

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA EL USO EFICIENTE DE LAS
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA PTAR EN PHARMETIQUE LABS
S.A.

MARÍA CAMILA PINILLA NOVOA
ELIAN FERNANDA RODRÍGUEZ ROJAS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA EL USO EFICIENTE DE LAS
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA PTAR EN PHARMETIQUE LABS
S.A.

MARÍA CAMILA PINILLA NOVOA
ELIAN FERNANDA RODRÍGUEZ ROJAS

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

Nota de aceptación

Jurado 1
Ing. Juan Camilo Cely Garzón.

Jurado 2
Ing. Orlando Castiblanco Urrego.

Bogotá D.C., Agosto 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada-García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Iván Ramírez Marín

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento.

Estos corresponden únicamente a los autores.

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta aquí, por bendecirme en este camino y no dejarme desistir. A mi mamá por apoyarme, guiarme, darme la oportunidad de convertirme en una profesional y luchar por nosotras con su amor incondicional, a mi abuela por ser mi motivación todos los días, a mi hermana por su compañía y su lealtad, a Molly y a toda mi familia por tenerme presente en sus oraciones, por su paciencia y por ser el motor de vida. Agradezco a mi novio por confiar y estar incondicionalmente, a mis amigas por creer en mí, a la vida por darme la oportunidad de conocer y compartir grandes momentos con maestros, amigos y compañeros; también doy gracias al baloncesto por permitirme vivir experiencias increíbles y dejarme excelentes amistades. Quiero darle las gracias al Ingeniero Camilo Trujillo, por la oportunidad de desarrollar este proyecto, por su disposición y su apoyo en todas las situaciones generadas debido a la pandemia del Covid-19. Finalmente quiero agradecer a mi compañera de tesis, a quien considero mi amiga por ser una excelente persona con grandes cualidades y virtudes, por permitirme compartir este camino a pesar de todo y lograr culminar juntas el proyecto de la mejor manera.

María Camila Pinilla Novoa.

Agradezco a Dios por cada una de las bendiciones que me ha brindado, a mis padres por su amor, apoyo y dedicación incondicional a lo largo de toda mi vida, pues ellos han sido mi mayor motivación para culminar con éxito cada meta que tengo en mente y convertirme en la persona que hoy en día soy. A mis hermanas y familiares, por estar presentes en cada etapa que he transcurrido, que con sus consejos me han orientado a tomar buenas decisiones y me han enseñado a perseguir cada sueño hasta hacerlo realidad. Infinitas gracias a todos mis amigos, compañeros y personas cercanas que han depositado su confianza en mí y en mis capacidades para dar este gran paso como profesional. Quiero agradecer al Ingeniero Camilo Trujillo, quién nos abrió las puertas para realizar el proyecto y a todos los colaboradores de la empresa Pharmetique Labs S.A. por sus conocimientos y aportes brindados. Para finalizar, quiero agradecerle a mi compañera del proyecto de grado, quien ha sido una excelente persona y amiga, llena de muchas capacidades y que, con esfuerzo y dedicación logramos la ejecución del presente proyecto.

Elian Fernanda Rodríguez Rojas.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la empresa Pharmedique Labs S.A y al Ingeniero Cristian Camilo Trujillo Ariza por darnos la oportunidad de realizar este proyecto de grado, por su apoyo, por los conocimientos compartidos y por tener un seguimiento continuo con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos en este documento, teniendo presente que en medio de la contingencia por el Covid-19, fue la persona que nos dio soluciones oportunas para dar continuidad al proyecto. Adicionalmente, a los colaboradores Reinaldo, Efraín Bello y José Triana quienes se tomaron el tiempo de darnos a conocer sus experiencias y trayectorias a través de las explicaciones necesarias para el desarrollo de este.

A la Fundación Universidad de América por guiarnos, brindarnos los conocimientos y herramientas a lo largo de nuestra formación para ser profesionales y así, estar en la capacidad de enfrentarnos a la realidad de la industria actual. También, queremos dar gracias a los profesores que nos orientaron durante la carrera, al Ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres y a los demás maestros que aportaron para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	25
1. MARCO TEÓRICO	26
1.1 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN	27
1.1.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBQ ₅).	27
1.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO).	27
1.1.3 pH.	28
1.1.4 Temperatura.	28
1.1.5 Sólidos decantables o sedimentables.	28
1.1.6 Oxígeno disuelto (OD).	28
1.2 FENOL	29
1.2.1 Degradación de fenoles.	30
1.2.2 Riesgos por la presencia de fenoles.	30
1.2.3 Usos del fenol.	31
1.2.4 Toxicidad del contaminante fenol.	31
1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	32
1.3.1 Tratamiento primario.	32
1.3.2 Tratamiento secundario.	35
1.3.3 Tratamiento terciario.	35
1.4 TRATAMIENTOS TERCIARIOS PARA REMOVER FENOLES	35
1.4.1 Oxidación avanzada.	36
1.4.2 Adsorción con carbono.	37
1.4.3 Resinas de intercambio iónico.	38
1.5 MARCO LEGAL	41
1.5.1 Resolución 631 de 2015.	41
1.5.2 Ley 373 de 1997.	42
1.5.3 Resolución 1207 de 2014.	43

2. DIAGNÓSTICO	45
2.1 GENERALIDADES	45
2.1.1 Proceso de producción.	45
2.2 PROCESO DE LA PTAR OPERADA EN PHARMETIQUE LABS S.A.	49
2.2.1 Tratamiento primario.	50
2.2.2 Tratamiento secundario.	53
2.2.3 Puntos de muestreo.	57
2.2.4 Revisión de los datos históricos.	60
2.3 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	62
2.4 USOS DEL AGUA	65
2.4.1 Limpieza de rutina en el área de producción de jarabes.	66
2.4.2 Limpieza de rutina en el área de producción de emulsiones.	66
2.4.3 Consumo de agua.	67
2.5 COMPARACIÓN CON LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014.	72
2.5.1 Cuantificación exacta de fenoles.	74
2.5.2 Remoción de fenoles para el reúso de las aguas residuales.	76
3. SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO	78
3.1 CRITERIOS DE ANÁLISIS PARA LA MATRIZ DE DECISIÓN	78
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN	80
3.2.1 Selección del tratamiento a partir del Método Pugh.	81
3.3 ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO.	82
3.3.1 Alcance.	82
3.3.2 Viabilidad.	85
3.3.3 Fiabilidad.	89
3.3.4 Características del efluente.	96
3.3.5 Costos de construcción y operación.	98
3.3.6 Disposición de residuos.	100
3.4 TRATAMIENTO SELECCIONADO	102
4. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO	105
4.1 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	105
4.1.1 Resina Amberlyst A26 OH.	106

4.1.2 Resina Amberlite IRA-67.	106
4.2 MATERIALES	107
4.2.1 Equipo de intercambio iónico..	108
4.3 ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	109
4.3.1 Procedimiento.	110
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN EL ARTÍCULO DE ESTUDIO	110
4.4.1 Efecto del tiempo de recirculación.	110
4.4.2 Efecto de la concentración inicial.	112
4.5 CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE REMOCIÓN DE FENOLES	114
4.6 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	115
4.6.1 Especificaciones de la columna.	115
4.6.2 Parámetros de diseño de la columna.	116
4.7 CICLO DE TRABAJO	122
4.7.1 Etapa de operación.	122
4.7.2 Etapa de lavado o retrolavado.	123
4.7.3 Etapa de regeneración.	123
4.7.4 Etapa de enjuague.	129
5. COSTOS	134
5.1 COSTOS DE INVERSIÓN	134
5.2 COSTOS DE INSTALACIÓN	135
5.3 AHORRO EN EL CONSUMO DEL AGUA POTABLE	137
6. CONCLUSIONES	139
7. RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFIA	141
ANEXOS	151

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetro con su punto de muestreo y tipo de muestra.	57
Tabla 2. Registro de los parámetros básicos sanitario en el año 2017.	60
Tabla 3. Registro de los parámetros básicos sanitario en el año 2018.	61
Tabla 4. Caracterización de las aguas residuales de Pharmetique Labs S.A.	63
Tabla 5. Consumo de agua potable en el año 2019.	67
Tabla 6. Verificación del cumplimiento de la Resolución 1207 de 2014.	73
Tabla 7. Matriz de decisión (Método Pugh).	80
Tabla 8. Matriz ponderada de Pugh.	81
Tabla 9. Influencia del pH inicial en el tratamiento con ozono.	92
Tabla 10. Cambio de pH al momento de aplicar el tratamiento de O ₃ .	97
Tabla 11. Costos para el tratamiento con ozono.	99
Tabla 12. Costos de equipos para la adsorción con carbono.	100
Tabla 13. Síntesis de resultados para las especificaciones de la columna.	121
Tabla 14. Síntesis de resultados para el ciclo de trabajo.	131
Tabla 15. Costos de inversión.	134
Tabla 16. Porcentaje para el costo de instalación.	135
Tabla 17. Costos de instalación.	136

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Sustancias contaminantes en la Industria Farmacéutica.	26
Cuadro 2. Factores que afectan los niveles de OD.	28
Cuadro 3. Afectaciones de la salud por el fenol.	31
Cuadro 4. Uso agrícola e industrial para el reúso en distintas actividades.	43
Cuadro 5. Parejas de desinfectantes usadas en la limpieza.	67
Cuadro 6. Criterios de análisis.	78
Cuadro 7. Procesos de oxidación avanzada más usados.	83
Cuadro 8. Equipos y/o materiales necesarios para la adsorción con carbono.	88
Cuadro 9. Temperaturas máximas para las resinas aniónicas.	89
Cuadro 10. Rango de pH óptimo para los tipos de resinas.	90
Cuadro 11. Condiciones de operación para la adsorción con carbono.	94
Cuadro 12. Métodos para la purificación de CNT.	102
Cuadro 13. Propiedades las resinas.	107
Cuadro 14. Comparación Amberlyst A26 OH con Ambersep 900 OH.	115

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de coagulación y floculación.	34
Figura 2. Diagrama de producción de Jarabe.	47
Figura 3. Diagrama de producción de Emulsión.	49
Figura 4. Trampa de grasa casino.	50
Figura 5. Trampas de grasa producción.	50
Figura 6. Trampas de grasa laboratorios de calidad.	51
Figura 7. Tanque de igualación	51
Figura 8. Sistema de recirculación.	51
Figura 9. DAF y parte superior del DAF.	52
Figura 10. Grasas y lodos.	53
Figura 11. Reactor biológico.	54
Figura 12. Tanque de aireación.	54
Figura 13. Aireador 1 y 2.	55
Figura 14. Tanque de decantación.	55
Figura 15. Regla para medir el caudal a la salida del vertimiento.	56
Figura 16. Diagrama de la PTAR.	56
Figura 17. Punto de muestreo A y C.	57
Figura 18. Diagrama muestra puntual.	58
Figura 19. Diagrama muestra compuesta.	59
Figura 20. Muestra compuesta en Pharmetique Labs S.A	60
Figura 21. Diagrama propuesto para la PTAR de Pharmetique Labs S.A.	86
Figura 22. Sistema de tratamiento con ozono.	87
Figura 23. Efecto del pH inicial en la remoción de fenoles.	91
Figura 24. Remoción de fenoles a partir del tratamiento con O ₃ .	93
Figura 25. Efecto del pH en la adsorción con carbono a 298K.	94
Figura 26. Influencia del tiempo de contacto en la adsorción con carbono.	95
Figura 27. Efecto de la dosis del adsorbente con carbono.	96
Figura 28. Diagrama de flujo para el proceso de destrucción del ozono.	101
Figura 29. Diagrama de flujo para la evaluación del tratamiento.	105
Figura 30. Diagrama de flujo del experimento.	108
Figura 31. Efecto de la recirculación para la resina Amberlyts A26.	110
Figura 32. Efecto de la recirculación para la resina Amberlite IRA-67.	111
Figura 33. Efecto de la concentración inicial.	113
Figura 34. Configuración del sistema de regeneración en contra corriente.	116
Figura 35. Definición de BV.	117

Figura 36. Sistema de recirculación del regenerante.

131

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance hídrico general.	69
Ecuación 2. Balance general del consumo de agua.	72
Ecuación 3. Eficiencia de remoción de fenoles.	109
Ecuación 4. Porcentaje de remoción de fenoles.	114
Ecuación 5. SFR.	117
Ecuación 6. Altura del lecho o resina empacada.	119
Ecuación 7. Variación en la altura de la resina expandida.	119
Ecuación 8. Altura de la resina expandida.	120
Ecuación 9. Espacio libre de la columna.	121
Ecuación 10. Altura total.	121
Ecuación 11. Caudal de carga.	122
Ecuación 12. Caudal de regeneración.	124
Ecuación 13. Masa del regenerante.	124
Ecuación 14. Masa de agua para la solución de regenerante.	125
Ecuación 15. Volumen de regenerante.	126
Ecuación 16. Volumen de agua para la solución.	126
Ecuación 17. Velocidad de regeneración.	127
Ecuación 18. Tiempo de regeneración.	128
Ecuación 19. Volumen de agua de enjuague.	129
Ecuación 20. Caudal de enjuague.	130

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Consumo de agua potable del año 2019.	68

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Parámetros fisicoquímicos de la Resolución 631 de 2015.	152
Anexo B. Parámetros de calidad de la Resolución 1207 de 2014.	155
Anexo C. Cuantificación inicial exacta de fenoles.	158
Anexo D. Ficha técnica resina Amberlyst A26 OH.	159
Anexo E. Ficha técnica resina Amberlite IRA-67.	161
Anexo F. Ficha técnica resina Ambersep 900 OH.	164
Anexo G. Cotización resina Ambersep 900 OH.	166
Anexo H. Frecuencia del control interno de los parámetros.	167

ABREVIATURAS

<i>PTAR</i>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
<i>ARnD</i>	Aguas Residuales no Domésticas.
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>DBQ₅</i>	Demanda Bioquímica de Oxígeno - 5 días en aguas.
<i>DQO</i>	Demanda Química de Oxígeno.
<i>pH</i>	Potencial de hidrógeno.
<i>SS</i>	Sólidos Sedimentables.
<i>DAF</i>	Flotación por aire disuelto.
<i>%v/v</i>	Porcentaje volumen/volumen.
<i>Q</i>	Caudal o consumo de agua.
<i>H₂O₂</i>	Peróxido de hidrógeno.
<i>O₃</i>	Ozono.
<i>Fe (II)</i>	Óxido de hierro.
<i>CNT</i>	Nanotubos de carbono.
<i>PEG</i>	Polietilenglicol.
<i>Sem</i>	Semana.
<i>BV</i>	Volumen del lecho (Bed volume).
<i>SFR</i>	Tasa de flujo de servicio.
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio o soda cáustica.
<i>POA</i>	Procesos de Oxidación Avanzada.
<i>MWCNT</i>	Nanotubos de carbono de paredes múltiples.
<i>OD</i>	Oxígeno Disuelto.

GLOSARIO

AGUA POTABLE: es aquella que es apta para el consumo humano puesto que cumple con las características físicas, químicas y microbiológicas establecidas para su uso¹.

AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES: son todas las aguas que quedan después del uso de éstas en diversas actividades².

CAUDAL: es el volumen del agua que pasan a través de una sección de un cuerpo de agua en una unidad de tiempo³.

DIGESTIÓN: es la descomposición o degradación que llevan a cabo las bacterias y los microorganismos, de material orgánico biodegradable, bien sea en la presencia de oxígeno (digestión aerobia) o en su ausencia (digestión anaerobia)⁴.

EFLUENTES: son los productos de un sistema o proceso que se descargan al ambiente; estos pueden ser tratados o no⁵.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR): conjunto de equipos y procesos utilizados para la descontaminación de aguas residuales⁶.

PROGRAMA DE AHORRO Y USO EFICIENTE DEL AGUA: conjunto de proyectos y acciones dirigidas que plantean y deben implementar los usuarios del recurso hídrico, para hacer un uso eficiente del agua⁷.

¹ OBSERVATORIO COLOMBIANO DE GOBERNANZA DEL AGUA. Glosario Jurídico – Gobernanza del Agua. En: Ministerio de Ambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. prr. 6. [5-08-2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/glosario>

² Ibid. OBSERVATORIO COLOMBIANO DE GOBERNANZA DEL AGUA. prr. 9.

³ AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Glosario. En: Ministerio de Ambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. prr. 22. [5-08-2020]. Disponible en: <http://portal.anla.gov.co/permiso-ocupacion-cauce#:~:text=Caudal%20l%C3%ADquido%3A%20Volumen%20de%20agua,en%20una%20unidad%20de%20tiempo.>

⁴ PHARMETIQUE LABS S.A. 1009- Análisis y caracterización de muestras provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales. Bogotá: 2015. p. 2.

⁵ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO. Glosario Ambiental. En: Corporación Autónoma Regional del Quindío. [sitio web]. Armenia: la entidad. p.16. [11-02-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.crq.gov.co/Documentos/GLOSARIO%20AMBIENTAL/GLOSARIO%20AMBIENTAL.pdf>

⁶ PHARMETIQUE LABS S.A. Op.Cit. p. 2.

⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. [sitio web]. Bogotá: Minambiente. Administración del recurso hídrico. prr. 3. [16-02-2020]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/demanda/uso-eficiente-y-ahorro-de-agua>

REÚSO DEL AGUA: utilización de los efluentes líquidos, lo cuales cumplen con el criterio de calidad⁸.

USO EFICIENTE DEL AGUA: son las buenas prácticas de aprovechamiento del recurso hídrico, en todas sus formas, las cuales determinan la sostenibilidad del recurso y los bajos impactos económicos y ambientales⁹.

TIEMPO DE ACCIÓN: equivale al momento exacto donde se tiene contacto entre los contaminantes y el tratamiento que se aplica en las aguas residuales, siendo este, el tiempo en el que se alcanza la máxima remoción de los compuestos o sustancias indeseadas.

VERTIMIENTO: es la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido¹⁰.

⁸ OBSERVATORIO COLOMBIANO DE GOBERNANZA DEL AGUA. Op.Cit. prr. 48.

⁹ Ibid. OBSERVATORIO COLOMBIANO DE GOBERNANZA DEL AGUA. prr. 54.

¹⁰ CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES. Permiso de Vertimientos. En: CAR. [sitio web]. Colombia: la entidad. prr. 2. [5-08-2020]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/vercontenido/1168#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20vertimiento%3F,contenidos%20en%20un%20medio%20l%C3%ADquido>.

RESUMEN

En este proyecto se realiza una propuesta con el fin de dar un uso eficiente a los recursos hídricos tratados en la PTAR de la empresa Pharmetique Labs S.A., teniendo como propósito principal reusar estas aguas en procesos que no involucren el proceso productivo, disminuyendo la concentración de los contaminantes fenólicos de 0.32 mg/L a 0.002 mg/L para cumplir con los parámetros de calidad y generar una competitividad a nivel ambiental para la empresa.

De esta forma, se propone implementar una columna de intercambio utilizando una resina de tipo aniónica fuerte como lo es la Ambersep 900 OH, ya que esta cuenta con las mismas propiedades de la resina de estudio Amberlyst A26 OH, siendo más rentable la primera; teniendo en cuenta también, las condiciones de diseño y costos de inversión para dar reuso a las aguas tratadas en procesos de prelimpieza de los equipos en el área de fabricación de jarabes o emulsiones, generando un impacto ambiental positivo.

Para esto, se selecciona el tratamiento terciario resinas de intercambio iónico a nivel teórico mediante una matriz de decisión, comparándolo con otros tratamientos muy utilizados para la remoción de fenoles tales como la oxidación avanzada con ozono y adsorción con carbono; analizando los criterios de selección para cada uno de ellos. La evaluación de este tratamiento se realiza de manera teórica comparando el uso de dos tipos de resinas, la aniónica débil Amberlite IRA-67 y la fuerte Amberlyst A26 OH, en soluciones preparadas con fenoles variando la concentración entre 1 mg/L y 200 mg/L, manteniendo 7 g/L de resina, pasando por un equipo de intercambio iónico de lecho fijo a temperatura ambiente, teniendo en cuenta que el volumen de cada solución es de 2 L y manejando un caudal de 10 L/h.

En conclusión, los resultados que se analizan son los porcentajes de remoción, los cuales van desde el 99.96% hasta el 74.2% para la Amberlyst A26 OH y de 65.7% hasta el 22.1% para la Amberlite IRA-67, según la variación en las concentraciones entre 1 mg/L y 200 mg/L del contaminante fenol; donde, se estudia el efecto de la concentración inicial, el tiempo de recirculación y el pH de la muestra; y así, se determina la concentración final de fenoles a nivel teórico para la empresa Pharmetique Labs S.A., la cual es de 0.000128 mg/L.

Palabras clave: tratamientos terciarios, fenoles, resina, intercambio iónico, concentración, remoción.

INTRODUCCIÓN

Los fenoles son compuestos orgánicos que se encuentran presentes en las aguas residuales producto de los procesos donde ocurre la descomposición de la materia orgánica, generando así, contaminación al ambiente¹¹, razón por la cual ha aumentado el interés en las industrias por presentar alternativas eficaces que permitan la remoción de este contaminante. Pharmetique Labs S.A. se ha caracterizado por ser una empresa competitiva debido a que cuenta con un portafolio reconocido mundialmente, teniendo la necesidad de ser una empresa que aporte al medio ambiente mediante el uso adecuado del agua potable, siendo este, un recurso indispensable en la actualidad. Por esta razón, se busca remover los fenoles con el fin de dar un reúso industrial a las aguas tratadas dentro de las instalaciones de la empresa en actividades que no involucren el proceso productivo.

Inicialmente, en el primer capítulo se realiza una investigación acerca de los fundamentos teóricos los cuales son el punto de partida para proponer un tratamiento terciario que permita remover los compuestos fenólicos en la empresa Pharmetique Labs S.A., teniendo en cuenta los parámetros de caracterización, dentro de los cuales están la DQO, DBO₅, pH, temperatura, SS o OD, siendo estos medidos tanto por la empresa como por el laboratorio externo Conoser Ltda., e intervienen directamente en la aplicación de diversos tratamientos para las aguas residuales. También, se encuentra información referente al fenol, contaminante a remover de las aguas de la PTAR de Pharmetique Labs S.A, así como sus riesgos y diversos usos. Otro parte de esta investigación tiene que ver con el tratamiento para las aguas residuales, donde se explican los tipos que existen, primario y secundario; además de exponer lo referente a los tratamientos terciarios posibles para eliminar los contaminantes fenólicos, es decir la oxidación avanzada, la adsorción con carbono y las resinas de intercambio iónico.

En el segundo capítulo se desarrolla el diagnóstico del estado actual de las aguas residuales en la PTAR, describiendo el proceso de producción de tres líneas específicas como lo son líquidos, sólidos y grasas; luego se explica el proceso de tratamiento que se lleva a cabo en la PTAR, iniciando por el tratamiento primario, el cual consta de las trampas de grasa, el tanque de igualación, el DAF y el tanque de clarificación; seguido del secundario, el cual está conformado por un reactor biológico. Adicionalmente, se realiza la identificación de los puntos de muestreo designados por el laboratorio Conoser Ltda. para la toma de muestras y medición de parámetros fisicoquímicos, como también una revisión de los datos históricos de estas mediciones con el fin de corroborar que la empresa cumple con la Resolución 631 de 2015 para vertimientos puntuales de la industria farmacéutica. Otro parte

¹¹ REMTAVARES. Tratamiento de aguas contaminadas por fenol mediante el proceso de Fenton heterogéneo. En: madrimasd. [sitio web]. Madrid: la entidad. [17-06-2020]. Disponible en: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/05/13/91674>

importante que se estudia son los usos del agua en actividades que no involucren el proceso productivo para determinar donde se reutilizará y las condiciones de calidad necesarias para este reuso; en este caso es en limpieza de equipos. Para cerrar este capítulo, se realiza la comparación de los parámetros de vertimiento con la Resolución 1207 de 2014, en la cual se evidencia el incumplimiento de fenoles, teniendo una concentración de 0.32 mg/L, la cual debería ser menor a 0.002mg/L.

En el siguiente capítulo se selecciona el tratamiento apropiado para un uso eficiente de las aguas tratadas en Pharmetique Labs S.A. a nivel teórico mediante una matriz de decisión, para la cual se tienen en cuenta seis criterios de decisión establecidos según los requerimientos de la empresa como lo son el alcance, la viabilidad, la fiabilidad, las características del efluente, los costos de construcción y la disposición de los residuos evaluados para los tratamientos terciarios de oxidación avanzada, adsorción por carbono y resinas de intercambio iónico; donde se selecciona el último ya que es el más adecuado para alcanzar un porcentaje de remoción de fenoles suficiente y cumplir así con la concentración máxima permitida de 0.002 mg/L.

Por consiguiente, en el capítulo 4 se evalúa el tratamiento seleccionado, a partir de la identificación de las resinas de intercambio aniónico fuerte y débil, Amberlyst A26 OH y Amberlite Ira 67, respectivamente, siendo estas utilizadas en el artículo de estudio, en el cual, emplean un equipo de intercambio iónico que cuenta con un sistema de recirculación para la remoción de fenoles. Así, los análisis que se realizan para las dos resinas mencionadas corresponden al efecto del tiempo de recirculación y el efecto de la concentración inicial del contaminante, con el fin de determinar la resina de intercambio más efectiva para la remoción de fenoles. De esta forma, se realiza la cuantificación teórica para la eliminación del contaminante en las aguas tratadas de Pharmetique Labs S.A. Adicionalmente, se realiza la descripción de la propuesta, donde se hace necesario evaluar la resina Ambersep 900 OH, la cual cumple con las mismas propiedades de la Amberlyst A26 OH por asuntos de rentabilidad, y así, se determina el dimensionamiento de la columna, teniendo en cuenta el volumen y altura de la resina, y el ciclo de trabajo de la misma incluyendo la operación del regenerante requerido.

Finalmente, se describe en el último capítulo los costos asociados a la propuesta de una columna con resina de intercambio, el cual determina la factibilidad económica de la propuesta y el ahorro que se espera obtener si llegase a implementarse.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para el uso eficiente de las aguas residuales provenientes de la PTAR en Pharmetique Labs S.A. de la sede de Bogotá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual de las aguas residuales en la planta de tratamiento en Pharmetique Labs S.A.
- Seleccionar el tratamiento apropiado para un uso eficiente de las aguas tratadas en Pharmetique Labs S.A.
- Evaluar el tratamiento seleccionado para las aguas residuales provenientes de la PTAR a nivel teórico.
- Determinar los costos asociados del tratamiento analizado.

1. MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales de la industria farmacéutica se generan durante los procesos de fabricación de medicamentos y limpieza de equipos, produciendo efluentes y lodos que contienen principalmente disolventes, fenoles, restos de principios activos, sales, alcoholes y residuos tóxicos, orgánicos e inorgánicos. Esta industria maneja sustancias potencialmente contaminantes¹² las cuales se muestran en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Sustancias contaminantes en la Industria Farmacéutica.

