, razón por la cual es importante contar con unidades de fácil funcionamiento.

La operación normal debe incluir cualquier tipo de actividad que no provoque la suspensión parcial o temporal de la planta y que asegure que está produciendo el caudal para el cual fue diseñada la planta, junto con la calidad requerida para los distintos procesos. Para lograr una operación adecuada de la planta se debe realizar continuamente mediciones de caudal (Normas Técnicas Colombianas NTC 3705, NTC 3933, NTC 3945 y Título C.15), medición de parámetros de calidad de agua, tales como turbiedad, color, pH, aluminio residual, alcalinidad, preparación de soluciones de productos químicos, ajuste de dosificadores dependiendo del caudal y calidad del agua, lavado de filtros, medición de cloro residual en el agua tratada, limpieza de obras, mantenimiento de zonas verdes, control de calidad de los procesos y regeneración de resinas.

Actividades De Mantenimiento

Para el mantenimiento de los diferentes sistemas, deben realizarse las siguientes actividades según las RAS 2000 numeral C.17:

- 1. Canaleta Parshall:** Se debe obtener la concentración óptima de coagulante por medio de pruebas de jarras para así fijar la cantidad de sustancia química a dosificar, es necesario observar que se esté efectuando la dosificación en el punto adecuado. Se debe realizar inspección, reacondicionamiento y limpieza del mezclador y válvulas.
- 2. Floculadores:** Se debe verificar que la dosificación y mezcla rápida estén operando satisfactoriamente, debe observarse en la salida del Floculador el tamaño de los flóculos, determinar la turbiedad residual después de decantado y compararla con la obtenida bajo los mismos parámetros de la prueba de jarras. Periódicamente es necesario realizar inspección y limpieza del Floculador.
- 3. Sedimentadores:** Debe llenarse con agua hasta el nivel de operación y dejarse en reposo como mínimo 30 minutos antes de la operación normal, luego debe darse paso al agua de entrada al Sedimentador para que la unidad entre en operación. Se debe controlar la turbiedad y/o color del agua sedimentada con la frecuencia establecida, comprobar si por el efluente hay salida de flóculos y drenar varias veces por día, accionado la válvula de purga de remoción de lodos. Periódicamente se debe verificar si existe en la estructura indicios de fisuras y detección de problemas para corregirlos, además se hace necesario el reacondicionamiento y limpieza del Sedimentador.
- 4. Filtros:** Se deben evitar turbulencias indebidas y agitación de la arena en el llenado del filtro, mantener una buena coagulación del agua ajustando la dosis optima permanente para obtener un mejor filtrado, lavar el filtro cuando este alcance la perdida de carga máxima permitida por el sistema o cuando la calidad del agua

alcance el límite máximo permitido por las normas. Es necesario verificar el funcionamiento de las válvulas o compuertas.

5. **Desinfección:** Se debe verificar que la dosis de desinfectante sea la apropiada para alcanzar la cantidad de cloro residual necesario en el proceso de potabilización mediante pruebas periódicas al efluente así como también se debe garantizar un tiempo de residencia adecuado.
6. **Intercambio Iónico:** Para asegurar la calidad del agua de proceso se debe realizar la regeneración de resinas cuando la calidad del agua así lo exija, es necesario realizar pruebas a los tanques de almacenamiento de solución de regenerantes para garantizar la total inexistencia de flujos o vertidos.
7. **Tanques de Almacenamiento:** Mantener las tapas de las cámaras cerradas y aseguradas, se debe hacer limpieza de sedimentos que se puedan formar manipulando la válvula de limpieza sin ingreso al tanque. Debe hacerse revisión y corrección de válvulas, observar si existen grietas, fugas y rajaduras en el tanque para corregirlos.
8. **Mantenimiento De Los Dosificadores:** Para una buena dosificación de reactivos que permitan la calidad en los procesos se debe hacer revisión de válvulas, verificación de las condiciones eléctricas, limpieza, calibración y lubricación de los mecanismos de dosificación.

ANEXO Q PLANO Y DIAGRAMA DE EQUIPOS