Sustancias contaminantes	
Compuestos orgánicos alifáticos o aromáticos	<ul style="list-style-type: none">• Alcanos.• Alcoholes.• Cetonas.• Ésteres.• Tolueno.
Órganohalogenados	<ul style="list-style-type: none">• Cloro y derivados.
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none">• Níquel.• Manganeso.• Cromo.

Fuente: elaboración propia, con base en RAMOS ALVARINO, Claridad. Los residuos de la industria farmacéutica. CENIC Ciencias Biológicas. [en línea]. 2006, 37 (1). p. 3. [15-05-2020]. 0253-5688. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220542005>

Además de las mencionados anteriormente, también podrían llegar a tener otros tipos de contaminantes como los cianuros, compuestos nitrógeno-fosforo, ácidos, bases, materia orgánica de origen biológico y compuestos organometálicos¹³.

En una planta de producción de principios activos o fármacos se evidencian 3 tipos de aguas residuales, las contaminadas directas, indirectas y otras. Dentro de las directas se encuentran las utilizadas en el proceso, en la fermentación, en la limpieza de equipos y en el lavado de algunos gases. Las indirectas son las que se contaminan durante fallos en el proceso como goteos de bombas o válvulas, operaciones de carga o descarga y transporte. Por último, están las otras, las cuales no se contaminan durante la fabricación, es decir las aguas sanitarias o lluvias¹⁴.

¹² RAMOS ALVARINO, Claridad. Los residuos de la industria farmacéutica. REVISTA CENIC Ciencias Biológicas. [en línea]. 2006, 37 (1). p. 3. [15-05-2020]. 0253-5688. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220542005>

¹³ Ibid. p. 3-4.

¹⁴ Ibid. p. 5.

Para el desarrollo de este proyecto se deben tener en cuenta los fundamentos para la ejecución de un tratamiento terciario con el fin de remover compuestos fenólicos de las aguas tratadas de la empresa Pharmetique Labs S.A., los cuales se estudian durante este capítulo.

1.1 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN

Los parámetros para definir la calidad de agua se describen en las siguientes definiciones.

1.1.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBQ₅). Es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, teniendo en cuenta que su medición se debe realizar en condiciones aeróbicas, dentro de un periodo de cinco días y a una temperatura de 20 °C. El análisis DBQ₅ al medir la cantidad de oxígeno consumido por los organismos vivos en la utilización de la materia orgánica presente en un residuo, es necesario garantizar que durante el periodo del análisis (cinco días), se tenga la cantidad de oxígeno requerido por los organismos¹⁵.

1.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO). Es de la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación química de los compuestos orgánicos o degradables, teniendo en cuenta condiciones específicas como el agente oxidante y la temperatura¹⁶. El análisis de este parámetro se realiza para tener una estimación de la contaminación orgánica o inorgánica del efluente mediante el método del dicromato potásico. Al momento de determinar la DQO, la muestra debe ser procesada en el menor tiempo posible para evitar la oxidación natural o conservarse mediante una acidificación¹⁷.

¹⁵ NAVARRO, Olga. Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Electrometría. [en línea]. Colombia: 2007. p. 2. [Consultado 11, mayo, 2020]. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%A](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%A4Dgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa)

¹⁶ RODRÍGUEZ, Carlos. Demanda Química de Oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. [en línea]. Colombia: 2007. p. 2. [Consultado 11, mayo, 2020]. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADg](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADg eno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb)

¹⁷ FERNANDEZ GONZALEZ, Jesús, *et al.* Manual de Fitodepuración. Filtros de mofocfitas en flotación. En: Fundación Global Nature. [sitio web]. Las Rozas: la entidad. p. 3. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap %EDtulos%201%20a%202.pdf>

1.1.3 pH. Es una medida que permite expresar la concentración de iones de hidrógeno que se encuentran en una disolución. Se utiliza para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas, teniendo una escala de 0 a 14, donde 7 representa la neutralidad. Existen diversas técnicas para realizar la medición, tales como: la neutralización de la disolución, la cual consiste en emplear un indicador que determina el valor del pH según la escala del color resultante; también se puede determinar a partir de la medición del potencial eléctrico de los electrodos presentes en la disolución¹⁸.

1.1.4 Temperatura. Es uno de los parámetros físicos más influyentes en el agua, debido a que este, retarda o acelera la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección, los procesos de mezcla rápida como lo son: la floculación, la sedimentación y la filtración¹⁹.

1.1.5 Sólidos decantables o sedimentables. Son aquellos sólidos suspendidos que sedimentan en un tiempo determinado; formando la cantidad aproximada de barro que se va a obtener²⁰.

1.1.6 Oxígeno disuelto (OD). Se define como la cantidad de oxígeno vital en un cuerpo de agua para que se dé la respiración celular y la vida acuática o terrestre. Esta cantidad se utiliza como indicador de la calidad del agua y puede verse afectada por algunos factores²¹ que se muestran en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Factores que afectan los niveles de OD.

Factores que afectan los niveles de OD
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. • Población de plantas acuáticas.

Fuente: SENSORES E INSTRUMENTACIÓN GUEMISA. Oxígeno disuelto. En: Sensores e instrumentación guemisa. [sitio web]. Rivas Vaciamadrid: la entidad. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://guemisa.com/articulos/que%20es%20oxigeno_disuelto.pdf

¹⁸ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDIO. Glosario Ambiental. Citado por: ALARCÓN RONDÓN, Eliana y NEITA PINTO, Laura. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada en una empresa de cereales en la ciudad de Bogotá. Bogotá: Repositorio Universidad de América, 2017. p. 23.

¹⁹ PEREZ LOPEZ, Jhean Eleison. Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2010. p. 19. [Consultado 11, febrero, 2020]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133761.pdf>

²⁰ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO. Op. cit. p. 36.

²¹ SENSORES E INSTRUMENTACIÓN GUEMISA. Oxígeno disuelto. En: Sensores e instrumentación guemisa. [sitio web]. Rivas Vaciamadrid: la entidad. p. 1. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://guemisa.com/articulos/que%20es%20oxigeno_disuelto.pdf

Cuadro 2. (Continuación).

Factores que afectan los niveles de OD
<ul style="list-style-type: none">• Cantidad de material orgánico en descomposición.• Flujo de las corrientes.• Presión atmosférica.• Actividad humana.

Fuente: SENSORES E INSTRUMENTACIÓN GUEMISA. Oxígeno disuelto. En: Sensores e instrumentación guemisa. [sitio web]. Rivas Vaciamadrid: la entidad. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://guemisa.com/articulos/que%20es%20oxigeno_disuelto.pdf

1.2 FENOL

El fenol es un compuesto orgánico que está presente en las aguas residuales de industrias como la petrolera, farmacéutica, textil o del carbón²². Es un compuesto soluble en alcohol y poco soluble en agua; la cual depende y aumenta según el número de grupos hidroxilos que tengan el anillo bencénico. Se considera de carácter ácido por la poca estabilidad de los aniones que se forman durante la ionización. Es utilizado como desinfectante o preservante, en soluciones diluidas.

Los fenoles se caracterizan por tener una acelerada oxidación, lo cual genera aparición de impurezas en las aguas; esta se da por eliminación del hidrogeno o por adición de oxidantes, formando benzoquinona. También puede llegar a formar sales al momento de la ruptura de su grupo OH²³. Dentro los fenoles, se encuentra los derivados halogenados o clorofenoles. En general, son sólidos incoloros, poco solubles en agua y presentan un olor desagradable. Se consideran muy tóxicos²⁴. Como tal, el fenol reacciona con los halogenados para producir los dihalofenoles o trihalofenoles, con el cloro para generar el diclorofenol y pentaclorofenol y con el ácido sulfúrico para dar el ácido hidroxibencensulfónico. Adicionalmente, produce el ácido pícrico o 2-4-6 trinitrofenol mediante la nitración de este y el ácido oxálico mediante su oxidación; así como el bisfenol A por medio de la condensación con la acetona y el ácido salicílico cuando reacciona su derivado fenato de sodio y el bióxido de carbono; entre otros²⁵.

²² PASCUAL GARCÍA, Isabel. Estudio de la extracción de fenoles y clorofenoles empleando líquidos iónicos mediante el método COSMO-RS. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM), Madrid: 2019. p. 16. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: http://oa.upm.es/56006/1/TFG_ISABEL_PASCUAL_GARCIA.pdf

²³ MONTOYA DELGADO, Oscar Ernesto y MATUTE SANCHEZ, Ricardo Heriberto. Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua: 2015. p. 15. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/1482/1/60186.pdf>

²⁴ PASCUAL GARCIA. Op. Cit. p. 16.

²⁵ ECURED. Fenol. [Sitio WEB]. Colombia: la entidad. [25, julio, 2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Fenol>

1.2.1 Degradación de fenoles. Los compuestos fenólicos tienen una participación importante en la disposición final de las aguas, aun así, estas tengan un tratamiento para disminuir los contaminantes, debido a que, en el caso de los fenoles, estos pueden quedar en mínimas concentraciones. De esta forma, al ejecutar un tratamiento en las aguas residuales, las células de estos compuestos tienen una penetración generando una transformación activa, lo que aumenta la formación de metabolitos electrófilos, los cuales están directamente relacionados con el aumento de la toxicidad de los fenoles²⁶. Asimismo, al hablar de metabolitos electrófilos se debe mencionar la bioactivación donde se lleva a cabo un conjunto de reacciones metabólicas las cuales transforman los compuestos en otros con mayor reactividad química, generando sustancias aún más tóxicas que el fenol²⁷. Por consiguiente, una de las sustancias más comunes en la degradación de los fenoles son las quinonas, las cuales se clasifican según la complejidad de su estructura química en benzoquinonas, naftoquinonas o antraquinonas²⁸.

1.2.2 Riesgos por la presencia de fenoles. Los fenoles y clorofenoles están presentes tanto en aguas residuales industriales y domésticas²⁹. Son considerados altamente tóxicos para el ser humano y de fácil absorción, ya que atacan el sistema nervioso, gastrointestinal, renal, ocular o dérmico. El contacto con este se produce por aguas contaminadas, alimentos o productos que contienen compuestos fenólicos³⁰. Por otra parte, la contaminación también puede ser en el ámbito ambiental. El vertimiento de los compuestos orgánicos a los ecosistemas acuáticos genera efectos perjudiciales para los animales y el medio que los rodea ya que estos, tienen la capacidad de alterar la vida en ríos, lagos o mares, así sea en pequeñas concentraciones. Por esto, es necesario remover estos contaminantes de las aguas residuales, con tratamientos específicos; evitando la degradación, ya que generalmente se producen otras sustancias con más riesgos para la salud³¹.

²⁶ PARDO DÍAS, Sergio, *et al.* Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas. *Revista de Biología Tropical*. [en línea]. 2017, 65. (2). p. 686. [Consultado 24, julio, 2020]. ISSN electrónico 0034-7744. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v65n2/0034-7744-rbt-65-02-00685.pdf>

²⁷ UNIVERSIDAD DE ALCALÁ. Metabolitos reactivos y respuesta tóxica. [sitio web]. España: la entidad. p. 1. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/BA-RES-11.pdf

²⁸ PORTALFARMA. Compuestos fenólicos: quinonas. [sitio web]. España: la entidad. p. 1. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://botplusweb.portalfarma.com/documentos/panorama%20documentos%20multimedia/PAM236%20PLANTAS%20MEDICINALES%20CON%20QUINONAS.PDF>

²⁹ IGBINOSA, Etinosa, *et al.* Toxicological Profile of Chlorophenols and Their Derivatives in the Environment: The Public Health Perspecti. *The Scientific World Journal*. [en línea]. 2013, 2013. (1).11. p. 1. [Consultado 27, abril, 2020]. ISSN electrónico 2356-6140. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/460215/>

³⁰ MONTOYA DELGADO. Op. Cit. p. 15.

³¹ PASCUAL GARCIA. Op. Cit. 15

1.2.3 Usos del fenol. El fenol se usa para la producción de resinas fenólicas principalmente, también en la fabricación del nylon y otras fibras. Se utiliza en industrias como la química, farmacéutica y clínica como fungicida, bactericida y desinfectante. Además, se utiliza como materia prima para producir agroquímicos, bisfenol A, el cual se utiliza para producir resinas epoxi; aspirina y enjuagues bucales o pastillas para el dolor³².

1.2.4 Toxicidad del contaminante fenol. Este es un compuesto que puede ser absorbido a través de la piel, sistema gastrointestinal o inhalado en el aire o humo; atacando los pulmones y las mucosas³³. Los efectos que genera en la salud humana³⁴ se evidencian en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Afectaciones de la salud por el fenol.

Sistema	Síntomas leves	Síntomas a largo plazo.
Sistema nervioso central	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación leve en el tracto respiratorio. • Nauseas. • Sudoración excesiva. • Dolor de cabeza. • Vértigo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdida de conciencia. • Falla en la respiración. • Estado de coma.
Sistema gastrointestinal	Vómito y diarrea.	Daño en la mucosa del tracto intestinal y muerte por fallo respiratorio.

Fuente: MONTOYA DELGADO, Oscar Ernesto y MATUTE SANCHEZ, Ricardo Heriberto. Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua: 2015. p. 15. [Consultado 13, mayo, 2020]. Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/1482/1/60186.pdf>

³² BARBOSA TRILLOS, Dalje Sunith. Diseño, operación y modelización de procesos continuos biorreactor enzimático-módulo de membrana, aplicación a la eliminación de contaminantes fenólicos de efluentes industriales. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Doctor. Universidad de Murcia, Murcia: 2012. p. 33. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/28426>

³³DREISBACH, Robert y TRUE, Bev-Lorraine. Dreisbach's Handbook of Poisoning Prevention, Diagnosis and Treatment. Citado por: MONTOYA DELGADO, Oscar Ernesto y MATUTE SANCHEZ, Ricardo Heriberto. Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua: 2015. p. 15. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/1482/1/60186.pdf>

³⁴ MONTOYA DELGADO. Op. Cit. p. 13-14.

Cuadro 3. (Continuación).

Sistema	Síntomas leves	Síntomas a largo plazo.
Sistema ocular	Inflamación del ojo y párpado.	
Sistema dérmico	Manchas en la piel.	Muerte celular y gangrena.

Fuente: MONTOYA DELGADO, Oscar Ernesto y MATUTE SANCHEZ, Ricardo Heriberto. Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua: 2015. p. 15. [Consultado 13, mayo, 2020]. Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/1482/1/60186.pdf>

En cuanto al impacto ambiental, este se genera en el medio acuoso y su presencia crea una toxicidad en los organismos acuáticos³⁵. La contaminación por el vertimiento de compuestos orgánicos en el agua genera alteraciones en el ecosistema y representa un riesgo para los animales, plantas, microorganismos y seres humanos³⁶.

1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos de aguas residuales hacen referencia al conjunto de procedimientos de tipo físico, químico y biológico que tienen como finalidad convertir el agua contaminada en agua potable, y así lograr un reúso de esta³⁷.

1.3.1 Tratamiento primario. Se refiere al proceso de sedimentación y mezcla de aguas industriales provenientes de casino, planta, control de calidad y sala de máquinas, que se realiza en un tanque enterrado.

1.3.1.1 Clarificación. Es la forma de remover los sólidos suspendidos y materiales coloidales convirtiéndolos en partículas grandes para que así, sean más fáciles de eliminar mediante los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación³⁸.

³⁵ RAMOS ALVARIÑO, Claridad. Los residuos de la industria farmacéutica. REVISTA CENIC Ciencias Biológicas. [en línea]. 2006, 37 (1). p. 4. [15-05-2020]. 0253-5688. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220542005>

³⁶ PASCUAL GARCIA. Op. Cit. p. 15

³⁷ CONCEPTO.DE. Tratamiento de aguas residuales. [Sitio WEB]. Argentina. La entidad. prr. 1. [12, febrero,2020]. Disponible en: <https://concepto.de/tratamiento-deaguas-residuales/>

³⁸ COGOLLO FLÓREZ, Juan. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Dyna. [en línea]. 2011, 78 (165). 18-27. prr. 7. [Consultado 16, febrero,2020]. ISSN electrónico 2346-2183. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

1.3.1.2 Coagulación. Es la acción de desestabilizar partículas coloidales con ayuda de un reactivo químico llamado coagulante, por medio de la neutralización de cargas. Dentro de los tipos de coagulación se encuentran:

- Por adsorción: el agua se caracteriza por presentar altas concentraciones de partículas en estado coloidal, permitiendo la adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide utilizado³⁹.
- Por barrido: el agua se caracteriza por presentar un color claro, es decir, tiene baja turbiedad y presencia de coloides, permitiendo de esta forma la interacción de las partículas con los precipitados de sulfato de aluminio o de cloruro férrico⁴⁰.

1.3.1.3 Coagulante. Son los materiales químicos que se utilizan para eliminar las partículas coloidales formando flóculos (partículas más grandes) y que sedimentan más rápido⁴¹.

Las etapas de la coagulación son:

- Hidrólisis de coagulantes y desestabilización de partículas en suspensión.
- Formación de compuestos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por coloides
- Adsorción mutua de coloides⁴².

1.3.1.4 Floculación. Es la acumulación de partículas suspendidas, mediante la formación de flóculos con ayuda de una sustancia química llamada floculante⁴³.

³⁹ ANDÍA CARDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: coagulación y floculación. En: Sedapal. [sitio web]. Lima: la entidad. p. 26. [16-02-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=101543

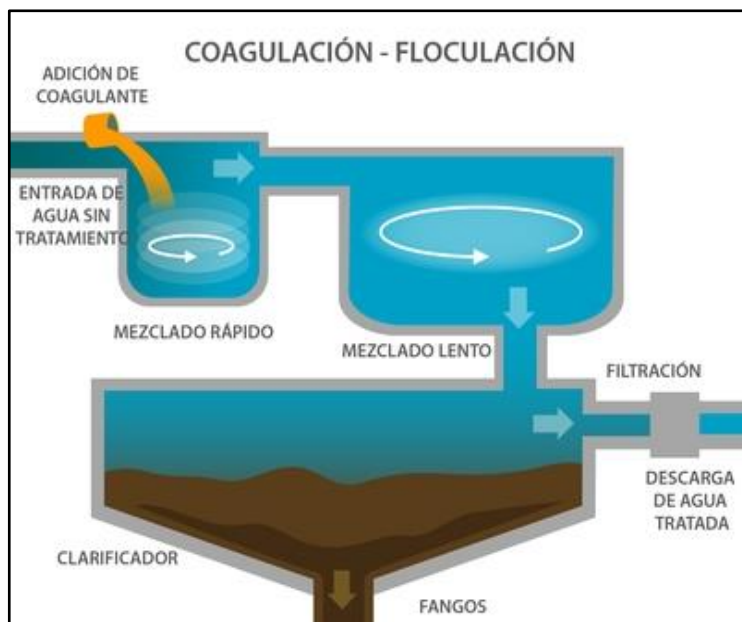
⁴⁰ Ibid. p. 27.

⁴¹ COGOLLO FLÓREZ. Op. Cit. p. 8.

⁴² ALARCÓN RONDÓN, Eliana Iveth y NEITA PINTO, Laura Catalina. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada en una empresa de cereales en la ciudad de Bogotá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Bogotá: 2017. p.27. [Consultado 16, febrero, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6042>

⁴³ ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS. Tratamiento. [Sitio WEB]. Washington D.C. La entidad. p. 2-3. [16, febrero, 2020]. Disponible en: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation.html>

Figura 1. Proceso de coagulación y floculación.



Fuente: ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS. Coagulación y floculación. [En línea]. [Consultado el 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation.html>

1.3.1.5 Trampa de grasa. Pretratamiento utilizado para separar la grasa y aceites, debido a que son más ligeros, logrando que floten para formar una capa en la superficie⁴⁴.

1.3.1.6 Sedimentación. “Consiste en la separación, por la acción de la gravedad de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua y no pueden retenerse en las unidades de pretratamiento, por su finura o densidad, ni pueden separarse por flotación”⁴⁵.

1.3.1.7 Flotación. Es el proceso de separación de los sólidos en el agua, puesto que estas partículas son de menor densidad. La flotación se puede dar de manera natural, ayudada e inducida⁴⁶.

⁴⁴ QUIMIA. Trampas de grasa. [Sitio WEB]. México: la entidad. [17, febrero, 2020]. Disponible en: <https://quima.com/blogs/blog/trampas-de-grasa>

⁴⁵ UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL. Investigando el tratamiento del agua. Conceptos. [Sitio WEB]. Salamanca: la entidad. [11, mayo, 2020]. Disponible en: https://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Conceptos/uni_04/u5c3s1.htm#Anchor1

⁴⁶ LENNETECH. Glosario del agua. [Sitio WEB]. Florida: la entidad. [17, febrero, 2020]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm#F>

1.3.2 Tratamiento secundario. Es un sistema de tratamiento biológico que cuenta con una eficiencia de remoción del 85% del DBO₅ del afluente. Se utiliza un sistema biológico de lodos activados, donde por descomposición del material orgánico proveniente de las aguas industriales, se genera CO₂, O₂, agua tratada y lodos biológicos principalmente.

1.3.2.1 Reactor biológico. Es un reactor discontinuo en el que el agua residual interactúa con un lodo biológico en un medio aireado. Es un proceso que se lleva a cabo en un mismo tanque donde se presenta: aeración, reacción y clarificación⁴⁷.

1.3.3 Tratamiento terciario. Cualquier proceso de tratamiento adicional al tratamiento secundario es llamado tratamiento terciario; generalmente se basa en la clarificación de agua mediante un tratamiento físico químico el cual adiciona coagulante al agua y posteriormente un floculante para aglutinar los flocs formados y mediante la succión de aire sobre este flujo generar un manto de lodo que es retirado con paletas raspadoras.

1.4 TRATAMIENTOS TERCIARIOS PARA REMOVER FENOLES

Los tratamientos terciarios son utilizados para mejorar la calidad del agua residual con el fin de cumplir con las normas de vertimiento o dar un uso eficiente a estas; disminuyendo la concentración de ciertas sustancias para no generar riesgos para la salud o en el ambiente y cumplir con las normas exigidas para el reusó de aguas. Para este proyecto se definen los métodos que permiten remover los fenoles de las aguas residuales de la industria farmacéutica y que así, poder darles un reusó industrial dentro de la empresa Pharmetique Labs S.A.

Los métodos utilizados para aguas contaminadas se clasifican en destructivos y no destructivos. En los tratamientos destructivos, se busca que los contaminantes orgánicos se transformen en dióxido de carbono o sustancias biodegradables. Por otra parte, los no destructivos implican operaciones físicas para separar el contaminante, entre estos se encuentran el uso del carbón activado, arcillas o resinas sintéticas y extracción con un disolvente.

⁴⁷ AGUAS INDUSTRIALES. Ventajas y desventajas de los reactores biológicos secuenciales (SBR). [Sitio WEB]. La Rioja: la entidad. [18, febrero, 2020]. Disponible en: <http://aguasindustriales.es/ventajas-y-desventajas-de-los-reactores-biologicos-secuenciales-sbr/>

1.4.1 Oxidación avanzada. Los tratamientos de oxidación avanzada se basan en procesos fisicoquímicos que generan cambios en la estructura química de los contaminantes mediante el uso de radicales hidroxilos; los cuales pueden generarse a partir de medio fotoquímicos o no fotoquímicos. Es un método eficiente para retirar los compuestos orgánicos, mediante la degradación de estos, utilizando un agente oxidante. Los radicales hidroxilos (OH) se consideran los agentes de más alto potencial de oxidación, pero se manejan otros como el oxígeno atómico, ozono y peróxido de hidrógeno. La eficiencia de este se determina por la gran factibilidad termodinámica y la velocidad de reacción, la cual se ve favorecida por la participación de radicales, normalmente los hidroxilos OH⁴⁸.

1.4.1.1 Oxidación con ozono. El tratamiento con ozono es muy eficiente debido a que este es un gran agente oxidante y se utiliza para desinfectar el agua potable. Se emplea para aguas residuales muy contaminadas, ya que permite mejorar el olor, color, gusto, características de filtración y biodegradabilidad de las aguas. El ozono, se convierte en oxígeno y agua, por esto no es un método que genere otras sustancias tóxicas. Es un proceso muy costoso debido a la generación del agente oxidante por descarga eléctrica y las limitaciones de transferencia de masa. La energía necesaria para sintetizar el ozono está a partir de aire entre 22 y 33 kWh/kg O₃, mientras que a partir de oxígeno está entre 12 a 18 kWh/kg O₃. Además, es un método muy sensible a la neutralización de los radicales, es decir que se forman carbonatos. También este proceso requiere una eficiente agitación, por lo que se necesitan difusores y esto genera más costos de inversión. Igualmente, es necesario tener una relación molar alta entre Ozono y el contaminante (mayor a 5:1) lo que aumenta más los costos⁴⁹.

1.4.1.2 Oxidación con ozono y peróxido de hidrógeno. Este proceso consiste en utilizar dos agentes oxidantes para producir una reacción adicional de destrucción de los compuestos orgánicos. El método consiste en que el H₂O₂ inicie la descomposición del O₃ para generar más radicales hidroxilos y así, tratar los contaminantes orgánicos en bajas concentraciones. Este tratamiento es un proceso costoso pero rápido. Es usado para degradar compuestos organoclorados, desinfectantes con cloro o plaguicidas presentes en aguas⁵⁰.

⁴⁸ DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson y LITTER, Marta. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: ResearchGate. [sitio web]. p.3. [28-04-2019]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la_eliminacion_de_contaminantes

⁴⁹ Ibid. p. 4-6.

⁵⁰ Ibid. p. 6-7.

1.4.1.3 Oxidación con reactivo de Fenton. Es el tratamiento más antiguo, donde se utiliza el peróxido de hidrogeno como agente oxidante junto con una solución de sales ferrosas que oxidan algunos compuestos orgánicos. En este proceso se da la reacción entre estos dos para generar radicales hidroxilos. Tiene una desventaja y es que se da una reacción indeseada, donde los OH reaccionan con la oxidación del hierro Fe (II) y no solo con la materia orgánica; por ende, es necesario no tener un exceso de Fe (II) con el fin de no capturar todos los radicales hidroxilos. Se utiliza para degradar compuestos alifáticos, aromáticos clorados, fenoles, cloro fenoles entre otros; pues son pocos los compuestos que no son destruidos por este reactivo como los organoclorados. Se utiliza también para la reducción de la demanda química de oxígeno o el tratamiento de lixiviados. Tiene como ventajas que el hierro es abundante, el peróxido de hidrogeno es de fácil manejo, no produce sustancias contaminantes como otros métodos, no tiene limitaciones de transferencia de masa ya que es un sistema homogéneo y el diseño de los reactores es muy sencillo. Entre las desventajas se encuentran que la relación estequiométrica es muy alta ya que es necesario una adición continua de Fe (II) y H₂O₂ y que, si se utiliza el hierro en bajas concentraciones de pureza, no se cumple la destrucción total del contaminante⁵¹.

1.4.2 Adsorción con carbono. El proceso de adsorción consiste en un sistema de transferencia de masa, en el cual las moléculas disueltas, que generalmente se encuentran en estado líquido o gaseoso, se unen a los sitios activos de la superficie de otra molécula en estado sólido. De esta forma, las moléculas que durante el proceso son adsorbidas reciben el nombre de adsorbato, y el sólido receptor se denomina adsorbente. Ahora bien, la adsorción se presenta por la interacción entre las fuerzas de la superficie sólida y las fuerzas del líquido o gas, donde la superficie sólida tiende a concentrar sus fuerzas, permitiendo el proceso de atracción de las moléculas, átomos o iones del adsorbato (sustancias en estado líquido o gaseoso)⁵².

Así, los fenoles al ser compuestos orgánicos de estructura básica C₆H₅OH, permiten ser removidos sobre materiales como carbón activado, el cual es el medio más utilizado en la adsorción, teniendo en cuenta que este es un proceso utilizado en la remoción de algún contaminante presente en el agua, de tal forma, el contaminante soluble es eliminado por contacto con una superficie sólida; a su vez, este permite la reducción de varios agentes químicos que generan afectaciones en el sabor, color y olor del agua⁵³.

Dentro de sus propiedades, el carbón activado tiene una alta área superficial (entre 500 y 2500 m²/g), y cuenta con una gran cantidad de microporos (poros con un

⁵¹ Ibid. p. 7-10.

⁵² MONTOYA DELGADO. Op. Cit. p. 18.

⁵³ Ibid. MONTOYA DELGADO. p. 17-19.

diámetro inferior a 2 nm)⁵⁴, lo que permite que se caractericen por presentar una adsorción elevada para tratamientos de purificación de líquidos y gases.

La remoción de fenoles empleando la técnica del carbón activado puede resultar viable en términos de costos de producción, teniendo en cuenta que, se puede tener una mayor eficiencia cuando se trabajan bajas concentraciones de compuestos fenólicos y grandes tiempos de residencia⁵⁵.

1.4.2.1 Tipos de adsorción. Según lo descrito anteriormente, el proceso de adsorción depende de las fuerzas involucradas en el proceso, para lo cual se tiene la siguiente clasificación: la fisisorción (adsorción física) y la quimisorción (adsorción química)⁵⁶.

1.4.2.1.1 Fisisorción. Las moléculas del adsorbato permanecen unidas en la superficie del sólido debido a las fuerzas intermoleculares, donde, solo se puede llevar a cabo a temperaturas por debajo de la temperatura de ebullición de la sustancia adsorbida⁵⁷.

1.4.2.1.2 Quimisorción. Se genera una reacción química entre la sustancia adsorbida y la superficie del adsorbente, lo cual forma enlaces fuertes que permiten procesos irreversibles. La unión formada se caracteriza por presentar mayor fuerza que la que se genera en la fisisorción. Para llevar a cabo su operación es necesario mantener altas temperaturas, donde, la cantidad de adsorción sobre la superficie depende tanto de la sustancia que se adsorbe como del adsorbente⁵⁸.

1.4.3 Resinas de intercambio iónico. Son esferas de material sintético con un diámetro de 0.5 a 1 mm, utilizadas normalmente para tratamientos de aguas residuales industriales. Se caracterizan por retener selectivamente los iones presentes en las aguas, teniendo en cuenta la composición de las resinas (concentraciones ácidas, básicas y polares), es decir, están constituidas por grupos funcionales (positivos o negativos), que permiten remover los iones de las sustancias indeseadas de una disolución⁵⁹.

En forma general, se puede decir que existe dos tipos de resinas: resinas intercambiadoras catiónicas o ácidas (cuentan con iones de hidrogeno H+) y resinas

⁵⁴ UNIVERSIDAD DE BARCELONA. [sitio web]. Barcelona: ub. Precipitación: el carbón activo. [25-04-2020]. Disponible en: http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio_carbo.html#

⁵⁵ BARBOSA TRILLOS. Op. Cit. p. 52.

⁵⁶ MONTOYA DELGADO. Op. Cit. p. 19.

⁵⁷ Ibid. MONTOYA DELGADO. p. 19-20.

⁵⁸ Ibid. MONTOYA DELGADO. p. 20.

⁵⁹ CONDORCHEM ENVITECH. [sitio web]. España: ce. Tratamiento de aguas. prr. 1. [25-04-2020]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/resinas-intercambio-ionico>

intercambiadoras aniónicas o básicas (presentan iones de hidroxilo OH o iones de cargas negativas).

Según lo anterior, estas resinas intercambian cantidades equivalentes de iones para eliminar sustancias seleccionadas presentes en las aguas, teniendo en cuenta que el intercambio entre la resina y las sustancias del agua ocurre entre las partículas que tengan la misma carga⁶⁰. De esta forma, las resinas de intercambio se adaptan a las necesidades de las aguas en cuanto a la eliminación de impurezas, debido a que la reacción ocurre en condiciones de electroneutralidad⁶¹.

Así, el contacto que se tiene entre el fluido a tratar y la resina, permite que los iones del fluido desplacen los iones que se encuentran en los sitios activos de la resina, generando así el intercambio iónico.

Dentro de las ventajas que se tienen del proceso iónico en el tratamiento de aguas residuales se encuentran: es un tratamiento terciario que cuenta con una alta capacidad de intercambio el cual requiere de inversiones moderadas; las resinas son estables químicamente, lo que permite que tengan un largo tiempo de vida útil debido a que cuentan con un sistema regenerante de fácil aplicación, el cual depende del tipo de resina que se emplee⁶².

1.4.3.1 Tipos de resinas de intercambio. Para definir los tipos de resina de intercambio iónico se tiene en cuenta la clasificación general (resinas intercambiadoras catiónicas y resinas intercambiadoras aniónicas), contando con cuatro tipos de resina principales (catiónica fuerte, catiónica débil, aniónica fuerte y aniónica débil). La diferencia entre las resinas mencionadas radica en el grupo funcional que estas presenten, lo cual genera el intercambio entre la disolución conductora y la estructura sólida⁶³. A su vez, dependiendo de la disolución que se tenga y de las sustancias impuras que se deseen remover, se debe seleccionar la resina que cumpla con las características pertinentes para el proceso de interés. Los fundamentos de cada tipo de resina se presentan a continuación:

⁶⁰ QUIMBAYO CASALLAS, María Paula y DUARTE BLANCO, Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de Mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2019. p. 29. [Consultado 26, abril, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7590>

⁶¹ INVESTIGACIÓN. Resinas intercambiadoras de aniones. En: Universidad de Concepción. [sitio web]. Chile: la entidad. p. 3. [26-04-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www2.udec.cl/~analitic/Interc-iones.pdf>

⁶² Ibid. p. 4.

⁶³ QUIMBAYO CASALLAS y DUARTE BLANCO. Op. Cit. p. 33.

1.4.3.1.1 Resina intercambiadora catiónica fuerte. Son resinas que tienen la capacidad de eliminar los cationes del agua, teniendo alta, intermedia y baja selectividad hacia cationes trivalentes (+3), divalentes (+2) y monovalentes (+1), respectivamente⁶⁴. Se caracterizan por no presentar cambios en el pH del agua, razón por la cual son utilizadas normalmente en procesos de suavizado, y a su vez, requiere de altas cantidades de regenerante; siendo esto una desventaja en términos de costos, puesto que, se incrementa la inversión de insumos requeridos para llevar a cabo el intercambio con este tipo de resina⁶⁵.

1.4.3.1.2 Resina intercambiadora catiónica débil. Las resinas catiónicas débiles son utilizadas para eliminar los cationes presentes usualmente en los bicarbonatos, teniendo en cuenta que la capacidad de intercambio es menor en comparación a las resinas catiónicas fuertes. En cuanto a su operación, funcionan únicamente en pH superior a 7, por lo cual la utilización de estas es limitada. A su vez, el uso de regenerante es menor, se caracteriza por ser muy eficiente, siendo rentable económicamente⁶⁶.

Estas resinas, presentan una selectividad alta hacia cationes de calcio, sodio, potasio y magnesio, liberando ácido carbónico como producto final⁶⁷, el cual se puede eliminar mediante un sistema de aireación.

1.4.3.1.3 Resina intercambiadora aniónica fuerte. Las resinas aniónicas fuertes se encargan de remover los aniones de ácidos débiles o fuertes, presentando mayor selectividad para los aniones divalentes (-2). Este tipo de resina tiene una operación en un rango de pH entre 0 a 14, y resisten temperaturas límites⁶⁸. Sin embargo, al igual que las resinas descritas anteriormente, la resina aniónica fuerte también requiere de un regenerante (normalmente sosa, NaOH) para aumentar el tiempo de vida útil de la misma. Dentro de sus aplicaciones, es utilizada habitualmente en procesos de suavizados del agua.

Ahora bien, en cuanto a los requerimientos de la empresa Pharmetique Labs S.A., la resina aniónica fuerte presenta las características necesarias para la remoción de fenoles, ya que, actualmente las aguas a la salida del proceso de la PTAR (vertimiento), cuentan con un pH de 6.87 y una temperatura igual a 21.45 °C; teniendo en cuenta que el contaminante que se quiere remover (fenoles) tiene como estructura C_6H_5OH , cumpliendo con el requerimiento de presentar aniones para poder realizar el respectivo intercambio de iones negativos.

⁶⁴ INVESTIGACIÓN. Op. Cit. p. 5.

⁶⁵ QUIMBAYO CASALLAS y DUARTE BLANCO. Op. Cit. p. 33.

⁶⁶ INVESTIGACIÓN. Op. Cit. p. 5.

⁶⁷ QUIMBAYO CASALLAS y DUARTE BLANCO. Op. Cit. p. 34.

⁶⁸ INVESTIGACIÓN. Op. Cit. p. 5.

1.4.3.1.4 Resina intercambiadora aniónica débil. Su capacidad de intercambio se relaciona con la presencia de aniones en los ácidos fuertes tales como: cloros (Cl⁻), sulfatos (SO₄⁻²) y nitratos (NO₃⁻), teniendo en cuenta que dentro de su funcionamiento operan en un pH inferior a 6, debido a que al trabajar con pH altos se presenta oxidación, afectando directamente el proceso de activación de la resina. Sin embargo, este tipo de resinas presentan mayor capacidad en comparación a la resina aniónica fuerte, donde resisten el ensuciamiento orgánico⁶⁹.

1.5 MARCO LEGAL

Para desarrollar el proyecto se deben tener en cuenta las resoluciones y leyes expuestas a continuación, con el fin de dar cumplimiento a estas.

1.5.1 Resolución 631 de 2015. Esta resolución establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales, en los sistemas de alcantarillado público y otras disposiciones; teniendo en cuenta los siguientes artículos para el desarrollo del proyecto. emplean los siguientes artículos para el desarrollo del proyecto⁷⁰.

- **Artículo 1. Objeto y Ámbito de Aplicación:** el objeto de esta resolución se enfoca en:

La presente resolución establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Igualmente, se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios, de conformidad con el artículo 18 de la presente Resolución⁷¹.

- **Artículo 5. Del parámetro de temperatura y de la zona de mezcla térmica:** “Para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40,00 °C”⁷².
- **Artículo 13. Parámetros fisicoquímicos para monitorear sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no**

⁶⁹ Ibid. INVESTIGACIÓN, p. 5.

⁷⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpo de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En: Red de desarrollo sostenible de Colombia. Bogotá. 2015. p. 1. [Consultado: 16 de febrero de 2015]. Disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

⁷¹ Ibid. p. 1.

⁷² Ibid. p. 3.

domésticas - ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes: “Los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de las ARnD de las actividades de fabricación y manufactura de bienes a cumplir”⁷³, se encuentran en el **ANEXO A**.

- **Artículo 17. De la exclusión de parámetros de la caracterización:** para realizar los análisis fisicoquímicos requeridos se debe tener en cuenta:

El responsable de la actividad podrá solicitar ante la Autoridad Ambiental competente la exclusión de algún(os) parámetro(s) siempre y cuando mediante balances de materia o de masa con la realización de la respectiva caracterización demuestre que estos no se encuentran presentes en sus aguas residuales. Para ello se debe realizar el análisis estadístico de los resultados de las caracterizaciones y de la información de las hojas técnicas de las materias primas e insumos empleados en el proceso⁷⁴.

1.5.2 Ley 373 de 1997. Esta normativa permite establecer el reúso de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias, las cuales pueden ser aprovechadas en actividades relacionadas al cumplimiento de las normas de calidad ambiental.⁷⁵ En la presente ley se evidencian los artículos necesarios para el desarrollo del proyecto.

- **Artículo 5o. Reúso obligatorio del agua:** “Las aguas utilizadas en cualquier actividad que genere afluentes deben ser reutilizadas en actividades primarias y secundarios según el análisis socioeconómico y las normas de calidad ambiental”⁷⁶.
- **Artículo 8o. Incentivos tarifarios:** “Se definirá por medio de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico una tarifa que incentive el uso eficiente y ahorro del agua y evite el uso irracional de este”⁷⁷.
- **Artículo 17. Sanciones:** “Las entidades ambientales aplicarán sanciones establecidas en el artículo 85 a los usuarios que de un mal uso al recurso”⁷⁸.

⁷³ Ibid. p. 15.

⁷⁴ Ibid. p. 16.

⁷⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Ley 373. (11, junio, 1997). Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. En: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá. 1997. p. 3. [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf

⁷⁶ Ibid. p. 3.

⁷⁷ Ibid. p. 3-4.

⁷⁸ Ibid. p. 16.

1.5.3 Resolución 1207 de 2014. Esta resolución permite identificar las disposiciones referentes al uso de las aguas residuales tratadas⁷⁹. En la presente resolución se tienen en cuenta los artículos durante el desarrollo del proyecto.

- **Artículo 1. Objeto y ámbito de aplicación:** “La presente resolución tiene por objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos”⁸⁰.
- **Artículo 5. Del balance de materia o de masa:** “Tanto el Usuario Generador como el Usuario Receptor deberán entregar a la Autoridad Ambiental competente los respectivos balances de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, en el marco del trámite de la Concesión de Aguas y/o Permiso de Vertimientos”⁸¹.
- **Artículo 6. De los usos establecidos para agua residual tratada:** “Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos”⁸²:

Cuadro 4. Uso agrícola e industrial para el reúso en distintas actividades.

Uso Agrícola	Uso Industrial
<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal. • Cultivos no alimenticios para humanos o animales. • Cultivos de fibras celulósicas y derivados. • Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Intercambio de calor en torres de enfriamiento y calderas. • Descarga de aparatos sanitarios. • Limpieza mecánica de vías. • Riego de vías para el control de material particulado. • Sistemas de redes contraincendios.

Fuente: BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. En: Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Bogotá D.C. 2014, 3-4 p.

⁷⁹ BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas [en línea]. En: Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Bogotá D.C. 2014. 2 p. [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>

⁸⁰ Ibid. p. 2.

⁸¹ Ibid. p. 3.

⁸² Ibid. p. 3-4.

Cuadro 4. (Continuación).

Uso Agrícola	Uso Industrial
<ul style="list-style-type: none">• Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.• Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.• Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.• Jardines de áreas no domiciliarias.	

Fuente: BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. En: Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Bogotá D.C. 2014, 3-4 p.

- **Artículo 7. Criterios de Calidad.** El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los criterios de calidad⁸³ presentados en el **ANEXO B**.

⁸³ Ibid. p. 4.

2. DIAGNÓSTICO

A lo largo de este capítulo se realiza un análisis del estado actual de la empresa Pharmetique Labs S.A., teniendo en cuenta el proceso de la PTAR, la caracterización de las aguas residuales, el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015 y el uso de estas actualmente. Adicionalmente, se realiza una comparación de los parámetros fisicoquímicos exigidos con la Resolución 1207 de 2014, para fines de un reúso industrial, lo cual permite la ejecución del presente proyecto.

2.1 GENERALIDADES

La compañía Pharmetique Labs S.A. fue construida por un grupo empresarial hacia los años 1960, la cual es perteneciente al Grupo Carval, fundado por el visionario emprendedor Carlos Vallecilla, propietario de diferentes compañías. Asimismo, es una empresa multilatina que cuenta con la experiencia y trayectoria de Laboratorios La Santé, quienes se caracterizan por ser una potente organización farmacéutica que produce medicamentos genéricos, medicamentos por prescripción, medicamentos OTC (no requieren de una prescripción escrita) y manufactura de clase mundial. Dentro del portafolio de productos fabricados por Pharmetique Labs S.A. se encuentran: Buscapina, Loratadina (jarabe), paracetamol (tableta), acetaminofén (jarabe), clotrimazol (crema dermatológica), Emulsión de Scott, Isodine, Bisolvon, Analper, Z-BEC granulado, entre otros.

Actualmente, Pharmetique Labs S.A. es una compañía comprometida con la salud de las personas, siendo líder en exportación en Colombia, con presencia en 12 países del mercado latinoamericano, en los cuales desarrolla actividades como la manufactura y la comercialización de un amplio portafolio de medicamentos con la finalidad de cubrir las principales necesidades en la salud.

Pharmetique Colombia está ubicada en Bogotá desde el año 1990 y en los procesos que desarrolla es necesario el uso de agua potable en labores de producción, restaurante y servicios generales, donde se consumen en promedio 2032 m³ mensuales.

2.1.1 Proceso de producción. Dentro de las actividades principales que desarrolla Pharmetique Labs S.A. se encuentran tres líneas de proceso especificadas como: líquidos, sólidos y grasas.

De esta forma, la línea de producción para líquidos fabrica diversos medicamentos dentro de los cuales están los jarabes; del mismo modo, la línea de proceso para sólidos fabrica las tabletas, medicamentos en polvo, etc., y finalmente la línea de grasas fabrica emulsiones. Para esto, la información que se expone a continuación

fue adquirida durante una visita a la empresa para el reconocimiento del proceso de producción; adicionalmente se tienen en cuenta los instructivos de fabricación local. A continuación, se explicará el proceso de producción para dos líneas de proceso (líquidos y grasas).

2.1.1.1 Líquidos. En esta línea de proceso se encuentran diversos medicamentos líquidos como lo son los jarabes, para lo cual su elaboración inicia en la recolección de materias primas tales como: propilenglicol, polietilenglicol, acetaminofén, sorbitol solución, saborizante (líquido), agua purificada, ácido cítrico anhidro, povidona, sucralosa y colorante. Posteriormente, en el reactor de 3000 L y con ayuda de una bomba se adiciona propilenglicol de diversas concentraciones y se inicia la agitación a cierta velocidad; luego, se adiciona lentamente acetaminofén y se agita hasta alcanzar una solución traslúcida y libre de partículas sin disolver. Una vez se tenga la solución requerida, se adiciona los saborizantes establecidos y ácido cítrico, y se agita según el tiempo requerido para su elaboración⁸⁴.

Ahora bien, en un recipiente de acero inoxidable de capacidad adecuada y con ayuda de un agitador se disuelve 6 L de agua purificada y se mantiene en constante agitación. Consecutivamente, se adiciona el agua previamente agitada al reactor de 3000 L. Por aparte, en el reactor de 1000 L se adiciona 565 L de agua purificada y povidona, lo cual se agita por un tiempo definido o hasta alcanzar una completa disolución. Consecutivamente, se adiciona sucralosa y el colorante establecido hasta lograr una completa dispersión⁸⁵.

Para la mezcla final, se transfiere la solución formada en el reactor de 1000 L al reactor de 3000 L y se agita por un tiempo estipulado. Al finalizar el paso anterior, se realiza el enjuague del reactor de 1000 L con 40 L de agua purificada. En este procedimiento, es necesario ajustar el volumen final, para lo cual se requiere que la preparación se encuentre dentro del intervalo de temperatura menor o igual a 25°C, por lo tanto, se debe enfriar empleando el Chiller. Además, es necesario verificar la ausencia de espuma para realizar esta operación. Para llevar al volumen final del jarabe a preparar, se adiciona 602 L de agua purificada y se agita continuamente⁸⁶.

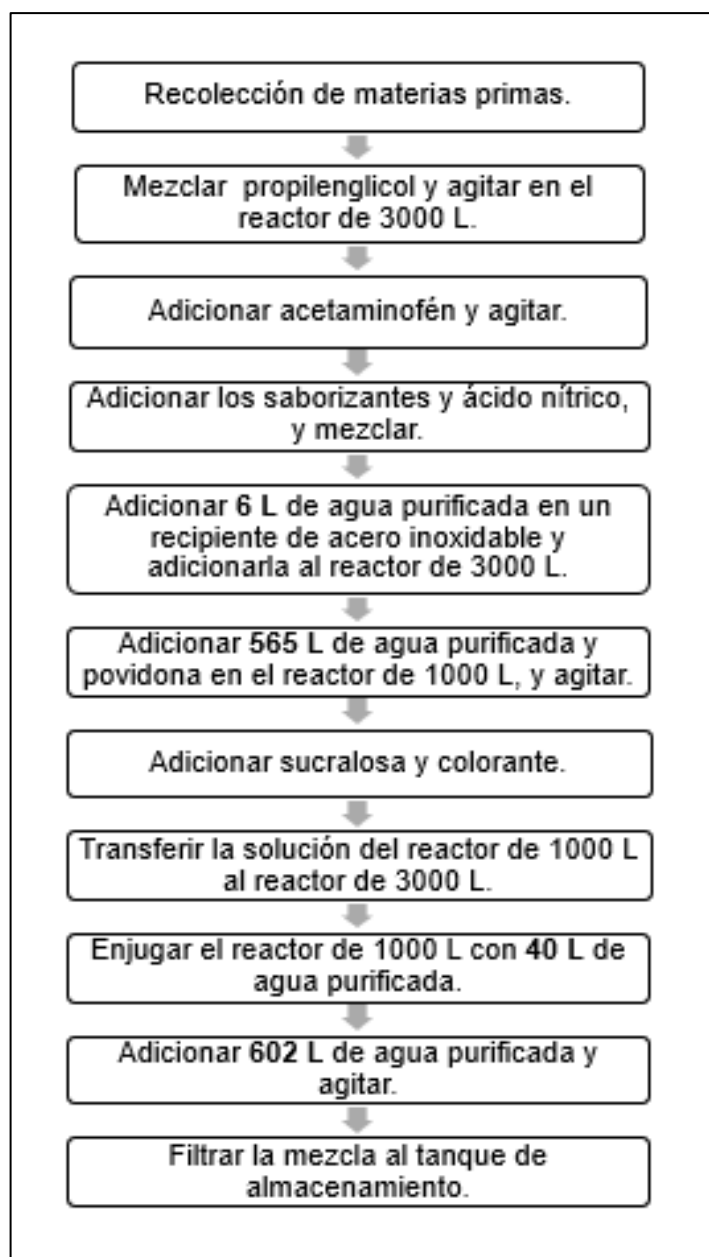
Finalmente, se debe filtrar la mezcla al tanque de almacenamiento. La **Figura 2** presenta el diagrama para la producción de jarabe.

⁸⁴ PHARMETIQUE LABS S.A. Instrucción de fabricación local Acetaminofén en jarabe. 6 ed. Bogotá: 2015. p. 1.

⁸⁵ Ibid. p. 2.

⁸⁶ Ibid. p. 3.

Figura 2. Diagrama de producción de Jarabe.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.1.1.2 Grasas. Dentro de la línea de proceso correspondiente a grasas se encuentran las emulsiones, para lo cual, se tiene como etapa inicial la recolección de materias primas tales como: aceite de hígado de bacalao, ácido oleico blanco, vitamina palmitato, propilparabeno, metilparabeno, methocel, agua purificada, sorbato de potasio, colorantes, hidróxido de sodio, ácido cítrico anhidro, glicerina vegetal, hexametáfosfato de sodio, sacarina sódica, aceite de canela, benzaldehído, salicilato de metilo y propilgalato⁸⁷.

La segunda etapa corresponde a la preparación de la fase oleosa, la cual se lleva a cabo en un tanque de 1500 L. En primera instancia, se adiciona el aceite de hígado de bacalao y se activa el agitador de fondo a máxima velocidad; luego, se adiciona en el siguiente orden ácido oleico blanco, vitamina palmitato, propilparabeno, metilparabeno y methocel; el proceso de agitación se realiza durante 5 minutos una vez se hayan adicionado las materias primas anteriormente mencionadas en el tanque con agitador superior a máxima velocidad⁸⁸.

La tercera etapa corresponde a la preparación de la fase acuosa, la cual se lleva a cabo en el tanque de 6250 L. En primer lugar, se adiciona 2943.440 L de agua purificada y se activa el agitador de fondo a mínima velocidad; luego, se adiciona bajo agitación continua a mínima velocidad sorbato de potasio, colorantes, hidróxido de sodio y ácido cítrico anhidro. Transcurrido el tiempo de agitación de la fase oleosa, se adiciona simultáneamente la glicerina vegetal y 70 L de agua purificada. Además, es necesario realizar la preparación de una solución salina, para la cual, se deben adicionar 300 L de agua purificada al tanque de 1500 L, en seguida se enciende el agitador de fondo y se adiciona hexametáfosfato de sodio y sacarina sódica⁸⁹.

Para la mezcla final, se adiciona la fase salina al tanque de 6250 L sin tener agitación y 70 L de agua purificada. Por aparte, en un recipiente de acero inoxidable de capacidad adecuada se adiciona aceite de canela, benzaldehído, salicilato de metilo y propilgalto, y se agita con pala de acero inoxidable hasta lograr una completa disolución y se adiciona al tanque de preparación de 6250 L. Como paso final, se debe adicionar 122.780 L de agua purificada para alcanzar los 5000 L de emulsión y se agita a máxima velocidad. Finalmente, se trasvasa la mezcla al tanque de almacenamiento⁹⁰. La **Figura 3** presenta el diagrama para la producción de emulsión.

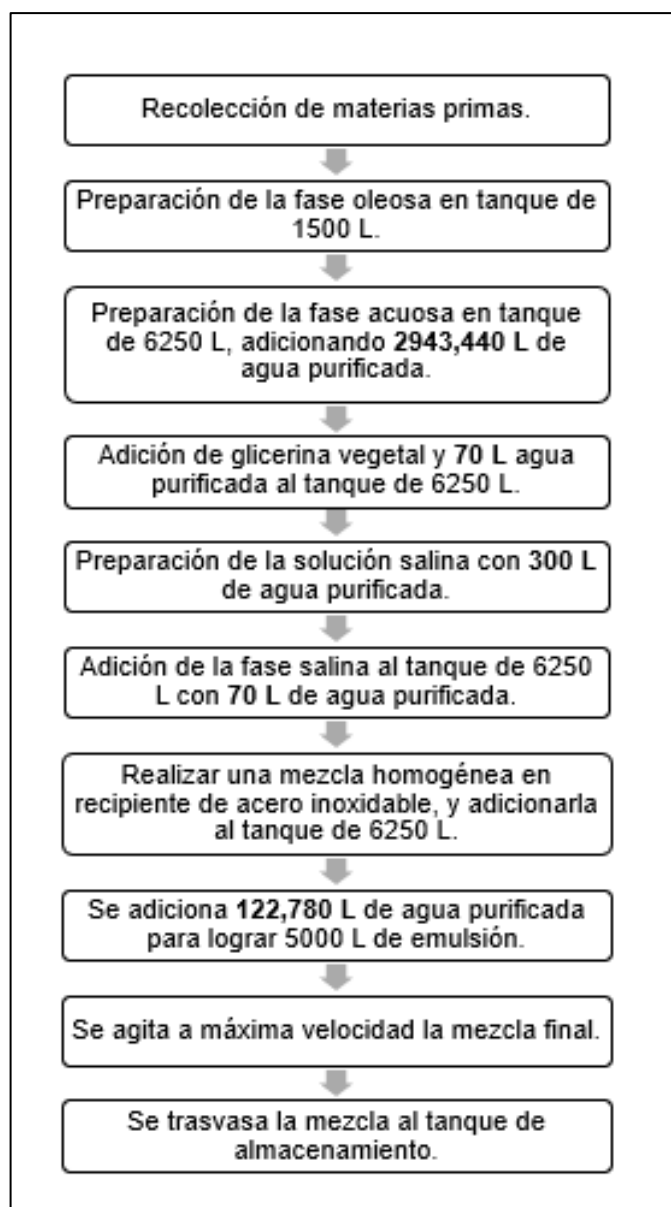
⁸⁷ PHARMETIQUE LABS S.A. Instrucción de fabricación local Emulsión Scott Tradicional. 7 ed. Bogotá: 2017. p. 1.

⁸⁸ Ibid. p. 2.

⁸⁹ Ibid. p. 2.

⁹⁰ Ibid. p. 3.

Figura 3. Diagrama de producción de Emulsión.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2 PROCESO DE LA PTAR OPERADA EN PHARMETIQUE LABS S.A.

Pharmetique Labs S.A. cuenta con una planta de tratamiento de efluentes en la cual se procesan las aguas provenientes de la planta de producción, casino, lavado de máquinas y laboratorio de calidad. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la compañía cuenta con un tratamiento primario y un tratamiento secundario.

2.2.1 Tratamiento primario. La PTAR emplea tres técnicas para llevar a cabo el tratamiento primario, dentro de las cuales se desarrollan procesos físicos debido a que en las acciones que se realizan no se evidencian operaciones químicas ni biológicas para esta etapa del proceso.

2.2.1.1 Trampas de grasa. El tratamiento emplea como etapa inicial tres trampas de grasa ubicadas estratégicamente para las aguas provenientes del casino, producción y laboratorio de calidad, las cuales funcionan como filtro para retener los sólidos presentes en las aguas, tal como se evidencia en la **Figura 4**, **Figura 5** y **Figura 6**, respectivamente. La primera trampa de grasa corresponde a las aguas provenientes del casino (3 filtros), la segunda corresponde al proceso de producción (1 filtro) y la tercera recibe las aguas del laboratorio de calidad (2 filtros).

Así, las aguas provenientes del casino y de producción, debido a su origen y características, requieren de un pretratamiento (tratamiento primario) con la finalidad de remover las grasas, teniendo en cuenta que el agua pasa por cámaras independientes, en donde las grasas por presentar un menor peso específico en comparación al agua, flotan hacia la superficie y son retiradas de forma manual, el agua libre de grasas continúa su recorrido y pasa a la siguiente etapa del tratamiento correspondiente al tanque de igualación.

Figura 4. Trampa de grasa casino.



Figura 5. Trampas de grasa producción.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Figura 6. Trampas de grasa laboratorios de calidad.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2.1.2 Tanque de igualación. Después de la remoción de grasas individual de cada vertimiento, las aguas ingresan a un tanque de igualación de un volumen de 100 m³, donde se lleva a cabo el proceso de mezcla para obtener la homogenización de estas; y a su vez, lograr una concentración apropiada de los parámetros sanitarios, dentro de los cuales se encuentran: DBO₅, DQO, SS, pH, y temperatura.

Además, esta etapa cuenta con un sistema de recirculación proveniente del tanque de aireación (tratamiento secundario) para mantener en movimiento las partículas y así favorecer los resultados de los parámetros anteriormente mencionados como se evidencia en la **Figura 8**.

Figura 7. Tanque de igualación



Figura 8. Sistema de recirculación.



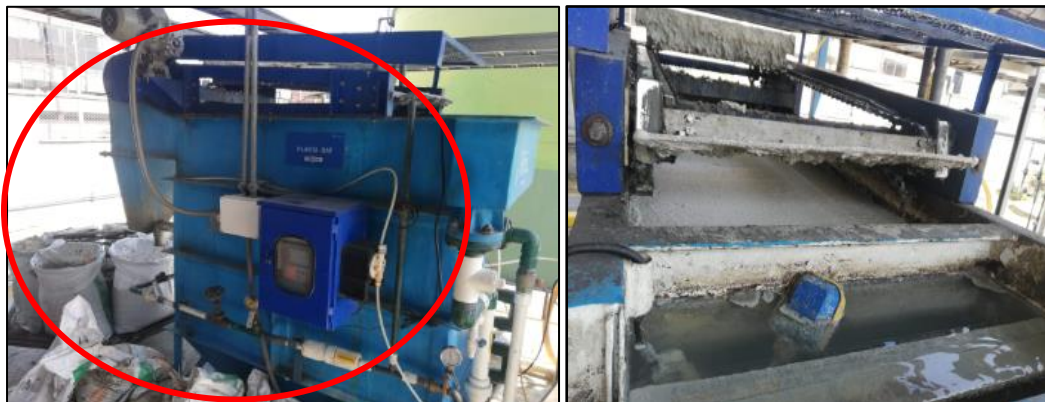
Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2.1.3 DAF (Flotación por Aire Disuelto). La última etapa del tratamiento primario corresponde a la neutralización, la cual hace referencia a un proceso químico que consiste en modificar el pH del agua antes de ingresar al tratamiento secundario.

El proceso de neutralización se realiza únicamente si es necesario, ya que el pH debe estar en un rango entre 5 a 7. En este orden de ideas, la empresa cuenta con dos soluciones de neutralización, la primera es una solución de soda caustica, la cual se utiliza para contrarrestar la acidez que presentan las aguas mezcladas en la etapa anterior y la otra es de ácido nítrico, la cual permite contrarrestar la alcalinidad de las aguas. Así bien, si el pH registrado se encuentra fuera del límite establecido, es decir, es inferior a 4, se utiliza el agente básico (soda caustica) pero si es superior a 8, se utiliza el agente ácido (ácido nítrico).

Asimismo, esta etapa permite la remoción de grasas y lodos a partir de la adición de 20 L de coagulante policloruro de aluminio por 500 L de agua y 250 kg de floculante en polvo aniónico por 500 L de agua. A su vez, este sistema cuenta con un proceso de aireación que permite aglomerar los flocs formados y mediante la succión de aire se genera una capa de lodo que es retirada con paletas raspadoras. Terminado este proceso, las aguas salientes ingresan al tratamiento secundario.

Figura 9. DAF y parte superior del DAF.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Figura 10. Grasas y lodos.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2.1.4 Tanque de clarificación. Las aguas tratadas por el DAF ingresan al tanque de clarificación donde las partículas pesadas quedan en la parte inferior y el agua en la parte superior del tanque, en el cual, básicamente se lleva a cabo la remoción de los sólidos en suspensión.

2.2.2 Tratamiento secundario. Las etapas que corresponden al tratamiento secundario son las más relevantes en el proceso de la PTAR debido a que la carga en material orgánico es el mayor inconveniente con relación a la contaminación. Para lo anterior, se llevan a cabo dos etapas específicas una vez las aguas hayan tenido el tratamiento primario.

2.2.2.1 Reactor biológico. El sistema utilizado es de tipo biológico aerobio denominado Lodos Activados de Aireación Extendida, el cual permite la remoción de la materia orgánica empleando un grupo específico de microorganismos aerobios, los cuales se transforman en gas carbónico y agua, teniendo en cuenta que durante el proceso se adiciona oxígeno necesario para conservar los microorganismos. Según lo anterior, las bacterias aerobias son las más importantes dentro de los microorganismos, las cuales requieren oxígeno para poder oxidar la materia orgánica.

Figura 11. Reactor biológico.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

- **Tanque de aireación.** En el tanque de aireación ocurre la reacción bioquímica de las bacterias con la materia orgánica, la cual tiene como resultado gas carbónico, microorganismos y agua tal como se mencionó anteriormente. En dicho tanque se adiciona oxígeno necesario para las bacterias empleando dos tipos de aireadores (manual y automático), los cuales, también tienen como función realizar una mezcla continua entre los microorganismos y el agua residual.

Figura 12. Tanque de aireación.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Figura 13. Aireador 1 y 2.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

- **Tanque de decantación.** Posteriormente, se realiza la separación de los microorganismos del agua utilizando el principio de la gravedad, en el cual los microorganismos por presentar mayor peso específico que el agua se decantan. Así, esta etapa se lleva a cabo en un tanque denominado decantador secundario.

Figura 14. Tanque de decantación.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

La etapa final del tratamiento de aguas residuales que realiza Pharmetique Labs S.A. es el proceso de vertimiento, el cual se estima que tiene un flujo de 808 m³ mensuales aproximadamente, puesto que no se cuenta con un sistema de control.

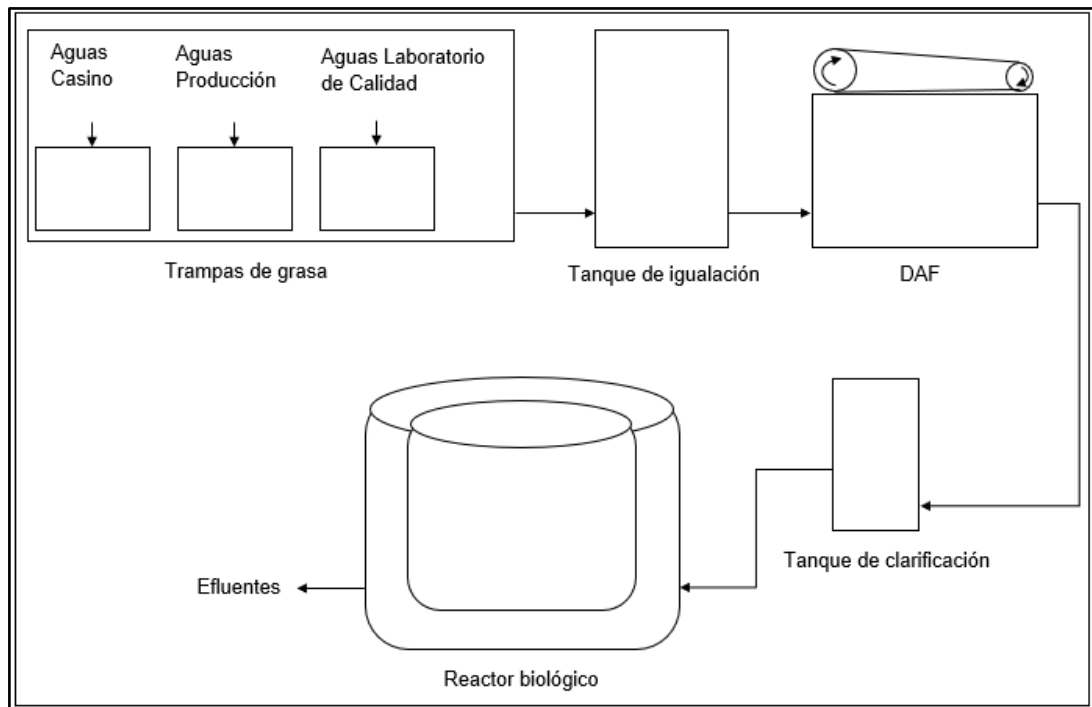
Figura 15. Regla para medir el caudal a la salida del vertimiento.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A..

La **Figura 16** representa el diagrama de la PTAR correspondiente a la empresa Pharmetique Labs S.A.

Figura 16. Diagrama de la PTAR.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2.3 Puntos de muestreo. Para realizar la caracterización de las aguas residuales, se debe tener en cuenta los puntos de muestreo y frecuencias establecidos por la empresa. Aunque, cada semana se realiza un control interno por parte de la empresa en el laboratorio de la PTAR, la caracterización realizada por Conoser Ltda., se efectúa en diciembre de cada año. Los puntos de muestreo están distribuidos en el A, el cual es en el tanque de igualación y el C, ubicado a la salida del tanque de decantación o reactor biológico, sabiendo que este es el vertimiento de la PTAR. La **Figura 17** que se muestra a continuación indica los puntos mencionados anteriormente.

Figura 17. Punto de muestreo A y C.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

En los puntos mencionados anteriormente, se realiza la medición de diferentes parámetros, con un tipo de muestra y volumen ya establecidos, que se evidencian en la siguiente **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetro con su punto de muestreo y tipo de muestra.

Parámetro	Punto de muestreo	Tipo de muestra	Volumen de la muestra
Aceites y grasas	A y C	Puntual	1 L
Acidez	C	Puntual	1 L
Alcalinidad	C	Puntual	1 L
Arsénico	C	Compuesta	2 L
Cadmio	C	Compuesta	2 L
Cloruros	C	Compuesta	2 L
C. Absorción 436 nm	C	Compuesta	2 L
C. Absorción 520 nm	C	Compuesta	2 L
C. Absorción 620 nm	C	Compuesta	2 L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	A y C	Compuesta	2 L

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

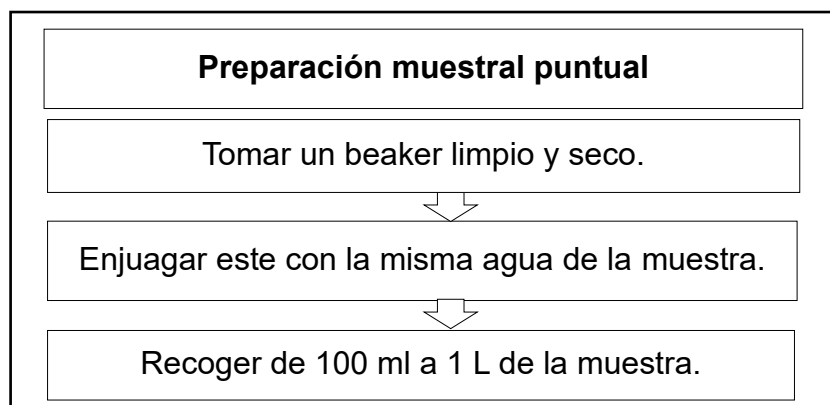
Tabla 1. (Continuación).

Parámetro	Punto de muestreo	Tipo de muestra	Volumen de la muestra
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	C	Compuesta	1 L
Dureza Cálctica	C	Compuesta	2 L
Dureza total	C	Compuesta	2 L
Fenoles	C	Compuesta	1 L
Mercurio	C	Compuesta	2 L
pH	A y C	Puntual	100 ml
Surfactantes (SAAM)	C	Compuesta	2 L
Sólidos sedimentables (SS)	A y C	Puntual	1 L
Sólidos suspendidos totales (SST)	A y C	Compuesta	2 L
Sulfatos	C	Compuesta	2 L
Temperatura	A y C	Puntual	100 ml

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Dentro de la medición de parámetros se manejan dos tipos de muestras, la muestra puntual y la compuesta. La muestra puntual, es la cantidad de agua recogida en un instante de tiempo determinado, que dentro las especificaciones de la empresa, esta se realiza cada media hora. La muestra puntual, es la cantidad de agua recogida en un instante de tiempo determinado, que, dentro de las especificaciones del laboratorio externo, esta se realiza cada media hora el día que se hace la auditoría. Para su recolección se toma un beaker limpio y seco, luego este se enjuaga con la misma agua de la muestra antes de tomarla y finalmente se recoge de 100 ml a 1 L, según el parámetro. En la **Figura 18** se muestra el proceso de recolección de esta.

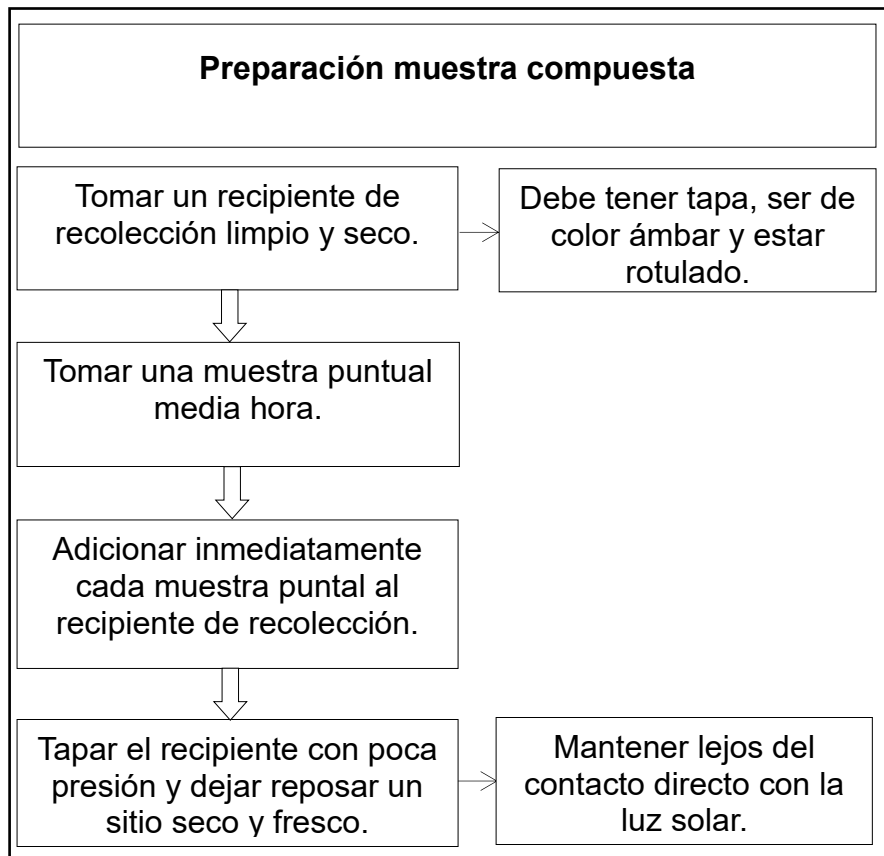
Figura 18. Diagrama muestra puntual.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Para la muestra compuesta, se recoge cierta cantidad de agua durante todo un día. Se debe utilizar un recipiente de recolección ámbar limpio, seco y con tapa, respectivamente rotulado con el punto de muestreo y número de muestra. Luego se toma una muestra puntual en intervalos de media hora e inmediatamente se adiciona al recipiente de recolección. Se debe tener en cuenta que el recipiente se tapa con poca presión y se deja reposar en un lugar seco, fresco y lejos del contacto directo con la luz solar. En la **Figura 19** se evidencia el procedimiento.

Figura 19. Diagrama muestra compuesta.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Figura 20. Muestra compuesta en Pharmetique Labs S.A



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.2.4 Revisión de los datos históricos. La revisión de los datos históricos para la caracterización del vertimiento de la PTAR de Pharmetique Labs S.A. se tomó a partir de la información recopilada por las auditorías ambientales (Conoser Ltda) que se realizaron en los años 2017 y 2018. Así, la **Tabla 2** y **Tabla 3** presentan los resultados de las mediciones realizadas.

Tabla 2. Registro de los parámetros básicos sanitario en el año 2017.

Parámetro	Unidad de medida	de Valor	Resolución 631 de 2015
Cadmio (Cd)	mg/L	<0.0048	0.10
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	89	150
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	208	400
Fenoles totales	mg/L	<0.08	0.20
Grasas y aceites	mg/L	22	15
Mercurio (Hg)	mg/L	<0.0006	0.01
pH	Unidades de pH	6.87	6.00 a 9.00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	0.57	-
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	< 0.5	1.00
Sólidos totales	mg/L	30	50.00
Temperatura	°C	21.45	<40

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Tabla 3. Registro de los parámetros básicos sanitario en el año 2018.

Parámetro	Unidad de medida	de Valor	Resolución 631 de 2015
Grasas y aceites	mg/L	10	15
Acidez total (CaCO ₃)	mg/L	17	-
Alcalinidad total (CaCO ₃)	mg/L	52	-
Arsénico (As)	mg/L	< 0.0025	0.10
Cadmio (Cd)	mg/L	< 0.005	0.10
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	74	500.00
Color real	mg/L	26	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	55	150.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	172	400.00
Dureza Cálctica (CaCO ₃)	mg/L	12	-
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	22	-
Fenoles totales	mg/L	< 0.08	0.20
Mercurio (Hg)	mg/L	< 0.0006	0.01
pH	Unidades de pH	6.52	6.00 a 9.00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	0.85	-
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	20	50.00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	< 0.5	1.00
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	14	500.00
Temperatura	°C	21.4	<40

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

A partir de los datos brindados por la compañía, y teniendo en cuenta que este análisis es realizado anualmente, en el mes de diciembre, por el laboratorio Conoser Ltda., se observa que durante los años 2017 y 2018 los valores medidos se encuentran dentro de los valores límites máximos permisibles por la Resolución 631 de 2015, la cual establece los parámetros indicados para el vertimiento de aguas residuales. No obstante, la empresa realiza un control interno de todos los parámetros exigidos por la normativa, teniendo en cuenta que este se realiza semanalmente y en el caso de presentarse inconsistencias en los valores medidos, el personal de la PTAR de Pharmetique Labs S.A. procede a realizar un seguimiento más preciso, donde es necesario revisar la producción que se esté llevando a cabo, y así determinar la continuidad de la falla. Así, esta farmacéutica cuenta con un control interno para mantener y cumplir con las condiciones del agua establecidas.

Ahora bien, la PTAR cuenta con algunos procedimientos en los casos de presentarse inconsistencias en los valores de los parámetros medidos; los cuales son:

- Al presentarse valores por debajo de lo permitido en Sólidos Sedimentables se utiliza urea y ácido fosfórico para alimentar los microorganismos en el tanque de aireación (reactor biológico), y así favorecer la reacción bioquímica de las bacterias con la materia orgánica.
- Si los registros de Sólidos Sedimentables superan la normatividad, se deben retirar los lodos por medio de un filtro prensa.

Por otra parte, es importante mencionar que al momento de realizar la producción de emulsiones se registran valores altos en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos debido a que esta línea de proceso maneja altas cantidades de grasa, siendo esto un factor desfavorable para el tratamiento de aguas que emplea la empresa, resaltando que en estos casos se hace el estudio necesario para cumplir con la resolución de vertimiento.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La caracterización de las aguas residuales en la empresa Pharmetique Labs S.A se realiza una vez por año (en el mes de diciembre), mediante el laboratorio externo Conoser Ltda., el cual está debidamente certificado por el INVIMA. Dentro de la empresa, se realiza la medición de los parámetros fisicoquímicos como control interno, puesto que esta cuenta con su propia planta de tratamiento de aguas y su laboratorio; el monitoreo de los parámetros de pH, temperatura, sólidos decantables, oxígeno disuelto y caudal, se realizan con una frecuencia de tres veces por semana y los parámetros como DBO₅ y DQO con una frecuencia de dos veces por semana, tal como se evidencia en el **ANEXO H**. Cabe aclarar, que los valores presentados son los arrojados por el laboratorio Conoser Ltda. ya que es necesario que los registros sean realizados por un laboratorio certificado.

Inicialmente, en el tanque de igualación (punto A) se toman dos muestras, una puntual y la otra compuesta. La primera para la medición de aceites y grasas y la otra para el análisis de DBO₅ y sólidos suspendidos totales. Es importante mencionar, que las muestras compuestas tomadas por el laboratorio se realizan mediante muestras puntuales recogidas cada treinta minutos.

Posteriormente, en el tanque de salida del vertimiento (punto C) se toman siete muestras; dos puntuales y cinco compuestas. La primera para la medición de aceites y grasas y la segunda para acidez y alcalinidad. De las otras cinco, dos son para analizar la demanda bioquímica de oxígeno, una es para la demanda química de oxígeno y fenoles, y las dos restantes para medir dureza y metales.

Tanto el pH, la temperatura y los sólidos sedimentables se analizan directamente en Pharmetique Labs S.A. Los dos primeros, mediante una muestra puntual tomada cada 30 minutos el día que se realiza la auditoría en el mes de diciembre. Esta medición se realiza con un potenciómetro, el cual es calibrado con soluciones buffer 4 y 7. Para los sólidos sedimentables, se toma una muestra cada hora en un cono Imhoff y se registran los resultados. Los demás parámetros, son medidos en el laboratorio Conoser Ltda.; para esto, las muestras son transportadas durante aproximadamente cuarenta minutos y al momento de llegada, se realizan las mediciones pertinentes. Cada una de las mediciones se realizan mediante técnicas analíticas aprobadas por el IDEAM. Adicionalmente, la empresa Pharmetique Labs S.A. realiza una medición interno semanal de todos los parámetros para tener un control sobre estos y así mantener los valores dentro de los límites permisibles de la Resolución 631 de 2015.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone a Pharmetique Labs S.A. que el muestreo que realiza el laboratorio externo Conoser Ltda., se realice semestralmente para tener una mejor certeza de que los valores reportados para cada parámetro describen las condiciones actuales de la empresa.

Los resultados obtenidos para las aguas tratadas en la empresa Pharmetique Labs S.A, evidencia la **Tabla 4** mostrada a continuación.

Tabla 4. Caracterización de las aguas residuales de Pharmetique Labs S.A.

Parámetro	Unidad de medida	Valor de Pharmetique Labs s.a.	Resolución 631 de 2015. Fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas, medicinales y productos botánicos de uso farmacéutico.	Cumplimiento
Aceites y grasas	mg/L	<10	15	Sí
Acidez	mg/L	41	Análisis y Reporte	Sí
Alcalinidad	mg/L	646	Análisis y Reporte	Sí
Arsénico	mg/L	<0.001	0.10	Sí
Cadmio	mg/L	<0.001	0.10	Sí
Cloruros	mg/L	25	500	Sí

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Tabla 4. (Continuación).

Parámetro	Unidades de medida	Valor de Pharmetique Labs s.a.	Resolución 631 de 2015. Fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas, medicinales y productos botánicos de uso farmacéutico.	Cumplimiento
C. Absorción 436 nm	mg/L	0.1	Análisis y Reporte	Sí
C. Absorción 520 nm	mg/L	0.0	Análisis y Reporte	Sí
C. Absorción 620 nm	mg/L	0.0	Análisis y Reporte	Sí
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	14	150	Sí
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	<50	400	Sí
Dureza Cálcica	mg/L	11	Análisis y Reporte	Sí
Dureza total	mg/L	13	Análisis y Reporte	Sí
Fenoles	mg/L	<0.08	0.20	Sí
Mercurio	mg/L	<0.001	0.01	Sí
pH	Unidades de pH	6.92 – 7.56	6.00 – 9.00	Sí
Surfactantes (SAAM)	mg/L	0.31	-	-

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Según los valores presentados anteriormente se evidencia el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015 para todos los parámetros. En consecuencia, el proceso de funcionamiento de la PTAR es estable, debido a que dentro de la empresa se realiza un control interno semanal. Además, dentro del mismo análisis presentado por el laboratorio Conoser Ltda., se determina que la remoción global es de un 99% para los aceites y grasas, DBO₅ y sólidos sedimentables; asumiendo un caudal de entrada y salida igual debido a que no hay acumulación de agua en el sistema.

2.4 USOS DEL AGUA

En Pharmetique Labs S.A los usos del recurso hídrico se evidencian en la planta de producción, casino, servicios generales y laboratorios. El agua potable utilizada en la planta de producción se divide en dos actividades, el primero es la elaboración de productos como jarabes y en la limpieza de los equipos en el área de fabricación. Cabe aclarar, que para que el agua potable se utilice en la elaboración de productos, esta pasa por un proceso de purificación, el cual se da directamente en la empresa, dentro de la misma planta; esta agua es denominada como agua purificada.

Al momento de la fabricación, se utiliza el agua potable ya purificada. Aunque este proceso es indispensable para la empresa, es uno de los procesos donde más se utiliza el agua potable. En la línea de producción correspondiente a jarabes, se utiliza aproximadamente 1213 L de agua para fabricar 3000 L de jarabe; a su vez, en la línea de producción referente a emulsiones, se utiliza aproximadamente 3487 L de agua purificada para fabricar 5000 L de emulsión.

Por otro lado, la limpieza de los equipos también consume una gran cantidad de agua. Una de las áreas que gasta más el recurso es la de fabricación, ya que es necesario realizar esta actividad cada vez que se va a elaborar un producto o se ha realizado una parada mayor a 5 horas. Dentro de la empresa, se manejan tres tipos de limpieza de equipos, de campaña, de rutina y la general o mensual.

La limpieza de campaña se realiza de manera manual y se utilizan 200 L de agua purificada aproximadamente por cada reactor de 3000 L. Durante esta limpieza, no es necesario utilizar soluciones de detergentes o desinfectantes y tampoco realizar vaporización. Esta es utilizada cuando no se va a realizar un cambio de referencia, si no que solamente se termina un lote y se debe continuar con el otro. Por ende, su duración es de 1 hora y 30 minutos.

La limpieza de rutina se realiza cuando se va a cambiar de producto. Para esta, se realiza un lavado de reactores, tuberías y tanques de almacenamiento dentro del área, sin necesidad de desmontar cada parte. Durante este aseo, es necesario utilizar soluciones de detergentes o desinfectantes, las cuales se realizan con agua potable fría o caliente, según el producto a retirar. Además, se realiza la vaporización de los reactores y tanques. Antes de la liberación de cualquier equipo, se debe cumplir con el resultado de una conductividad menor a 1.3. Se espera que esta demore entre 4 a 6 horas, 1 turno aproximadamente.

El último tipo de limpieza que se maneja en la planta de producción es la general o mensual, la cual dura 2 turnos y medio. En este caso, se realiza un lavado exhaustivo, donde se desarma cada línea con su respectiva tubería, equipos e implementos. Estos últimos, junto con las partes de las tuberías son lavados en un cuarto que se encuentra dentro del área; los reactores y tanques se asean de la misma forma que en la limpieza de rutina.

Adicionalmente, dentro de la empresa se utilizan equipos móviles para algunas producciones, los cuales tienen una capacidad de 500 L. Estos, solo requieren de una limpieza sencilla, para la cual se utilizan de 200 L a 1000 L según el producto que hayan contenido.

2.4.1 Limpieza de rutina en el área de producción de jarabes. En el área de fabricación, para la producción de jarabes se disponen de 5 reactores de 3000 L, los cuales tienen la misma forma de lavado. Para iniciar la limpieza de uno de estos, se realiza un primer enjuague usando 1000 L de agua, entre fría y caliente. Para esto, se distribuyen entre las tuberías de salida del reactor con sus respectivas bombas y las tuberías que alimentan al reactor a este. Esta distribución se realiza por medio de cochadas de 250 L. En seguida, se realiza una mezcla para enjabonar de 493.5 L de agua + 6.5 L de detergente. Luego se utilizan 1000 L de agua para retirar el jabón en cochadas de 100 L. Después de esto se realiza el proceso de vaporización, el cual inicia hasta el momento que se encuentre a una temperatura de 86 °C y dura 30 minutos. Antes de finalizar, se envían 1000 L de agua purificada, nuevamente en cochadas de 100 L. Finalmente, se mide la conductividad en la línea, si arroja un resultado menor a 1.3 entonces es despejada para la siguiente producción; si no, se debe realizar un nuevo enjuague.

La limpieza de un reactor y sus tuberías de conexión tiene destinado un tiempo de 3 horas y media aproximadamente, pero dependiendo de la producción puede llegar a durar todo un turno. En este tipo de aseo, se utilizan 3500 L de agua aproximadamente, de los cuales 2500 L son agua potable.

2.4.2 Limpieza de rutina en el área de producción de emulsiones. En el área de fabricación, se dispone de un cuarto de producción de emulsiones, el cual cuenta con 2 reactores y otro, donde se encuentran 2 tanques de almacenamiento. En este proceso de producción se utiliza aceite vegetal y otras grasas en una mayor proporción, por esto en temas de limpieza se utiliza más agua. Para el aseo de un reactor de 2000 L, inicialmente se utiliza una manguera con la cual se retira el producto que queda en el reactor usando aproximadamente 1000 L de agua caliente. Seguido de esto, se utilizan 1250 L de agua caliente y 16.5 L de jabón para realizar una solución de jabón. Es necesario que un tanque de almacenamiento del producto esté disponible para recibir la solución jabonosa, después de que este pase por el reactor, en tal caso de que no, se debe desechar está directamente al sifón. Luego se utilizan 1000 L de agua para retirar el jabón en cochadas de 200 L.

En seguida, se realiza la solución de desinfectante con 700 L de agua y una concentración que varía del 0.4% a 0.7%, según el desinfectante que se esté utilizando ese mes. Dentro de la empresa, se manejan 2 tipos de parejas de desinfectantes, esto con el fin de que las bacterias no creen resistencia en los equipos. En el **Cuadro 5** se muestran las parejas y su respectiva concentración o porcentaje de volumen necesario para la solución.

Cuadro 5. Parejas de desinfectantes usadas en la limpieza.

Pareja 1	Desinfectante para inmersión Virex II	0.4 %v/v
	Desinfectante para recirculación Divosan Forte	0.3 %v/v
Pareja 2	Desinfectante para inmersión Divosan Hypo	0.5 %v/v
	Desinfectante para recirculación Divosan OSA-N	0.7 %v/v

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Cabe mencionar que el desinfectante Divosan OSA-N requiere más agua para retirarlo; y que la solución de desinfectante debe permanecer 30 minutos por cada tubería. Luego se enjuagan con 1000 L de agua purificada y se adiciona etanol.

Al momento de limpiar el tanque de almacenamiento de 2000 L, se prepara una solución de 987 L de agua + 13 L de detergente. Luego se enjuaga con 1000 L de agua y nuevamente se realiza la solución de desinfectante con el mismo volumen de agua correspondiente. Finalmente se enjuaga con 1000 L de agua purificada y se realiza un soplado con aire comprimido, previamente filtrado, tanto para el reactor como para el tanque de almacenamiento.

En esta limpieza, se utilizan 4950 L de agua para el reactor, de los cuales 3950 L son agua potable. Por otro lado, se usan 3700 L de agua para el tanque de almacenamiento, donde 2700 L son agua potable.

2.4.3 Consumo de agua. Dentro del consumo del recurso hídrico es importante verificar los costos que tiene la empresa por el consumo de este y el balance respectivo.

2.4.3.1 Costos. La evaluación del consumo de agua potable de la empresa Pharmetique Labs S.A. se realizó para el año 2019 teniendo en cuenta los registros mensuales por parte del Acueducto (Agua y Alcantarillado de Bogotá). Así, la **Tabla 5** presenta el consumo en cantidad y precio que se registró en cada mes del año ya mencionado.

Tabla 5. Consumo de agua potable en el año 2019.

Mes	Cantidad (m ³)	Precio (\$)	Precio/m ³
Enero	1840	13.427.080	7297.32609
Febrero	2519	18.447.570	7323.37039
Marzo	1874	14.079.790	7513.22839
Abril	1738	13.058.920	7513.76295
Mayo	2328	17.487.690	7511.89433
Junio	1957	13.730.668	7016.18191
Julio	1826	14.940.303	8181.98412

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

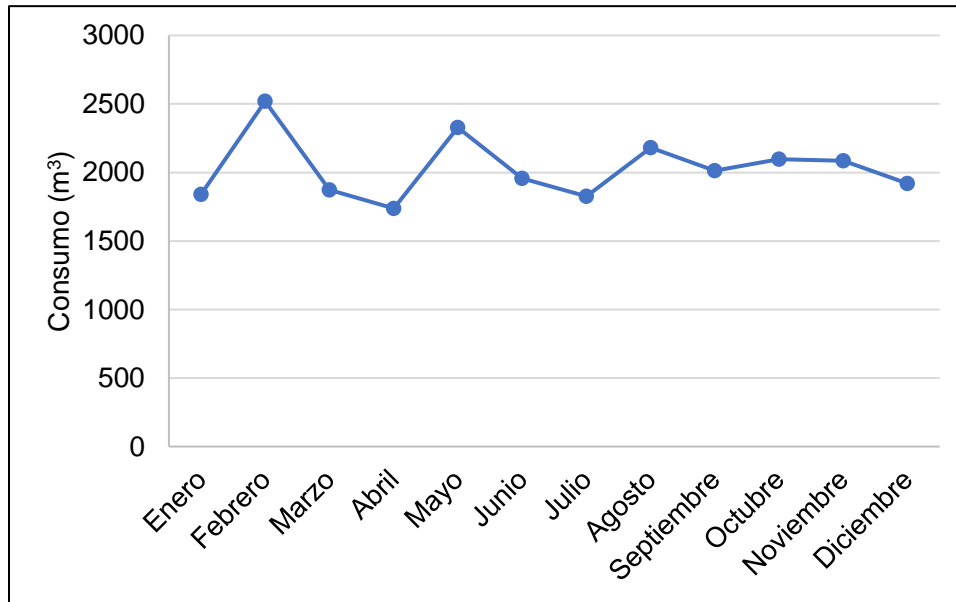
Tabla 5. (Continuación).

Mes	Cantidad (m³)	Precio (\$)	Precio/m³
Agosto	2182	17.585.190	8059.20715
Septiembre	2014	16.324.040	8105.28302
Octubre	2098	16.954.690	8081.35844
Noviembre	2086	16.864.500	8084.6117
Diciembre	1919	14.003.030	7297.04534
Promedio	2031.75	15.575.289	7665.43782
Total	24381	186.903.471	-

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

A partir de la información anterior se puede observar que el consumo mensual de agua potable no es constante, debido a que la cantidad de agua necesaria para cada mes depende de la planeación de fabricación y las limpiezas de equipos y máquinas que sean requeridas, puesto que el consumo tanto para casino y servicios generales, se encuentra dentro un rango establecido.

Gráfica 1. Consumo de agua potable del año 2019.



Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Ahora bien, la **Gráfica 1** presenta los picos del consumo de agua potable durante el año 2019, donde se identifica un consumo mayor en meses como febrero, mayo y agosto, debido a la planeación de fabricación correspondiente a estos meses, y a su vez, las limpiezas de equipos programadas; teniendo en cuenta que las planeaciones de producción de la empresa Pharmetique Labs S.A. se manejan semanalmente, por lo cual, el consumo de agua potable depende directamente de las programaciones que se llevan a cabo en cada mes.

También, los picos que se evidencian en el consumo de agua potable se ven influenciados por una limpieza exhaustiva la cual se realizó desde el mes de diciembre del año 2019 y finalizó a mediados de marzo del 2020, debido a que dentro de la planta de producción se estaba realizando una obra para mejoras de adecuación de esta; por lo cual el consumo se ve influenciado directamente aumentado el uso del recurso hídrico y a su vez el uso de detergentes y desinfectantes. Por esto se espera, que la propuesta que se presenta en este proyecto pueda ser aplicada para casos donde el consumo de agua potable no sea habitual debido a que en este caso se manejan consumos atípicos, lo que genera un aumento en la concentración de fenol.

2.4.3.2 Balance hídrico. Para determinar el consumo del agua dentro de la empresa, se plantea el balance hídrico que se presenta en la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Balance hídrico general.

$$Q_{total} = Q_{planta\ de\ producción\ y\ labs} + Q_{Casino\ y\ servicios\ generales}$$

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Donde:

Q : Caudal de agua

Inicialmente, para determinar el consumo total se toma el valor promedio redondeado del consumo de agua potable del año 2019, para lo cual se toma un valor de 2040 m³/mes según lo registrado por los recibos del agua de la empresa, como se muestra a continuación:

$$Q_{total} = 2040 \frac{m^3}{mes} * \frac{1000 L}{1 m^3} = 2040000 \frac{L}{mes} * \frac{1 mes}{4 sem} = 510000 \frac{L}{sem}$$

Seguido de esto, para el consumo en la planta de producción y laboratorios, se tiene en cuenta el consumo de la planta de purificación de agua, el consumo para el agua en limpieza de los equipos y para la fabricación de los productos.

Primero se verifica el consumo de la planta de purificación, la cual cuenta con dos piscinas, una de capacidad de 200 m³ y la otra de 75 m³, generando aproximadamente un consumo del 70% de agua potable por semana, como se evidencia en el siguiente cálculo. Es importante mencionar, que esta planta es la más relevante de la empresa, puesto que toda la fabricación de productos se realiza con esta materia prima.

$$Q_{planta\ de\ purificación} = 510000 \frac{L}{sem} * 70\% = 357000 \frac{L}{sem}$$

Seguido de esto, se puede determinar un consumo de agua en la limpieza de rutina en los equipos para el área de fabricación de jarabes y emulsiones descritas anteriormente. Cabe aclarar, que, para la limpieza, se utiliza tanto agua potable como agua purificada. Para determinar este consumo de agua se trabaja 3 limpiezas por semana.

➤ **Consumo de agua total en el área de producción.** El caudal de agua destinado para la limpieza en el área de jarabes en litros por día es:

$$Q_{limpieza\ Jarabes} = 3500 \frac{L}{día} * 5\ reactores = 17500 \frac{L}{día}$$

Ahora, el caudal de agua destinado para la limpieza en el área de jarabes en litros por semana es:

$$Q_{limpieza\ Jarabes} = 17500 \frac{L}{día} * \frac{3día}{1sem} = 52500 \frac{L}{sem}$$

Por otra parte, el caudal de agua destinado para la limpieza en el área de emulsiones en litros por día es:

$$Q_{limpieza\ Emulsiones} = 4950 \frac{L}{día} * 2\ reactores + 3700 \frac{L}{día} * 2\ tanques = 17300 \frac{L}{día}$$

Así, el caudal de agua destinado para la limpieza en el área de emulsiones en litros por semana es:

$$Q_{limpieza\ Emulsiones} = 17300 \frac{L}{día} * \frac{3d}{1sem} = 51900 \frac{L}{sem}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, el caudal de agua total destinado para la limpieza en litros por semana es de:

$$Q_{total\ limpieza} = 52500 \frac{L}{sem} + 51900 \frac{L}{sem} = 104400 \frac{L}{sem}$$

➤ **Consumo de agua potable.** El caudal de agua potable destinado para la limpieza en el área de jarabes en litros por día es:

$$Q_{agua\ potable\ Jarabes} = 2500 \frac{L}{día} * 5\ reactores = 12500 \frac{L}{día}$$

Ahora, el caudal de agua potable destinado para la limpieza en el área de jarabes en litros por semana es:

$$Q_{agua\ potable\ Jarabes} = 12500 \frac{L}{día} * \frac{3día}{1sem} = 37500 \frac{L}{sem}$$

De igual forma, el caudal de agua potable destinado para la limpieza en el área de emulsiones en litros por día es de:

$$Q_{\text{agua potable Emulsiones}} = 3950 \frac{L}{\text{día}} * 2 \text{ reactores} + 2700 \frac{L}{\text{día}} * 2 \text{ tanques} = 13300 \frac{L}{\text{día}}$$

Así, el caudal de agua potable destinado para la limpieza en el área de emulsiones en litros por semana es:

$$Q_{\text{agua potable Emulsiones}} = 13300 \frac{L}{\text{día}} * \frac{7 \text{ d}}{1 \text{ sem}} = 93100 \frac{L}{\text{sem}}$$

De esta forma, el caudal total de agua potable para la limpieza en litros por semana equivale al siguiente cálculo:

$$Q_{\text{agua potable total en limpieza}} = 37500 \frac{L}{\text{sem}} + 93100 \frac{L}{\text{sem}} = 130600 \frac{L}{\text{sem}}$$

➤ **Consumo de agua purificada.** Para determinar el consumo de agua purificada en actividades de limpieza de equipos, se tiene en cuenta el caudal total de agua que se utiliza para estas labores, junto con el consumo total de agua potable, tal como se muestra a continuación:

$$Q_{\text{agua purificada en limpieza}} = 104400 \frac{L}{\text{sem}} - 77400 \frac{L}{\text{sem}} = 27000 \frac{L}{\text{sem}}$$

Según los resultados, el consumo de agua potable al momento de realizar limpieza para los reactores que componen el área de fabricación de jarabes y de emulsiones de aproximadamente de 77400 L por semana. Por otra parte, se evidencia que el consumo de agua potable es mayor para el área de fabricación de emulsiones con 93100 L por semana.

Ya con esto, se determina el consumo de agua purificada en la fabricación de productos. Este valor se determina mediante la resta del agua purificada producida y la que se gasta para limpieza. Según el cálculo que se presenta a continuación, se utilizan aproximadamente 330000 L por semana para la producción.

$$Q_{\text{fabricación}} = 357000 \frac{L}{\text{sem}} - 27000 \frac{L}{\text{sem}} = 330000 \frac{L}{\text{sem}}$$

Al momento de realizar el balance hídrico para el agua potable se tiene en cuenta el consumo total, el consumo de la planta de producción y el del casino y servicios generales como se indica en la **Ecuación 2**. Teniendo en cuenta que, para

determinar el consumo en la planta de producción se establece el de la planta de purificación y el de limpieza como se describió anteriormente.

Ecuación 2. Balance general del consumo de agua.

$$Q_{total} = (Q_{planta\ de\ purificación} + Q_{agua\ potable\ en\ limpieza}) + Q_{Casino\ y\ servicios\ generales}$$

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

De esta forma, el caudal de agua potable que se utiliza en el casino y servicios generales se realiza mediante el siguiente despeje:

$$510000 \frac{L}{sem} = 357000 \frac{L}{sem} + 77400 \frac{L}{sem} + Q_{Casino\ y\ servicios\ generales}$$

Así, el caudal de agua potable destinado para el casino y servicios generales es de:

$$Q_{Casino\ y\ servicios\ generales} = 75600 \frac{L}{sem}$$

Como se puede evidenciar, debido al balance hídrico planteado para el consumo de agua potable en la empresa, se utilizan aproximadamente 75600 L por semana en labores externas al proceso, como casino y servicios general. Además, se puede observar que el mayor consumo de agua potable, después de la planta de purificación, es en el área de limpieza.

2.5 COMPARACIÓN CON LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014

Teniendo en cuenta lo observado en el capítulo I referente al diagnóstico del estado actual de las aguas residuales provenientes de la PTAR en Pharmetique Labs S.A., se concluyó que estas cumplen con lo establecido en la resolución 631 de 2015, la cual estipula los parámetros establecidos para el vertimiento de aguas industriales. Sin embargo, para el cumplimiento de la resolución 1207 de 2014, es necesario disminuir la presencia de fenoles, tal como se muestra en la **Tabla 6** los cuales no pueden ser removidos con los tratamientos que actualmente realiza la compañía, siendo este un parámetro indispensable para el reúso de dichas aguas dentro de las instalaciones en actividades referentes al uso industrial.

Tabla 6. Verificación del cumplimiento de la Resolución 1207 de 2014.

Parámetro	Unidad de medida	Valor de Pharmetique Labs s.a.	de Resolución 1207 de 2014	Cumplimiento para uso industrial
Aceites y grasas	mg/L	<10	-	-
Acidez	mg/L	41	-	-
Alcalinidad	mg/L	646	-	-
Arsénico	mg/L	<0.001	0.1	Cumple
Cadmio	mg/L	<0.001	0.01	Cumple
Cloruros	mg/L	25	300	Cumple
C. Absorción 436 nm	mg/L	0.1	-	-
C. Absorción 520 nm	mg/L	0.0	-	-
C. Absorción 620 nm	mg/L	0.0	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	14	30	Cumple
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	<50	-	-
Dureza Cálcica	mg/L	11	-	-
Dureza total	mg/L	13	-	-
Fenoles	mg/L	<0.08	0.002	No cumple
Mercurio	mg/L	<0.001	0.001	Cumple
pH	Unidades de pH	6.92 – 7.56	6,0 – 9,0	Cumple
Surfactantes (SAAM)	mg/L	0.31	-	-

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

Tabla 6. (Continuación).

Parámetro	Unidad de medida	Valor de Pharmetique Labs s.a.	de Resolución 1207 de 2014	Cumplimiento para uso industrial
Sólidos sedimentables (SS)	mg/L	<0.5	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	14	-	-
Sulfatos	mg/L	30	500	Cumple
Temperatura	°C	20.3 – 23.6	-	-

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.

2.5.1 Cuantificación exacta de fenoles. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la **Tabla 6**, se tiene una cuantificación estimada de la presencia de fenoles en las aguas residuales de Pharmetique Labs S.A., para lo cual es necesario realizar un análisis que permita tener el valor exacto de dicho contaminante. Según lo anterior, mediante la técnica de análisis referente a espectrofotometría directa que emplea el laboratorio Analquim Ltda., se conoce el valor exacto de fenoles el cual es de 0.32 mg/L (ver **ANEXO C**) para las aguas de salida de la PTAR de Pharmetique Labs S.A.

Cabe resaltar que los fenoles se originan en la empresa Pharmetique Labs S.A. debido a se utilizan como componentes para la producción de medicamentos que tienen funciones antisépticas y anestésicas⁹¹. Este contaminante es utilizado como materia prima para producir el ácido acetilsalicílico, utilizado en las tabletas analgésicas⁹²; el salicilato de metilo, el cual se usa para la producción de gel antiinflamatorio⁹³; y el cloroxifenol, con el cual se fabrican las soluciones para el lavado de heridas⁹⁴. Se debe tener en cuenta, que estos derivados poseen un bajo

⁹¹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas. En: minambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. p. 232. [24-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en:

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/guia_25_sustancias.pdf

⁹² INGENIERO CHIRINOS A. Importancia del fenol. [Sitio WEB]. Perú: la entidad. [24, julio, 2020]. Disponible en: <https://www.importancia.cc/fenol/>

⁹³ MUHYE, Anthony. Salicilato de metilo: estructura, propiedades, usos y síntesis. En: lifeder. [sitio web]. Venezuela: la entidad. p. 24. [24-07-2020]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/salicilato-metilo/#Usos>

⁹⁴ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Sección 15: Desinfectantes y antisépticos. En: OMS. [sitio web]. p. 3. [24-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <http://archives.who.int/eml/wmf/2004/Spanish/pdf/Sec15-04.pdf>

nivel de toxicidad, por lo que son aptos para la fabricación de fármacos, cosméticos o conservantes de alimentos⁹⁵.

Adicionalmente, este compuesto es utilizado para la producción de detergentes o desinfectantes, donde se encuentran específicamente dentro del grupo de los tensoactivos no iónicos, los cuales actúan como agentes que rebajan la tensión interfacial, se adsorben y cambian el potencial superficial, con el fin de dispersar las partículas sólidas⁹⁶. Como tal, estos surfactantes no producen iones en solución acuosa facilitando la compatibilidad con cualquier tipo de tensoactivo; además, son buenos detergentes, humectantes y emulsionantes. Los compuestos de polioxietileno son los más utilizados como tensoactivos no iónicos; estos se producen como tal de la reacción del óxido de etileno con los alcoholes de cadena larga, algunos derivados de aminas y alquifenoles⁹⁷; los cuales se derivan del nonilfenol, sustancia utilizada en la fabricación de productos de limpieza⁹⁸. Como tal, los alquifenoles son usados es la formulación de los detergentes líquidos y detergentes para la industria láctea y farmacéutica⁹⁹.

Ahora bien, es importante mencionar que la concentración de fenoles presentada fue cuantificada en el mes de marzo del 2020 mediante una muestra puntual donde como se evidencia en el **ANEXO C** se obtiene un valor de 0.32 mg/L de fenoles totales, siendo este mayor con respecto a lo que normalmente reporta la empresa, el cual debería estar por debajo de 0.08 mg/L. Esto se debe a que, en el momento de tomar la muestra de las aguas residuales en la PTAR de la empresa, se estaba realizando una limpieza exhaustiva, por lo cual se incrementó el uso de detergentes y desinfectantes, aumentando la concentración de este contaminante en las aguas residuales de la empresa.

También se debe tener en cuenta las condiciones del protocolo de bioseguridad que hoy en día se manejan en las industrias debido a la pandemia por el Covid-19, ya que es necesario implementar el uso de los antisépticos y geles para el personal de la empresa; además de manejar en mayor cantidad los desinfectantes y detergentes para la limpieza en las áreas de fabricación. Por lo anterior, se pueden ver afectados ciertos parámetros como la DBO₅, el OD, los sólidos sedimentables, el olor y la turbidez, debido a la formación de sales. Adicionalmente, se puede ver afectada la

⁹⁵ SANZ TEJEDOR, Ascensión. La industria de los agentes tensoactivos. En: Universidad de Valladolid. [sitio web]. España: la entidad. [25-07-2020]. Disponible en: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>

⁹⁶ SALAGER, Louis-Jean. Detergentes: componentes, fabricación, fórmulas, etc. En: Universidad de los Andes, Laboratorio FIRP. Venezuela: la entidad. p. 3. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S332A_Detergentes.pdf

⁹⁷ SANZ TEJEDOR. Op. Cit.

⁹⁸ MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Nonifenol y etoxilatos de nonifenol. En: Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. [sitio web]. España: la entidad. p. 1. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Nonifenol-y-Etoxilatos-de-nonifenol,15651,11,2007.html>

⁹⁹ SANZ TEJEDOR. Op. Cit.

formación de flocs debido a que el proceso de sedimentación se realiza de forma más lenta¹⁰⁰ y la actividad bacteriana, ya que al momento de sobrecargar las aguas con estos productos se genera un crecimiento acelerado de estas¹⁰¹.

La espectrofotometría directa es una técnica ampliamente utilizada para la detección precisa de moléculas de distinta naturaleza, dentro de las cuales se encuentran los contaminantes presentes en las aguas¹⁰², teniendo la capacidad de alcanzar hasta valores de 0.002 mg/L.

2.5.2 Remoción de fenoles para el reúso de las aguas residuales. Para poder reutilizar las aguas residuales producidas en Pharmetique Labs S.A se debe disminuir la concentración del contaminante fenol a 0.002 mg/L, como indica la resolución 1207 de 2014; es decir que se debe retirar casi en su totalidad ya que es un contaminante considerado altamente tóxico¹⁰³, que se oxida rápidamente y forma benzoquinona o sales y, que además genera malos olores. La benzoquinona se produce mediante la eliminación de hidrogeno o por adición de un oxidante y las sales se forman cuando se da la ruptura del grupo OH¹⁰⁴. Además, se considera inflamable y corrosivo¹⁰⁵. Cabe aclarar que dentro de los fenoles se encuentra los derivados halogenados o clorofenoles también considerados como sustancias altamente contaminantes¹⁰⁶.

La importancia de eliminar los fenoles casi en su totalidad es evitar los riesgos que puede generar para el ser humano y el impacto ambiental. Aunque este se encuentra en la naturaleza, si se libera de forma continua puede permanecer por

¹⁰⁰ CANJURA ASTORGA, Karla y JEANNETTE LEMUS, Zuleyma. Propuesta de un sistema de tratamiento para las aguas residuales provenientes de lavadores públicos del municipio de Nejapa. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad del Salvador, San Salvador: 2003. p. 50-52. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2625/1/Propuesta_de_un_sistema_de_tratamiento_para_las_aguas_residuales_provenientes_de_lavaderos_p%C3%BAblicos_del_municipio_de_Nejapa.pdf

¹⁰¹ CENTRO VIRTUA DE FORMACIÓN DEL AGUA. Contaminación del agua por detergentes (eutrofización). En: Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A.C. [sitio WEB]. México: la entidad. [25, julio, 2020]. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-detergentes-eutrofizacion/#:~:text=El%20poder%20contaminante%20de%20los,respiraci%C3%B3n%20y%20provoc%C3%A1ndoles%20la%20muerte.>

¹⁰² FUNDAMENTOS DE QUÍMICA. Espectrofotometría. En: Universidad Pablo de Olavide. [sitio web]. Sevilla: la entidad. p. 1. [13-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/quimbiotec/FQpractica4.pdf>

¹⁰³ PASCUAL GARCIA. Op. Cit. p. 16.

¹⁰⁴ MONTOYA DELGADO. Op. Cit. p. 15.

¹⁰⁵ BARBOSA TRILLOS. Op. Cit. p. 31.

¹⁰⁶ PASCUAL GARCIA. Op. Cit. p. 16.

largos periodos de tiempo, ya que tarda en removerse completamente de 2 a 5 días¹⁰⁷.

¹⁰⁷ PATRO GARCÍA, Dorian. Tratamiento de agua residuales industriales fenólicas sintéticas mediante procesos avanzados de oxidación. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México: 2007. p. 36. [Consultado 13, mayo, 2020]. Disponible en: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014876/014876.pdf>

3. SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO

Según lo evidenciado en el diagnóstico, el contaminante fenol se encuentra por fuera del límite permitido en la resolución 1207 de 2014 con una concentración de 0.32 mg/L, por lo cual es necesario emplear un tratamiento terciario que permita su remoción y así cumplir con la calidad necesaria para dar reuso a las aguas residuales que se generan en Pharmetique Labs S.A.

Existen diversos tipos de tratamientos de aguas residuales, dentro de los cuales se encuentran pretratamientos, tratamientos primarios, tratamientos secundarios y tratamientos terciarios. Así, Pharmetique Labs S.A. cuenta en su proceso de la PTAR con cuatro tratamientos primarios (trampas de grasa, tanque de igualación, DAF y tanque de clarificación) y un tratamiento secundario (reactor biológico).

Ahora bien, para la remoción de fenoles es necesario emplear un tratamiento terciario óptimo que permita el reuso industrial de las aguas tratadas sin que se alteren los parámetros ya monitoreados, teniendo en cuenta que estos no pueden superar los límites permitidos en las resoluciones 631 de 2015 y 1207 de 2014. Según lo anterior, las opciones para dicho tratamiento son resinas de intercambio iónico, oxidación avanzada y adsorción con carbono.

3.1 CRITERIOS DE ANÁLISIS PARA LA MATRIZ DE DECISIÓN

Para la selección del tratamiento del agua tratada proveniente de la PTAR de Pharmetique Labs S.A. se utiliza una herramienta cuantitativa y cualitativa denominada, *Método Pugh*, la cual permite comparar las posibles opciones de tratamientos mediante una matriz de decisión. Para esto, es necesario identificar los criterios que serán evaluados con el fin de seleccionar la mejor alternativa teniendo en cuenta las condiciones actuales que tiene la empresa.

De esta forma, los criterios que se analizan para la selección de la alternativa se presentan en el **Cuadro 6**.

Cuadro 6. Criterios de análisis.

Criterio	Definición
Alcance	Este criterio permite identificar la capacidad y la cobertura del tratamiento para la reducción de fenoles según lo requerido por la resolución 1207 de 2014 enfocado al reuso industrial del agua, a partir de datos históricos y recopilación de información de lo consultado en la literatura.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6. (Continuación).

Criterio	Definición
Viabilidad	El criterio comprende la posibilidad de llevar a cabo el tratamiento terciario a partir de un análisis teórico, teniendo en cuenta las condiciones actuales de la PTAR, disponibilidad de recursos referentes a espacio, capacidad de inversión y personal con los que cuenta Pharmetique Labs S.A.
Fiabilidad	Este criterio establece las condiciones óptimas para el funcionamiento del tratamiento según las especificaciones de las aguas tratadas provenientes de la empresa Pharmetique Labs S.A, con el fin de dar un reúso industrial a las aguas tratadas, sin presentar riesgos de operación dentro de dicho proceso.
Características del efluente	Este criterio proporciona la información acerca de qué tratamiento se debe realizar con el fin de mantener todos los parámetros exigidos dentro de los valores límites permisibles.
Costos de construcción y operación	Este permite establecer la viabilidad económica de un tratamiento terciario en la PTAR de Pharmetique Labs S.A., debido a los requerimientos en términos de diseño, construcción, espacio disponible, mano de obra, insumos, y consumo de servicios públicos (energía y/o agua potable). Además, se debe tener en cuenta la vida útil o posibles procesos de regeneración de los tratamientos, ya que esto puede generar costos adicionales.
Disposición de residuos	Este criterio evalúa los desechos que se generan en cada tratamiento analizado, con el objetivo de realizar la disposición final de forma adecuada, sin que se presenten gastos adicionales en dicha actividad.

Fuente: elaboración propia.

Así, el tratamiento que sea seleccionado debe tener la capacidad de reducir la concentración a 0.002 mg/L para fenoles, siendo este el parámetro que no se encuentra dentro de los valores permisibles por la Resolución 1207 de 2014. Además, debe ser viable, en términos de espacios para su construcción, capacidad de inversión y operación, teniendo en cuenta que la empresa cuenta con su límite de personal contratado, por lo cual, se evalúa la disponibilidad de del funcionamiento del tratamiento con el personal actual. No obstante, es necesario

que el tratamiento proporcione las condiciones óptimas para cumplir con el objetivo del presente proyecto; a su vez, las características del efluente deben brindar la información pertinente para tener un punto de partida y seleccionar el tratamiento que no genere inconvenientes en los valores límites para el reúso de las aguas tratadas. Otro aspecto para tener en cuenta en la selección del tratamiento es la generación mínima de residuos o de fácil manejo, para evitar gastos adicionales. Por último, los costos de construcción y operación delimitan la selección del tratamiento debido a que se esperan que para su implementación estos sean mínimos.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

Para elaborar la matriz se realizan los siguientes pasos:

- Asignar el grado de importancia (porcentaje de importancia) de los criterios establecidos, es decir, se realiza mediante porcentajes según las necesidades para llevar a cabo el tratamiento terciario que se acople al estado actual de la empresa.
- Hacer un análisis individual de los tratamientos expuestos anteriormente según los criterios del **Cuadro 6** para caracterizarlos según su cumplimiento en Pharmedique Labs S.A., de la siguiente forma: si hay cumplimiento del criterio se asigna signo positivo (+1), y si no hay cumplimiento se asigna signo negativo (-1).

Tabla 7. Matriz de decisión (Método Pugh).

Criterio	Porcentaje de importancia (%)	Tratamiento Terciario		
		Resina de Intercambio iónico	Oxidación avanzada	Adsorción con carbono
Alcance	25	+1	+1	+1
Viabilidad	20	+1	-1	-1
Fiabilidad	20	+1	+1	+1
Características del efluente	15	-1	-1	-1
Costos de construcción y operación	10	-1	-1	-1
Disposición de residuos	10	+1	-1	-1

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los porcentajes establecidos para cada criterio, *alcance* tiene el mayor valor asignado (25%) en comparación con los otros, debido a que este permite identificar la capacidad y cobertura de cada tratamiento en cuanto a la remoción de

contaminantes fenólicos, siendo este el más importante para dar cumplimiento a las condiciones necesarias del reúso industrial de las aguas tratadas. Por otra parte, *viabilidad* y *fiabilidad* tienen el 20%, ya que el primero tiene en cuenta las necesidades de espacio disponible de la empresa y el segundo hace referencia a las condiciones actuales del vertimiento y a su vez a las condiciones que requiere cada tratamiento para su aplicación. Adicionalmente, *características del efluente* tiene el 15%, debido a que este criterio permite identificar las posibles modificaciones que se presentan en los parámetros fisicoquímicos de las aguas tratadas; y, por último, *costos de construcción y disposición de residuos* tienen un 10%, ya que en estos se evalúa los costos de inversión y la cantidad de residuos que genera cada tratamiento, respectivamente.

3.2.1 Selección del tratamiento a partir del Método Pugh. Para seleccionar el tratamiento terciario, se aplica el porcentaje de importancia de los criterios a las posibles alternativas, de tal forma, la que presente el mayor valor positivo, será la alternativa que satisface los requerimientos del presente proyecto (**Tabla 8**).

Tabla 8. Matriz ponderada de Pugh.

Criterio	Tratamiento Terciario			
	Porcentaje de importancia (%)	Resina de Intercambio iónico	Oxidación avanzada	Adsorción con carbono
Alcance	25	+25	+25	+25
Viabilidad	20	+20	-20	-20
Fiabilidad	20	+20	+20	+20
Características del efluente	15	-15	-15	-15
Costos de construcción y operación	10	-10	-10	-10
Disposición de residuos	10	+10	-10	-10
Total	100	50	-10	-10
Ranking		I	III	II

Fuente: elaboración propia.

Según lo anterior, el tratamiento terciario óptimo para la remoción de fenoles presentes en las aguas tratadas de Pharmetique Labs S.A. son las resinas de intercambio iónico, debido a que cumplen con los criterios de alcance, viabilidad, fiabilidad y disposición de residuos, generando así un total de 50 durante la comparación entre los tres tratamientos, ocupando el primer puesto en la clasificación del Ranking.

3.3 ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en la **Tabla 8**, se realiza un análisis para los tratamientos según las condiciones actuales en Pharmetique Labs S.A. Para esto se realiza un estudio de cada criterio identificando las ventajas y desventajas de estos, con el fin de corroborar el tratamiento seleccionado y así dar reuso a las aguas tratadas provenientes de la PTAR, tal como se muestra a continuación:

3.3.1 Alcance. Para identificar la capacidad y funcionalidad de los tratamientos, se tiene en cuenta la eficiencia de cada uno en la remoción de fenoles, con el fin de lograr una concentración igual o inferior a 0.002 mg/L según lo requerido por la resolución 1207 de 2014.

- **Resina de intercambio iónico.** El tratamiento terciario con resinas de intercambio iónico es utilizado para la remoción de compuestos fenólicos ya que estas se caracterizan por retener los iones presentes en las aguas, removiendo así estas sustancias indeseadas. Dentro de la variedad de resinas intercambiadoras se encuentran las de tipo aniónicas o básicas las cuales presentan iones de hidroxilo OH o iones de cargas negativas y las catiónicas o ácidas las cuales cuentan con iones de hidrogeno H+.

Como tal las resinas intercambian cantidades equivalentes de iones para eliminar las sustancias afines a estas que se encuentren presentes en las aguas, teniendo en cuenta que el intercambio entre la resina y las sustancias del agua ocurre entre las partículas que tengan la misma carga. El contacto que se tiene entre las aguas contaminadas y la resina permite que los iones del fluido desplacen los iones que se encuentran en los sitios activos de la resina, generando así el intercambio iónico.

Al momento de evaluar el alcance o la capacidad de este tratamiento se determina que es posible remover hasta el 99.96% de fenoles y sus derivados presentes en las aguas para concentraciones hasta de 1 mg/L con una resina de tipo aniónica fuerte, como lo es la Amberlyst A26 OH, teniendo en cuenta que se maneja una recirculación durante 60 minutos¹⁰⁸.

- **Oxidación avanzada.** Los procesos de oxidación avanzada (POA) son utilizados para eliminar los compuestos que no pueden degradarse mediante la oxidación biológica, es decir aquellos que se consideran tóxicos tales como los fenoles. Estos tratamientos son procesos fisicoquímicos que realizan cambios en la

¹⁰⁸ VICTOR, María; OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 10. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

estructura química de los contaminantes, fenoles para este caso, utilizando especies transitorias, como el radical hidroxilo (OH°)¹⁰⁹.

Para generar este radical se utiliza oxígeno, peróxido de hidrogeno y catalizadores, los cuales al reaccionar generan subproductos como CO_2 y H_2O . Además, estos radicales tiene una alta efectividad para oxidar la materia orgánica sin necesidad de manejar altas presiones o temperaturas logrando eliminar los contaminantes orgánicos e inorgánicos, reduciendo el DQO y la toxicidad de las aguas¹¹⁰.

Los POA se clasifican como procesos no fotoquímicos y fotoquímicos, según la participación de la luz en estos. Los primeros requieren compuestos químicos como O_3 , H_2O_2 o Fe^{2+} y los segundos necesitan radiación o exposición con rayos UV. En la **Cuadro 7** se muestran los tratamientos más utilizados¹¹¹.

Cuadro 7. Procesos de oxidación avanzada más usados.

Procesos fotoquímicos	Procesos no fotoquímicos
<ul style="list-style-type: none"> • Ultravioleta de vacío. • UV//H_2O_2. • UV//O_3. • Foto-Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$). • Fotocatálisis con TiO_2. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ozonización en medio alcalino (O_3). • Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$). • Peróxido de hidrogeno y catalizador ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$).

Fuente: elaboración propia, con base en FERNANDEZ ALBA, Antonio; *et al.* Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [sitio web]. Organización Madri+d: la entidad. p. 60. [18-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

Para este caso, se evalúa el proceso de oxidación avanzada con ozonización ya que es utilizado para degradar fármacos, pesticidas, contaminantes fenólicos y otros, además de eliminar el olor y sabor; permitiendo así reutilizar las aguas tratadas. Para llevar a cabo este tratamiento se produjo el ozono mediante oxígeno industrial en un ozonificador BMT 802¹¹².

¹⁰⁹ MONGE BES, Sarai; *et al.* Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados a tratamientos de aguas residuales industriales. En: Cyted: Ciencia y tecnología para el desarrollo. [sitio web]. Asociación de países Iberoamericanos: la entidad. p. 10. [18-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

¹¹⁰ Ibid. p. 10

¹¹¹ Ibid. p. 11.

¹¹² MUÑOZ, Florinella y PAREDES, Anael. Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. Revista Científica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. [en línea]. 2014, 34 (1). p. 3. [18-05-2020]. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/Descontaminaciondefenoles_enefluente.pdf

Esta experimentación se realizó para agua residuales de una refinería, definiendo cuatros valores de pH entre 5.5 y 8.5; donde se obtuvo un porcentaje de remoción de fenol del 99.63% para un pH de 5.5 con un tiempo de acción del tratamiento de 1.5 minutos y un porcentaje de remoción de fenol para el 99.77% para el pH de 8.5 con el mismo tiempo de acción. Según lo anterior, se evidencia que el cambio del pH tiene un efecto significativo en la velocidad de remoción ya que mejoró a medida que el pH aumentaba puesto que el ozono reacciona con pH alcalinos para formar radicales OH¹¹³.

Por tanto, este tratamiento de oxidación avanzada, utilizando ozono, sería efectivo si se aplicará para las aguas tratadas de la empresa Pharmetique Labs S.A. ya que lograría una reducción de los fenoles hasta el 0.002 mg/L.

- **Adsorción con carbono.** Los fenoles al ser compuestos tóxicos aún en bajas concentraciones han incrementado el interés por desarrollar métodos eficaces que permitan lograr una descontaminación adecuada de las aguas por motivos ambientales y afectaciones en la salud de los seres humanos, dentro de los cuales, uno de los más empleados es la adsorción con carbón activado¹¹⁴. Es por esta razón, que en la actualidad se han desarrollado tecnologías que faciliten la operación de los procesos y a su vez se alcancen eficiencias considerables para reducir la presencia de fenoles.

Un estudio realizado por la Universidad Hadhramout muestra la eficiencia alcanzada a partir de nanoestructuras de carbono, las cuales presentan un gran área superficial, porosidad y características de superficie ajustables, utilizando un adsorbente híbrido (producto de elementos de distinta naturaleza que se diferencian por su composición y estructura) de CNT e injertados con PEG, teniendo en cuenta que, para la eliminación de fenol, el proceso depende directamente de las modificaciones realizadas sobre el pH de las aguas en un rango de 3 a 10, donde se observa que el porcentaje de eliminación de fenol aumentó de 80% a 95% a medida que el pH se elevó de 3 a 5. De esta forma, durante el desarrollo, se evidencia una eficiencia del 100% aproximadamente en un tiempo de contacto de 30 minutos¹¹⁵.

Por tal razón, el método de adsorción con carbono cumple con el alcance del presente proyecto, debido a que es posible reducir la cantidad de fenoles que

¹¹³ Ibid. p. 4.

¹¹⁴ DELGADILLO GAMBOA, Gloria. Adsorción de fenol con carbones activados preparados a partir de pepas de níspero de palo por activación química. Revista de la Sociedad Química del Perú. [en línea]. 2009, 75 (1). p. 65. [Consultado 18, mayo, 2020]. 1810-634X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371937612009>

¹¹⁵ OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2020, 13 (100286). p. 2. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

actualmente presenta las aguas de vertimiento de Pharmetique Labs S.A. (0.32 mg/L) a un valor inferior al requerido por la resolución 1207 de 2014 (0.002 mg/L).

3.3.2 Viabilidad. Según las condiciones actuales de la PTAR es necesario que los tratamientos cumplan con los requerimientos proporcionados por la empresa en cuanto a disponibilidad de recursos (espacio, capacidad de inversión y personal).

- **Resinas de intercambio iónico.** Este tratamiento se lleva a cabo en una configuración de lecho (fijo o móvil), según los requerimientos en cuanto al tipo de resina que se utiliza. En el caso de la empresa Pharmetique Labs S.A., es posible utilizar un lecho fijo de estilo unitario, es decir, su operación se realiza con un solo tipo de resina¹¹⁶, siendo esta, una resina aniónica fuerte¹¹⁷.

Al momento de evaluar el tratamiento de intercambio iónico, este es viable debido a que, para el diseño del lecho, se requiere una altura mínima de 0.75 m al trabajar con una resina aniónica fuerte¹¹⁸, siendo este un espacio disponible según la distribución actual de los equipos que se encuentran en la PTAR. Adicionalmente, se requieren de dos tanques de almacenamiento que tengan una capacidad de aproximadamente 10000 L cada uno para las aguas tratadas, las cuales tendrán un reúso industrial en las limpiezas que se realizan tanto en el área de emulsiones como en el área de jarabes, donde se utilizan 77400 litros por semana de agua potable, los cuales se espera que estos se puedan reducir utilizando las aguas tratadas mediante intercambio iónico. Teniendo en cuenta que las limpiezas se realizan tres veces por semana, según lo descrito en el capítulo 2, es necesario tener un control sobre los tanques, en cuanto la capacidad máxima que estos pueden almacenar. Según lo anterior, es necesario que, dependiendo de los días de limpieza, se utilice las aguas recolectadas.

Seguido de esto, este proceso necesita de cuatro bombas destinadas para: la alimentación de las aguas salientes del reactor biológico al lecho de intercambio, alimentación del regenerante al prototipo y el suministro de las aguas tratadas a los tanques de almacenamiento.

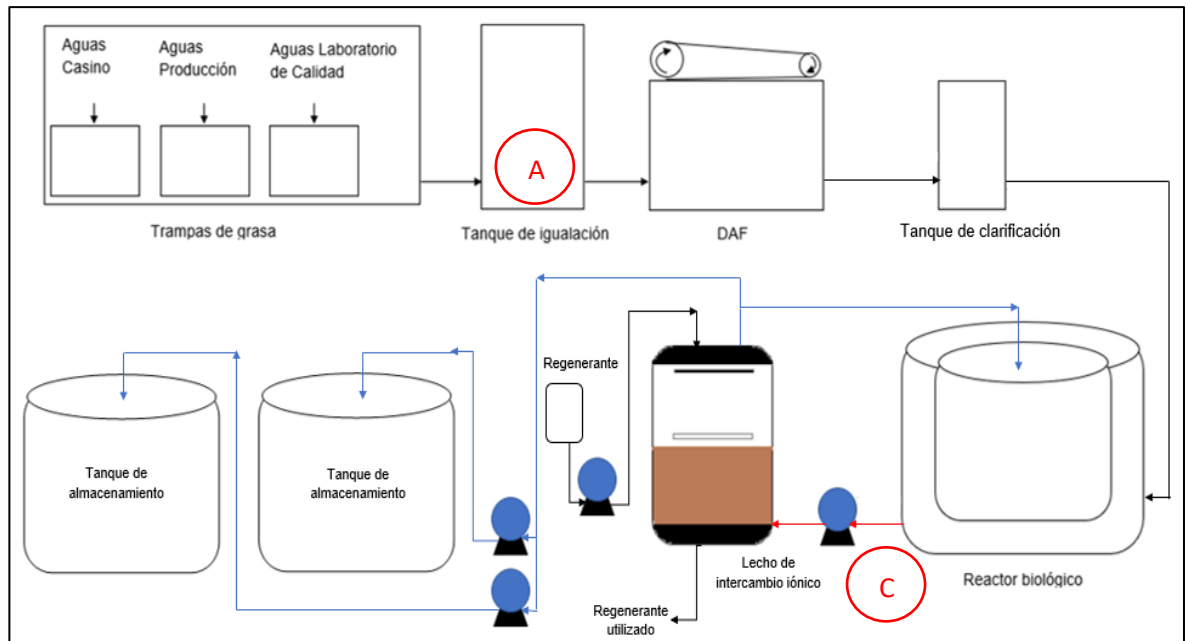
En la **Figura 21** se representa el esquema general de sistema de intercambio iónico en la PTAR de la empresa.

¹¹⁶SÁNCHEZ RUIZ, Concepción. Intercambio iónico. En: Universidade da Coruña. [sitio web]. Coruña: la entidad. p. 9. [02-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659>

¹¹⁷ VICTOR y MARTINEZ. Op. Cit. p. 2.

¹¹⁸SÁNCHEZ. Op. Cit. p. 13.

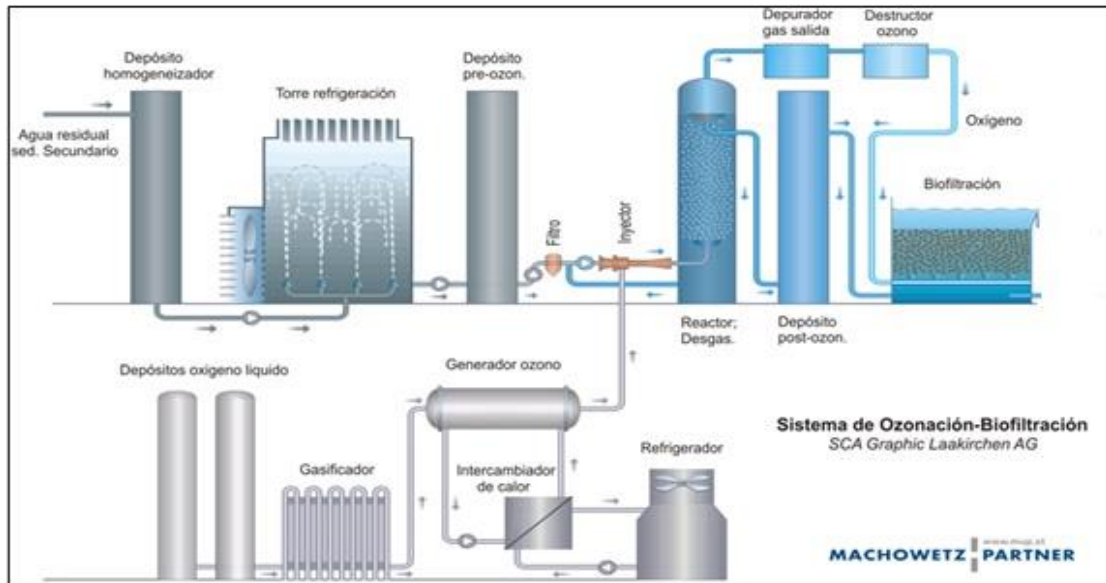
Figura 21. Diagrama propuesto para la PTAR de Pharmetique Labs S.A.



Fuente: elaboración propia, con base en VICTOR, María; OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 5. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

- **Oxidación avanzada.** Al momento de evaluar la viabilidad se tiene en cuenta que este es un tratamiento que requiere ciertas características de espacio, ya que es necesario implementar un sistema de ozonización como el que se muestra en la **Figura 22**.

Figura 22. Sistema de tratamiento con ozono.



Fuente: KAINDL, Nikolaus y LIECHTI, Pierre-André. Design and operation experience of advanced effluent treatment with ozonation and subsequent biofiltration at the paper mill SCA-Graphic Laakirchen AG – Austria. En: ResearchDate. [sitio web]. p.6. [19-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/233312878_Advanced_Effluent_Treatment_with_Ozonation_and_Biofiltration_at_the_Paper_Mill_SCA-Graphic_Laakirchen_AG_-_Austria_Design_and_Operation_Experience

Para este sistema es necesario tener un tanque de homogenización antes de entrar a una torre de enfriamiento, si las aguas superan una temperatura de 30°C, para el caso de Pharmetique Labs S.A no sería necesario ya que el agua tratada sale a una temperatura entre 20.3 – 23.6. Luego, las aguas ingresan al tanque de pre-ozonización para luego pasar a través de un filtro y así alimentar el reactor donde se produce la reacción del ozono con los compuestos no biodegradables y una desgasificación del ozono disuelto. Finalmente, el agua entra a un tanque de post-ozonización para descomponer el ozono disuelto¹¹⁹.

Además, es necesario instalar la unidad de generación de ozono, la cual es alimentada con oxígeno industrial almacenado en un tanque. Este oxígeno puede estar en una fase líquida y de ser así es necesario ubicar un gasificador. Finalmente

¹¹⁹ KAINDL, Nikolaus y LIECHTI, Pierre-André. Design and operation experience of advanced effluent treatment with ozonation and subsequent biofiltration at the paper mill SCA-Graphic Laakirchen AG – Austria. En: ResearchDate. [sitio web]. p.6. [19-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/233312878_Advanced_Effluent_Treatment_with_Ozonation_and_Biofiltration_at_the_Paper_Mill_SCA-Graphic_Laakirchen_AG_-_Austria_Design_and_Operation_Experience

es importante refrigerar el generador, por esto se debe instalar una unidad de refrigeración y un intercambiador de calor¹²⁰.

De lo anterior se puede concluir que en la empresa Pharmetique Labs S.A no tiene el espacio suficiente, ni la capacidad de inversión para implementar este proceso de ozonización. Así mismo, no cuenta con personal adicional para el manejo de esta unidad.

- **Adsorción con carbono.** Según el estudio realizado acerca de la síntesis de nanotubos de carbono e injertados con PEG para la eliminación de fenoles en las aguas residuales, se requieren diversos equipos y materiales para la experimentación, los cuales se indican en el **Cuadro 8** con su respectiva aplicación dentro del proceso que se desarrolla.

Cuadro 8. Equipos y/o materiales necesarios para la adsorción con carbono.

Equipos y/o materiales	Aplicación
Matraz de fondo redondo de tres bocas de 500 ml con una barra de agitación magnética	Se realiza la mezcla de los MWCNT con ácido nítrico.
Un condensador de reflujo equipado en el centro del matraz	
Placa de cocción	La mezcla de reacción se debe calentar a 120°C durante 48 horas con agitación constante.
Horno de vacío	El producto debe ser secado durante 24 h a 60°C.
Espectrómetro FT-IR Nicolet 6700	El material preparado es analizado mediando espectroscopía infrarroja.
Microscopio electrónico de barrido (SEM JEOL JSM-6610 LV) acoplado a espectroscopía de rayos X dispersiva de energía (EDX)	Se utilizada para la caracterización de la morfología de la superficie del material.

Fuente: elaboración propia, con base en OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2020, 13 (100286). p. 4-6. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

A partir de la información anterior se determina que el desarrollo de este tratamiento dentro de las instalaciones de Pharmetique Labs S.A necesita una inversión que no cumple con los requerimientos de la empresa, tanto en equipos como en insumos, estos últimos hacen referencia a: nanotubos de carbono de paredes múltiples

¹²⁰ Ibid. p. 6.

(MWCNT) y el PEG de polietilenglicol; razón por la cual, el criterio relacionado a la viabilidad no se llevaría a cabo, debido a que la empresa no cuenta con el espacio necesario para la ubicación de los equipos y, a su vez estos requieren de personal adicional para su manejo y operación.

3.3.3 Fiabilidad. En cuanto al funcionamiento de los tratamientos se hace necesario establecer las condiciones óptimas para que estos se lleven a cabo correctamente, teniendo en cuenta las especificaciones o parámetros fisicoquímicos en la salida de la PTAR (vertimiento).

- **Resinas de intercambio iónico.** Para determinar la fiabilidad del tratamiento con resinas de intercambio iónico es necesario tener en cuenta algunas condiciones de las aguas pretratadas para una correcta de operación. Para llevar a cabo este proceso se deben manejar ciertas temperaturas según el tipo de resina aniónica, sea fuerte o débil, tal como se muestra en el **Cuadro 9**.

Cuadro 9. Temperaturas máximas para las resinas aniónicas.

Tipo de resina aniónica	Temperatura máxima (°C)
Aniónica fuerte acrílica	35
Aniónica fuerte acrílica macroporosa	60
Aniónica débil gel	60

Fuente: SÁNCHEZ RUIZ, Concepción. Intercambio iónico. En: Universidade da Coruña. [sitio web]. Coruña: la entidad. p. 20. [02-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659>

Según lo anterior, las aguas tratadas en la PTAR de Pharmetique Labs S.A cumplen, ya que tienen una temperatura entre 20.3 – 23.6 °C.

Por otro lado, es importante tener en cuenta el pH del afluente ya que, aunque a la mayoría de las resinas tienen una estabilidad química a cualquier valor de pH, su rendimiento se ve afectado por este parámetro. Por esto, las resinas de tipo catiónico no trabajan bien a un pH bajo pues se genera un exceso de H⁺ y las de tipo aniónico a pH altos debido a que se genera exceso de OH⁻, produciendo en ambas un impedimento del intercambio entre los iones¹²¹. En el **Cuadro 10** se evidencia el rango de pH para la operación óptima del tipo de resinas.

¹²¹SÁNCHEZ. Op. Cit. p. 21.

Cuadro 10. Rango de pH óptimo para los tipos de resinas.

Tipo de resina	Rango de pH
Catiónica débil	6-14
Catiónica fuerte	4-14
Aniónica débil	0-7
Aniónica fuerte	0-14

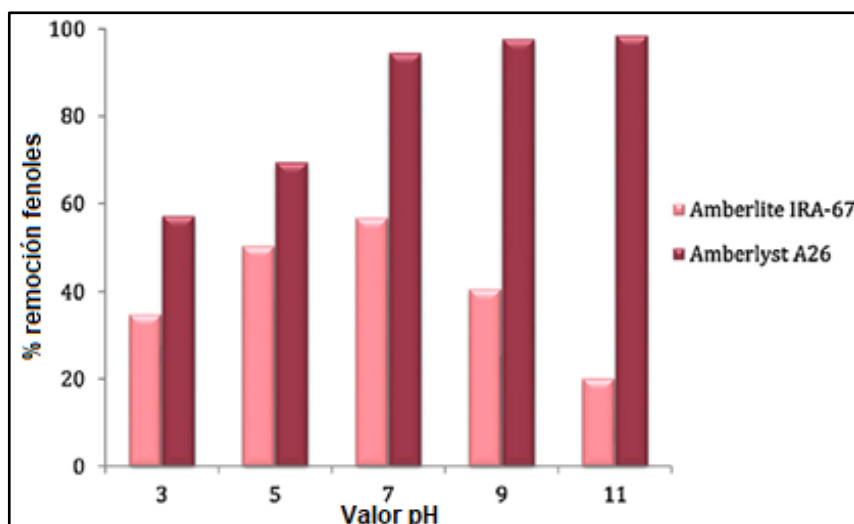
Fuente: SÁNCHEZ RUIZ, Concepción. Intercambio iónico. En: Universidade da Coruña. [sitio web]. Coruña: la entidad. p. 21. [02-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659>

Como se observa en la **Figura 23**, al momento de utilizar una resina aniónica fuerte como la Amberlyst A26 OH para una muestra con pH entre 3-11, con una concentración inicial de fenoles de 50 mg/L, una dosis de resina de 3.5 g/L y un tiempo de equilibrio de 60 minutos, se logra una remoción entre 60% y el 99.96%, la cual aumenta a medida de que el pH lo hace, pero este aumento después del pH de 7 es poco significativo, por lo cual este se puede considerar como el pH óptimo. Para el tema de la resina aniónica débil como la Amberlite IRA-67, se evidencia la mejor eficiencia, de 57% a un pH de 7 y a medida que este aumenta, esta disminuye, puesto que su rango óptimo de activación es de 0 a 7 como se menciona anteriormente¹²².

¹²² OCHANDO PULIDO, Javier M.; *et al.* Performance and modeling of continuous ion Exchange processes for phenols recovery from olive mil wastewater. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2020, 249. p. 5. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN. 1383-5866. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620315586>

¹²²SÁNCHEZ. Op. Cit. p. 13.

Figura 23. Efecto del pH inicial en la remoción de fenoles.



Fuente: OCHANDO PULIDO, Javier M.; *et al.* Performance and modeling of continuous ion Exchange processes for phenols recovery from olive mil wastewater. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2020, 249. p. 5. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN. 1383-5866. Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620315586>

En consecuencia, las aguas pretratadas en la PTAR de Pharmetique Labs S.A cuentan con las condiciones de pH óptimas para la implementación de este tratamiento, pues se encuentran entre un rango de 6.92 – 7.56, lo cual evidencia la fiabilidad para trabajar este tratamiento.

- **Oxidación avanzada.** Para que este tratamiento funcione es necesario tener en cuenta condiciones iniciales de operación. Como se mencionó anteriormente, este es un proceso que no requiere manejo de altas presiones o temperaturas, en cambio, es necesario trabajar a temperaturas entre los 20 - 40 °C, ya que el funcionamiento de los equipos depende de esto y durante la ozonización del agua puede producir un alza, por lo que es una manera de contrarrestar el cambio en la temperatura¹²³. Para este caso, las aguas tratadas en la PTAR de Pharmetique Labs S.A cumplen, ya que tienen una temperatura entre 20.3 – 23.6 °C.

Por otra parte, es importante tener en cuenta el pH de las aguas para aplicar el tratamiento, ya que la mejor remoción se dio con un pH neutro como se muestra en la **Tabla 9**, donde se evidencia un porcentaje de remoción de fenoles hasta del 99.96% en un tiempo de aplicación del tratamiento de 1.5 minutos¹²⁴.

¹²³ KAINDL. Op. Cit. p. 6.

¹²⁴ MUÑOZ. Op. Cit. p. 4

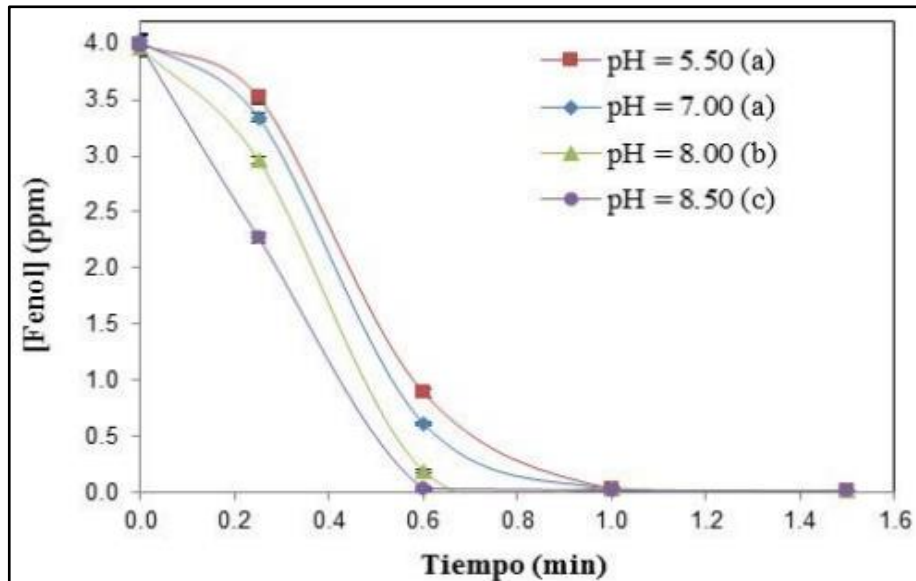
Tabla 9. Influencia del pH inicial en el tratamiento con ozono.

Tiempo (min)	Remoción de fenol (%)
pH inicial=5.5	
0.25	11.88
0.6	77.71
1.5	99.63
pH inicial=7	
0.25	16.84
0.6	84.67
1.5	99.96
pH inicial=8	
0.25	25.19
0.6	95.14
1.5	99.62
pH inicial=8.5	
0.25	99.16
0.6	99.56
1.5	99.77

Fuente: elaboración propia, con base en MUÑOZ, Florinella y PAREDES, Anael. Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. Revista Científica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. [en línea]. 2014, 34 (1). p. 4. [18-05-2020]. Disponible en: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/Descontaminaciondefenolesenefluente.pdf>

Además, esta variable afecta también la velocidad de remoción ya que a medida que el pH es más alcalino se tiene una remoción más rápida debido a que el ozono se reacciona con los pH alcalinos y genera radicales hidroxilos, los cuales tienen una alta reactividad; lo anterior se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24. Remoción de fenoles a partir del tratamiento con O₃.



Fuente: MUÑOZ, Florinella y PAREDES, Anael. Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. Revista Científica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. [en línea]. 2014, 34 (1). p. 3. [18-05-2020]. Disponible en: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/Descontaminaciondefenoleseneffluente.pdf>

En este caso, las aguas tratadas dentro la empresa tiene un pH entre 6.92 – 7.56, por lo cual este tratamiento se ajusta a los parámetros fisicoquímicos de las aguas tratadas.

- **Adsorción con carbono.** El tratamiento que se ejecuta a partir de nanotubos de carbono e injertados con PEG para la eliminación de contaminantes como los fenoles en aguas residuales, cuenta con una serie de condiciones óptimas para su funcionamiento que permiten lograr eficiencias requeridas en la remoción de estos; de tal forma, al ser modificadas estas condiciones se ven alterados los resultados finales. Para lo anterior, las variables analizadas en este estudio se explican a continuación:

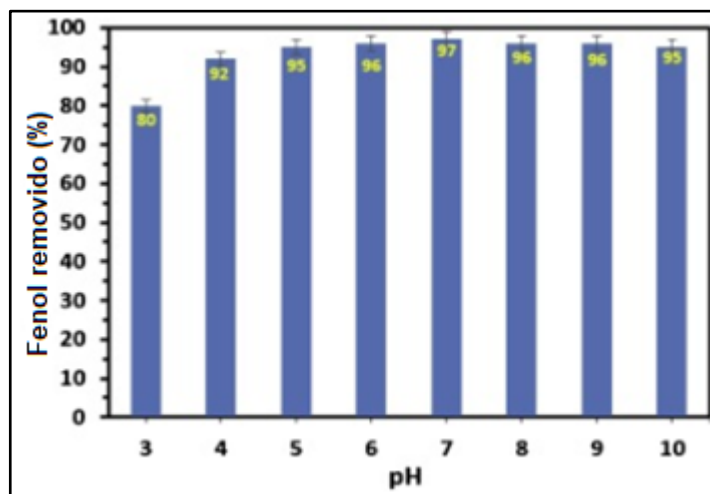
Cuadro 11. Condiciones de operación para la adsorción con carbono.

Variable	Operación
Concentración de adsorbato (fenol)	5 mg/L a 50 mg/L
pH de la solución	Entre 3 y 10
Temperatura	298 K
Tiempo de contacto	0 a 60 min
Dosis de CNT/PEG	5 mg a 100 mg

Fuente: elaboración propia, con base en OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020, 13 (100286). p. 4-6. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

Ahora bien, según Osamah y Tawfik, la adsorción de fenol se ve afectada por las modificaciones sobre el pH, debido a que el pH del medio predomina sobre la cantidad de las cargas emitidas por el contaminante, teniendo en cuenta que se tiene un rango de operación entre 3 y 10, donde la **Figura 25** indica que el pH óptimo se encuentra aproximadamente entre 6 a 8; sin embargo, hubo una remoción con variaciones mínimas en un pH de 5 a 9. Lo anterior, es causado por el tipo de cargas que recibe el material (negativas o positivas)¹²⁵.

Figura 25. Efecto del pH en la adsorción con carbono a 298K.

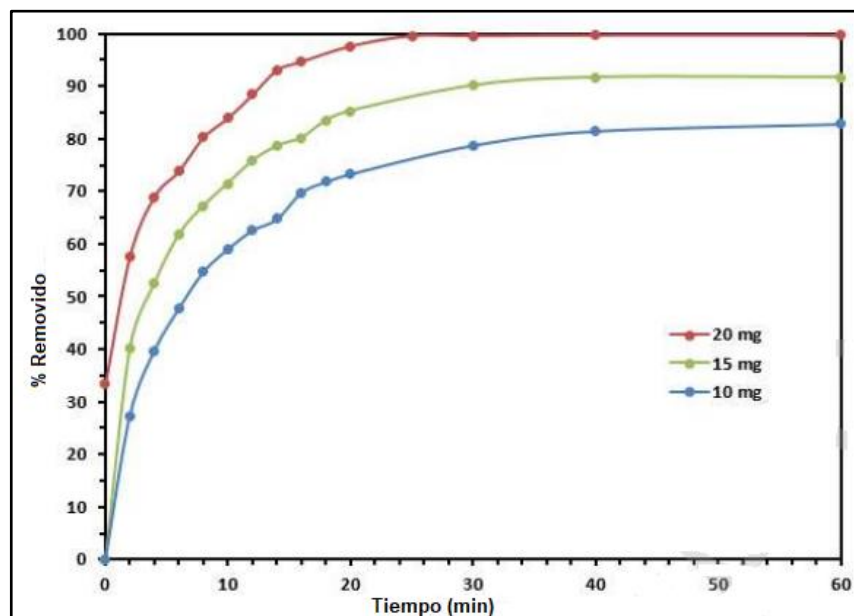


Fuente: OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020, 13 (100286). p. 14. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

¹²⁵ OSAMAH y TAWFIK. Op. Cit. p. 13.

Por otra parte, el estudio analizó el tiempo de contacto en el que ocurre la adsorción del fenol por CNT/PEG, entre 0 a 60 minutos a tres concentraciones diferentes del adsorbente, donde se evidenció que a medida que pasa el tiempo, los sitios activos de la superficie se fueron ocupando por moléculas de fenol, lo que implica una adsorción lenta de 10 a 30 minutos como se observa en la **Figura 26**, sin embargo, se evidencia que al transcurrir este lapso de tiempo, el porcentaje de remoción aumenta hasta que se mantiene constante con las tres concentraciones analizadas¹²⁶.

Figura 26. Influencia del tiempo de contacto en la adsorción con carbono.

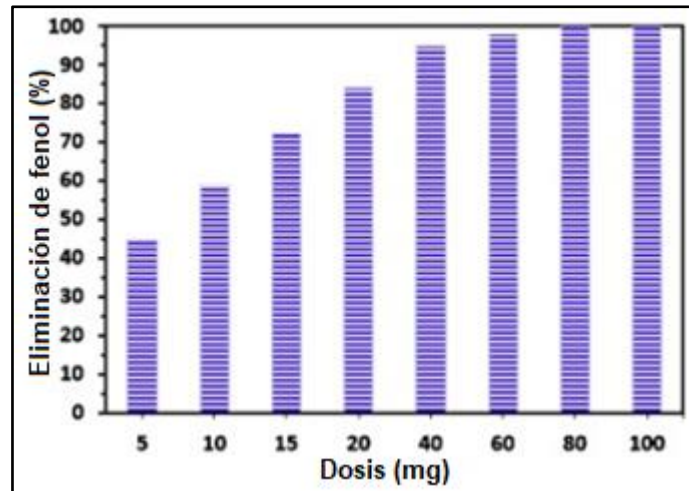


Fuente: OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020, 13 (100286). p. 14. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

Además, en relación con el efecto de la dosis de CNT/PEG, se determinó que la eliminación de fenol es mayor a medida que aumenta la dosis del adsorbente debido a que se presentan más sitios activos, tal como se evidencia en la **Figura 27**.

¹²⁶ OSAMAH y TAWFIK. *Ibid.* p. 15.

Figura 27. Efecto de la dosis del adsorbente con carbono.



Fuente: OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020, 13 (100286). p. 14. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

Teniendo en cuenta las condiciones óptimas para la ejecución del tratamiento con CNT e injertos de PEG, se determina que en términos de fiabilidad este proceso cumpliría con los requerimientos de Pharmetique Labs, puesto que es de fácil manejo y su funcionamiento es acorde a las condiciones de las aguas de vertimiento en cuanto a pH y temperatura.

3.3.4 Características del efluente. Las aguas tratadas deben cumplir con todos los requerimientos que contempla la Resolución 1207 de 2014, por lo cual es necesario tener en cuenta las modificaciones de los parámetros fisicoquímicos, identificando las variaciones mínimas que se puedan generar al momento de aplicar los tratamientos al efluente.

- **Resinas de intercambio iónico.** El tratamiento terciario empleando resinas aniónicas de base fuerte para el intercambio iónico modifica el pH puesto que este tipo de resinas operan ocupando los sitios activos de iones hidroxilo del contaminante que se desea remover, por lo cual las aguas tratadas tienden a presentar un pH básico¹²⁷, razón por la cual, se hace necesario controlar este parámetro teniendo en cuenta las resoluciones 631 de 2014 y 1207 de 2015.

¹²⁷ QUIMBAYO y DUARTE. Op Cit. p. 87.

A su vez, tal como se evidencia en la **Figura 23**, al aumentar el pH se obtienen mejores porcentajes de remoción de fenoles, teniendo en cuenta que, la adsorción para la eliminación de fenoles ocurre en un pH alcalino por presentar en su estructura iones OH⁻, donde al utilizarse resinas de intercambio iónico de base fuerte, y al trabajar con un pH inicial cercano a 9, este puede aumentar de 9 a 14; por otra parte, si el valor de pH inicial está por debajo de 8, este puede permanecer constante¹²⁸. Según lo anterior, al presentar estas modificaciones, existe la posibilidad de incumplir con los rangos permisibles por las normativas, siendo esto un factor que determina la calidad de las aguas tratadas.

Sin embargo, cabe resaltar que la empresa cuenta con un proceso de neutralización, donde se utilizan dos tipos de soluciones, la primera es realizada con soda caustica, teniendo como función contrarrestar los pH ácidos, y en la otra se utiliza ácido nítrico para manejar los pH básicos. Por ende, estas pueden ser utilizadas para tener un control del pH en caso de que se registre una variación de este parámetro en las aguas tratadas al implementar este tratamiento.

- **Oxidación avanzada.** Las características para las aguas tratadas con el proceso de ozonificación son otra parte fundamental del estudio, ya que es necesario que los parámetros que ya cumplen con la Resolución 1207 de 2014 no se vean modificados a tal punto de no cumplir con los límites. Para este caso, al momento de utilizar el O₃ como tratamiento terciario se ve modificado el pH final (**Tabla 10**).

Tabla 10. Cambio de pH al momento de aplicar el tratamiento de O₃.

pH inicial	5.5	7	8	8.5
pH final	4.91	6.04	6.98	7.20

Fuente: elaboración propia, con base en MUÑOZ, Florinella y PAREDES, Anael. Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. Revista Científica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. [en línea]. 2014, 34 (1). p. 4. [18-05-2020]. Disponible en: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/Descontaminaciondefenolesenefluente.pdf>

El parámetro pH sufre una disminución o acidificación debido a que, durante el tratamiento, la reacción directa entre el fenol y el ozono genera la formación de ácidos orgánicos¹²⁹. En consecuencia, el efluente de Pharmetique Labs S.A tiene

¹²⁸ OCHANDO.; *et al.* Op cit. p. 5.

¹²⁸SÁNCHEZ. Op. Cit. p. 13.

¹²⁹ FORERO, J.; *et al.* Ozono para tratamiento de fenol en aguas residuales industriales. CTF Cienc. Tecnol. Futuro. [en línea]. 2001, 2, (2). p.17-26. [19-05-2020]. ISSN 0122-5383. Disponible

un pH entre 6.92 – 7.56, lo que conlleva a que, si se implementa este tratamiento, es posible que este disminuya hasta un valor menor a 6 y así, supere el límite establecido para la Resolución 1207 de 2014, el cual se define entre 6 - 9¹³⁰.

- **Adsorción con carbono.** Teniendo en cuenta las condiciones de operación expuestas anteriormente para el tratamiento relacionado con nanotubos de carbono, es necesario identificar los parámetros que se ven modificados al realizar su ejecución, puesto que, para el desarrollo, los experimentos requieren de un ajuste de pH utilizando soluciones de ácido clorhídrico (HCl 0.1 M) o hidróxido de sodio (NaOH 0.1 M)¹³¹, con el fin de alcanzar una eliminación de fenoles considerable y favorecer el proceso. Ahora bien, este tratamiento se evaluó para adsorber fenoles de aguas residuales industriales con un pH inicial de 6, teniendo en cuenta que se pueden presentar variaciones en el pH entre un rango de 3 a 10 (**Figura 25**) con el fin de aumentar la eficiencia, razón por la cual, se incumpliría con las resoluciones 631 de 2015 y 1207 de 2014, las cuales indican que el pH de las aguas de vertimiento y reúso industrial, respectivamente, debe estar entre 6 a 9 (ver **ANEXO A** y **ANEXO B**) y su desarrollo no se podría llevar a cabo en la empresa Pharmetique Labs S.A.

3.3.5 Costos de construcción y operación. Para determinar la viabilidad económica se debe evaluar ciertos requerimientos relacionados al diseño, construcción, espacio disponible, mano de obra, insumos, y consumo de servicios públicos de cada uno de los tratamientos, con el objetivo de cumplir con los aspectos sugeridos por la empresa.

- **Resinas de intercambio iónico.** En temas de costos de construcción y operación, este tratamiento terciario requiere de la instalación de dos tanques de 10000 L, una unidad de filtración con una resina aniónica fuerte y un sistema de bombeo. Además, se debe tener en cuenta los costos de insumos como el regenerante, que para este caso es el NaOH al 4% realizando una solución acuosa de NaOH del 2%¹³². Cabe aclarar que la cantidad y tipo de regenerante es diferente según la resina a utilizar y se indica normalmente en la ficha técnica. En cuanto al tema de la vida útil, se espera que las resinas de intercambio duren entre 5 a 10 años; aunque es necesario regenerarlas durante este tiempo debido a que éstas sufren la pérdida de sitios activos de intercambio y se disminuye su capacidad de intercambio¹³³.

en: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832001000100002&lng=en&nrm=iso>

¹³⁰ BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. Cit. p. 7.

¹³¹ OSAMAH y TAWFIK. Op. Cit. p. 7.

¹³² VICTOR y MARTINEZ. Op. Cit. p. 6.

¹³³ RICARDO RODRÍGUEZ, Yanet Lizania. Regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico del agua de en la empresa Ernesto Che Guevara. [en línea]. Trabajo de grado

- **Oxidación avanzada.** En cuanto a los costos de construcción y operación, el tratamiento de ozonización se define como un proceso de alto costo debido a la generación de la materia prima necesaria, el ozono; adicionalmente, dentro de este proceso se requiere de un reactor que se emplea para la oxidación de los compuestos fenólicos, de un depurador de gas y finalmente de un destructor del ozono. El costo total de la implementación de un tratamiento para aguas residuales con ozono es de aproximadamente \$45.400.000. En la **Tabla 11** se muestran los costos en millones de pesos asociados a los requerimientos de equipos en el tratamiento de oxidación avanzada.

Tabla 11. Costos para el tratamiento con ozono.

Equipo	Precio	Cantidad
Generador de ozono	\$4.700.000	1
Reactor desgasificador	\$24.000.000	1
Depurador de gas	\$5.600.000	1
Destructor del ozono	\$11.100.000	1
TOTAL	\$45.400.000	-

Fuente: elaboración propia, con base en MADE IN CHINA. Todas las categorías. [Sitio WEB]. China. La entidad. [25, julio, 2020]. Disponible en: <https://es.made-in-china.com/>

Por esto, la empresa Pharmetique Labs S.A. no dispone de esta capacidad de inversión; y aunque, es un proceso de fácil automatización, es necesario contar con mano de obra adicional para su operación, la cual tampoco tiene disponible la empresa.

Además, cabe aclarar que al momento de implementar este proceso se debe tener en cuenta el aumento en servicios públicos como energía, ya que cada equipo requiere de una potencia necesaria para trabajar. Finalmente se debe tener en cuenta la vida útil del tratamiento con el fin de no generar costos adicionales en temas de mantenimiento o cambios de equipos. Este sistema con ozono tiene como pulmón su generador, el cual cuenta con una vida útil de más de 10 años sin necesidad de realizar reparaciones o cambios de equipos mientras que se maneje correctamente¹³⁴.

- **Adsorción con carbono.** Los costos de construcción y operación relacionados a la síntesis de nanotubos de carbono injertados con PEG para la eliminación de fenol de las aguas residuales, hacen referencia a los requerimientos de las materias primas y equipos para su desarrollo. Teniendo en cuenta lo anterior, los

para optar al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa: 2011. p. 22. [Consultado 02, junio, 2020]. Disponible en: shorturl.at/gnW27

¹³⁴ ESALTIA. 10 maneras de ahorrar dinero al comprar un generador de ozono comercial o industrial. [Sitio WEB]. Alicante: la entidad. p. 2. [19-05-2020]. Disponible en: <http://www.esozono.com/10-maneras-de-ahorrar-dinero-al-comprar-un-generador-de-ozono-comercial-o-industrial/>

precios en millones de pesos correspondientes a los insumos necesarios se encuentran en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Costos de equipos para la adsorción con carbono.

Insumo	Precio	Cantidad
Horno de vacío	\$25.000.000	1
Espectrómetro FT-IR Nicolet 6700	\$71.000.000	1
Microscopio electrónico de barrido (SEM JEOL JSM-6610 LV acoplado a espectroscopía de rayos X dispersiva de energía (EDX)	\$84.000.000	1
TOTAL	\$180.000.000	-

Fuente: elaboración propia, con base en MACHINESEEKER. Todas las categorías. [Sitio WEB]. Venezuela. La entidad. [19, mayo, 2020]. Disponible en: <https://www.machineseeker.com.ve/>

A partir de la información anterior, se determina que la empresa Pharmetique Labs S.A. no cuenta con la capacidad de inversión que se requiere para la compra de equipos utilizados en el tratamiento con nanotubos de carbono e injertos de PEG, razón por la cual, en términos de construcción y operación no sería una alternativa para la remoción de fenoles de las aguas de vertimiento de la PTAR; adicionalmente, se evidenciaría un aumento en el consumo de servicios públicos, puesto que estos equipos funcionan con electricidad, y para su manejo es necesario contar con personal adicional.

Por otra parte, los nanotubos de carbono se caracterizan por tener un periodo de vida útil considerable debido a sus propiedades mecánicas referentes a la resistencia, dureza, tenacidad, flexibilidad, y propiedades térmicas, relacionadas a la buena conducción de calor y estabilidad estructural a altas temperaturas¹³⁵, lo que los hace un material que a medida que pasa el tiempo, sus propiedades no se ven afectadas, siendo esto, un aspecto positivo en términos de costos, puesto que no es necesaria la renovación del insumo principal para la remoción de fenoles.

3.3.6 Disposición de residuos. Actualmente es indispensable que los procesos industriales cuenten con un manejo adecuado de los residuos, donde se tengan alternativas que sean amigables con el medio ambiente; para esto, los tratamientos deben generar una mínima cantidad de desechos, los cuales tengan un fácil manejo y no aumenten los costos de implementación.

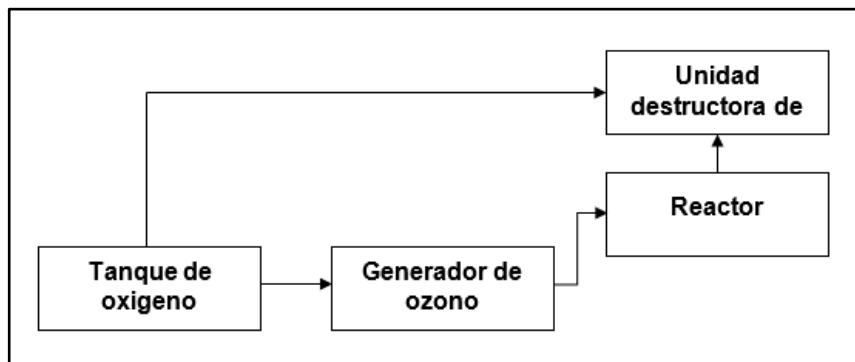
- **Resinas intercambio iónico.** Para la operación del tratamiento mediante resinas de intercambio iónico se tiene en cuenta el ciclo de trabajo que este ejecuta, en el cual, inicialmente se realiza un proceso de retro lavado que consiste en utilizar

¹³⁵ INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA. Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono. En: madrimasd. [sitio web]. Madrid: la entidad. p. 28. [19-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: shorturl.at/adkO3

agua limpia con la finalidad de eliminar los restos de partículas que se acumulan en el lecho, las cuales pueden ser vertidas al alcantarillado. Además, se realiza la regeneración de la resina, puesto que a medida que avanza la operación de este sistema, estas pierden su capacidad de intercambio, siendo necesario utilizar soluciones regeneradoras, las cuales son encargadas de remover la especie iónica de interés (sustancia contaminante). Consecutivamente, se debe realizar una etapa de enjuagado, en la que se retira el exceso de la solución regenerante empleada¹³⁶; para las dos etapas anteriores (regeneración de la resina y enjuagado), la empresa Pharmedique Labs S.A. cuenta con un servicio de recolección de residuos peligrosos, donde se puede incluir el regenerante y el enjuague que se utilice.

- **Oxidación avanzada.** Al momento de implementar el tratamiento de ozonización no se genera como tal residuos o subproductos en concentraciones importantes, solamente es necesario destruir el ozono que se utilizó durante este. Para realizar esta destrucción, se tiene primera una unidad desgasificadora por donde circula el gas que se libera después del reactor y allí, se capturan gotas de agua a través de una malla. Seguido se encuentra el equipo de destrucción del gas, en donde este se calienta y se destruye con ayuda de un catalizador, lo que acelera el proceso¹³⁷ (**Figura 28**).

Figura 28. Diagrama de flujo para el proceso de destrucción del ozono.



Fuente: elaboración propia, con base en MONGE BES, Sarai; *et al.* Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados a tratamientos de aguas residuales industriales. En: Cyted: Ciencia y tecnología para el desarrollo. [sitio web]. Asociación de países Iberoamericanos: la entidad. p. 10. [18-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

¹³⁶ SÁNCHEZ. Op. Cit. p. 10.

¹³⁷ MONGE BES. Op. Cit. p. 15.

Según lo anterior, trabajar con este tratamiento terciario en la empresa no es viable debido a que la destrucción del ozono residual genera costos adicionales al momento de adquirir los equipos y que la empresa no puede cubrir.

- **Adsorción con carbono.** La adsorción con CNT requiere un proceso de purificación debido a que esta materia prima contiene impurezas relacionadas a residuos carbonosos o partículas de grafito que alteran sus propiedades y esto causa que el proceso no tenga la eficiencia requerida¹³⁸. Para lo anterior, se hace necesario emplear un método de purificación para retirar las impurezas presentes en los CNT, generando desechos que pueden aumentar los costos de inversión. El **Cuadro 12** especifica los métodos de purificación más empleados, los cuales se clasifican en dos: químicos y físicos.

Cuadro 12. Métodos para la purificación de CNT.

Métodos químicos	Métodos físicos
Oxidación en fase gas (una mezcla de aire, O ₂ , Cl ₂ , H ₂ O, HCl)	Filtración
Oxidación en fase líquida (tratamiento ácido con HNO ₃ , HCl, KMnO ₄)	Centrifugación
Oxidación electroquímica	Cromatografía

Fuente: elaboración propia, con base en ÁLVAREZ MÉNDES, Jennifer. Nanotubos de carbono. Empleo como material adsorbente para la determinación de metales. [en línea]. Trabajo de grado para optar al grado de Doctora en Química. Universidad de Santiago de Compostela, Lugo: 2015. p. 22-23. [Consultado 19, mayo, 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=132103>

Los métodos que se requieren para la purificación de los CNT requieren equipos con los que actualmente no cuenta Pharmetique Labs, por lo cual, llevar a cabo este proceso dentro de las instalaciones de la empresa generaría espacio para su ubicación y desarrollo, aumento en los costos y personal adicional para su funcionamiento, adicionando gastos de mantenimiento.

3.4 TRATAMIENTO SELECCIONADO

A partir de los criterios analizados para los tratamientos en la *Matriz de Pugh*, se concluye que los fenoles presentes en las aguas residuales se pueden remover con dos tipos de procesos, los no destructivos, que permiten la recuperación y a su vez la reutilización de los fenoles, como lo es la adsorción con carbono, y los

¹³⁸ ÁLVAREZ MÉNDES, Jennifer. Nanotubos de carbono. Empleo como material adsorbente para la determinación de metales. [en línea]. Trabajo de grado para optar al grado de Doctora en Química. Universidad de Santiago de Compostela, Lugo: 2015. p. 21. [Consultado 19, mayo, 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=132103>

destructivos, donde los fenoles son transformados mediante técnicas como oxidación biológica, avanzada o electroquímica¹³⁹.

Teniendo en cuenta lo anterior, el tratamiento seleccionado fue resinas de intercambio iónico puesto que tiene una capacidad de remoción del 99.96% utilizando una resina tipo aniónica fuerte alcanzando así concentraciones menores al 0.002 mg/L; esto hace que sea viable debido a que la empresa cuenta con la disponibilidad de espacio y capacidad de inversión para el lecho fijo, el cual requiere de una altura mínima de 0.75 m y los dos tanques de almacenamientos. Además, la selección de este se debe a que las aguas pretratadas en la PTAR tienen las condiciones de temperatura y pH óptimas, con 20.3 – 23.6 °C y 6.92 – 7.56 respectivamente para aplicarlo y no afectar la remoción deseada.

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las características del efluente y los costos de construcción y operación, donde como se menciona anteriormente aunque el pH pueda variar, su control se puede realizar adicionando un solución de tipo ácida o básica según sea necesario; cabe aclarar, que la empresa ya cuenta con estas soluciones por lo que no se generaría un costo adicional al tratamiento, solamente se debe tener en cuenta los costos de instalación de la columna de intercambio iónico, la resina y los tanques, además de los insumos necesarios como el regenerante.

De esta forma, es importante mencionar que la vida útil de este sistema se considera entre 5 y 10 años ya que cuenta con una facilidad de regeneración y que se evaluó la disposición de los residuos que este genera durante la regeneración de la resina y enjuagado, los cuales se consideran como peligrosos debido a su alta concentración de regenerante (NaOH) y necesitan de una disposición diferente; pero cabe señalar que la empresa ya cuenta con un servicio para este tipo de residuos, por lo tanto no se genera otro costo.

Por otra parte, el método de adsorción empleando nanotubos de carbono e injertados con PEG, alcanza un porcentaje de remoción del 97%, empleando los siguientes equipos para la experimentación: condensador de reflujo equipado, horno de vacío, un espectrómetro y un microscopio electrónico de barrido acoplado a espectroscopía de rayos X, teniendo en cuenta que actualmente Pharmetique Labs S.A. no cuenta con los equipos mencionados. Igualmente, al momento de analizar la oxidación avanzada con ozono se obtiene una remoción de fenoles entre 99.63% y 99.96% con un rango de pH entre 5.5 y 7, lo que lo significa que al aplicarlo se puede obtener una concentración final de 0.002 mg/L pero no es viable debido a que es necesario tener espacio disponible para realizar la instalación de un sistema de ozonificación el cual cuenta con un tanque de homogenización, uno de pre-

¹³⁹ MEJÍA MORALES, Dalila. Sorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec: 2004. p. 9-10. [Consultado 22, mayo, 2020]. Disponible en: shorturl.at/vDFZ3

ozonización, un reactor o tanque de ozonización y un destructor del ozono residual; pero también es necesario tener una capacidad de inversión para instalar la unidad de generación de ozono la cual cuenta con un tanque de depósito de oxígeno, un generador y un refrigerador.

Ahora bien, el proceso de adsorción opera a temperatura ambiente (298 K), en un rango de pH óptimo entre 3 y 10, un tiempo de contacto de 0 a 60 min, y una dosis de CNT/PEG entre 5 mg a 10 mg. A su vez, las condiciones óptimas para implementar el tratamiento de oxidación con ozono son la temperatura, la cual debe estar entre 20 – 40°C, teniendo una entre 20.3 – 23.6 °C y un pH entre 5.5 y 7, teniéndolo entre 6.92 – 7.56.

En cuanto a las características del efluente, la adsorción con CNT/PEG presenta variaciones en el pH entre 3 a 10, debido a que busca aumentar la eficiencia de la remoción de fenoles en las aguas industriales, limitando las condiciones de operación de la PTAR de la empresa, puesto que se debe trabajar en un pH entre 6 a 9, según las resoluciones 631 de 2015 y 1207 de 2014. Así mismo al evaluar la ozonificación el pH sufre una disminución debido a la reacción directa entre el fenol y ozono, lo que conllevaría en tal caso a modificar el pH actual y así superar el límite permitido por las resoluciones mencionadas anteriormente.

Por otra parte, el proceso de adsorción mediante CNT/PEG requiere un sistema de purificación debido a que los nanotubos de carbono contienen impurezas que deben ser removidas para mayor eficiencia de remoción, generando residuos carbonosos o partículas de grafito. Considerando también la disposición de residuos para la oxidación avanzada con ozono es necesario instalar un destructor de ozono para lo cual la empresa no cuenta con el capital. Cabe aclarar, que los dos tratamientos se caracterizan por tener un periodo de vida útil de aproximadamente 10 años, antes de tener que realizar un mantenimiento.

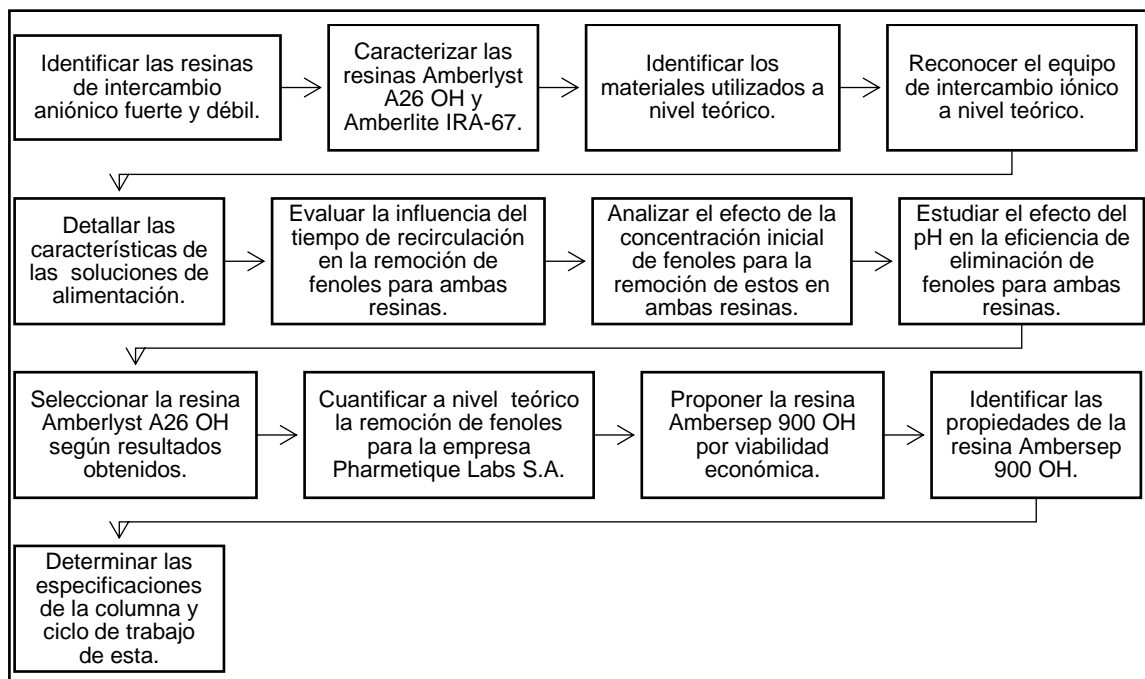
En consecuencia, los dos tratamientos referentes a oxidación avanzada y adsorción con carbono no son viables debido a las condiciones ya expuestas, adicionando los costos de construcción y operación los cuales hacen referencia a los equipos para la ejecución del tratamiento de adsorción con carbono, teniendo en cuenta que se requieren aproximadamente 180 millones de pesos de inversión. Del mismo modo para los costos del tratamiento de oxidación avanzada son necesarios \$45.400.000 aproximadamente. Cabe señalar que el tratamiento seleccionado referente a resinas de intercambio iónico se estudia en el siguiente capítulo, titulado como verificación del tratamiento.

4. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO

Actualmente, la remoción de fenoles de las aguas industriales se ha convertido en un aspecto de importancia debido a su alta toxicidad, causando afectaciones en el ambiente y en la salud de los seres vivos. A partir de la selección del tratamiento se determina que el método que cumple con los requerimientos de la empresa Pharmetique Labs S.A. hace referencia a las resinas de intercambio iónico, para lo cual, en este capítulo se realiza un análisis a nivel teórico con la finalidad de evaluar la eliminación de los fenoles de las aguas previamente tratadas por la PTAR empleando resinas poliméricas, donde se tiene en cuenta la variación de las concentraciones iniciales de fenol para determinar la eficiencia del tratamiento.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que representa el procedimiento para la evaluación del tratamiento:

Figura 29. Diagrama de flujo para la evaluación del tratamiento.



Fuente: elaboración propia.

4.1 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

En esta sección se estudia el comportamiento de las dos resinas utilizadas en el artículo titulado *“Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: kinetics and equilibrium studies”*, las cuales son: una resina de intercambio aniónico de base fuerte (Amberlyst A26 OH), y una resina de intercambio aniónica

de base débil (Amberlite IRA-67), siendo estas utilizadas para la remoción de fenoles de una solución acuosa.

4.1.1 Resina Amberlyst A26 OH. Es una resina fuertemente básica, siendo utilizada en medios acuosos para eliminar soluciones que contengan fenol. Su estructura porosa le facilita ser un buen catalizador polimérico en medios tanto acuosos como no acuosos, debido a que no presenta limitaciones en cuanto al pH. Adicionalmente, la distribución del tamaño del poro es particularmente grande, lo cual le proporciona una resistencia superior al choque mecánico, teniendo en cuenta que su fuerte basicidad permite la eliminación de moléculas orgánicas solubles aun así sean de gran tamaño¹⁴⁰. En el **ANEXO D** se encuentra la ficha técnica correspondiente a esta resina, donde se establecen las especificaciones de su operación.

4.1.2 Resina Amberlite IRA-67. La Amberlite IRA-67 es una resina de tipo aniónica débil la cual tiene como grupo de intercambio el amino, el cual es de base débil y por esto no se disocia correctamente en soluciones alcalinas¹⁴¹. La resina aniónica débil se utiliza para eliminar los ácidos minerales y compuestos orgánicos debido a que tiene una estabilidad física y capacidad alta, pero con una reacción cinética lenta¹⁴².

Estas operan en un pH inferior a 6, debido a que al trabajar con pH altos se presenta oxidación, afectando directamente el proceso de activación de la resina. Sin embargo, este tipo de resinas presentan mayor capacidad en comparación a la resina aniónica fuerte, donde resisten el ensuciamiento orgánico¹⁴³. En el **ANEXO E** se evidencia la ficha técnica de esta resina.

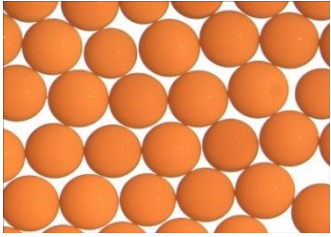
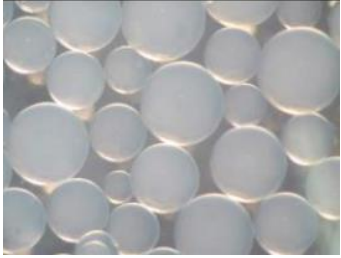
¹⁴⁰LEENTECH. Amberlyst A26 OH. En: Dow Chemical Company. [sitio web]. Países Bajos: la entidad. p. 2. [03-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Amberlyst-A26-L.pdf>

¹⁴¹ RÍOS CARREÑO, Laura Camila. Extracción con una resina de intercambio iónico de los ácidos carboxílicos producidos en el proceso Mixalco. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2018. p. 21. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: shorturl.at/sIJUZ

¹⁴² GARCÍA ICEDO, Ramona. Reducción de cloruros y dureza mediante intercambio iónico, en agua del pozo No .1Bis de Navojoa, Sonora. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad de Sonora, Sonora. p. 6. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>

¹⁴³ INVESTIGACIÓN. Op. Cit. p. 5.

Cuadro 13. Propiedades las resinas.

Propiedades	Amberlyst A26 OH	Amberlite IRA-76
Figura		
Tipo	Aniónica fuertemente básica	Aniónica débil básica
Grupo funcional	Amonio cuaternario	Amina terciaria
Capacidad de intercambio	0.80	1.60
Densidad (g/L)	675	750
Tamaño de partícula (mm)	0.56 a 0.70	0.50 a 0.75
Rango de pH efectivo	0-14	0-7
Temperatura máxima de operación (°C)	60	60

Fuente: elaboración propia, con base en VICTOR, María; OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 4. [Consultado 03, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

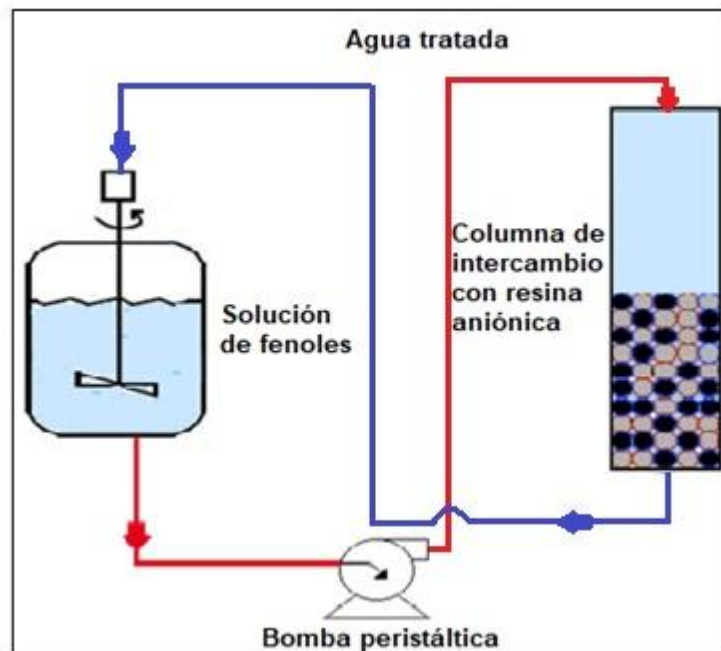
4.2 MATERIALES

Durante la experimentación se utilizaron algunos insumos a parte de las resinas explicadas anteriormente como reactivos de grado analítico y productos químicos con pureza superior al 99%. Las soluciones contaminadas con fenol se preparan en agua doblemente destilada al igual que las soluciones de regenerante con NaOH¹⁴⁴.

¹⁴⁴ VICTOR y MARTINEZ Op. Cit. p. 3.

4.2.1 Equipo de intercambio iónico. Para el desarrollo del experimento, se utiliza una bomba peristáltica, la cual, permite bombear fluidos limpios y residuales mediante un tubo o manguera flexible¹⁴⁵; y una columna hecha con un tubo acrílico de 54 cm de altura por 4.6 cm de diámetro interno, donde se encuentra la resina de intercambio, empleando una rejilla de retención móvil, que también puede ser fija con la finalidad de tener dos opciones de lecho, bien sea fijo o semi-fluidizado¹⁴⁶. La **Figura 30** representa el diagrama de flujo que se lleva a cabo para el desarrollo del experimento, en el que se emplea un sistema de recirculación entre las aguas que contienen fenol con las aguas tratadas a partir de intercambio iónico, para favorecer el tiempo de contacto y así determinar el efecto que esto tiene en cuanto al porcentaje de remoción que se alcanza.

Figura 30. Diagrama de flujo del experimento.



Fuente: elaboración propia, con base en VICTOR, María; OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 5. [Consultado 03, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

¹⁴⁵ ES EL AGUA. Características de las bombas peristálticas y apartado especial para conocer los dúplex. [sitio WEB]. España: la entidad. [03, junio, 2020]. Disponible en: shorturl.at/jvBT1

¹⁴⁶ VICTOR y MARTINEZ Op. Cit. p. 4.

4.3 ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

En el desarrollo experimental se evalúa la adsorción de fenol empleando una recirculación en el proceso, teniendo en cuenta los flujos de alimentación del contaminante para determinar el rendimiento de cada una de las resinas estudiadas. Se realizan las isotermas de adsorción para diferentes concentraciones iniciales de fenol entre 1 mg/L y 200 mg/L con 7 g/L de resina, la cual permanece constante y un volumen de 2 L por cada solución¹⁴⁷.

Las soluciones de alimentación se trabajan con agitación constante, con el fin de mantener homogéneas las mezclas y evitar la sedimentación; con un caudal de 10 L/h, una temperatura ambiente (298 K) y un tiempo de recirculación de 1 hora para garantizar que se llegue al equilibrio¹⁴⁸.

La eficiencia de remoción se determina con la medición de la sorción siguiendo la **Ecuación 3**, donde C_o es la concentración inicial de fenoles (mg/L) y C_e la concentración en el equilibrio (mg/L)¹⁴⁹.

Ecuación 3. Eficiencia de remoción de fenoles.

$$\% \text{ sorción de fenoles} = \frac{C_o - C_e}{C_e} * 100$$

Fuente: VICTOR, María, OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 5. [Consultado 03, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

¹⁴⁷ VICTOR y MARTINEZ. Op. Cit. p. 6.

¹⁴⁸ Ibid. VICTOR y MARTINEZ. p. 6.

¹⁴⁹ Ibid. VICTOR y MARTINEZ. p. 6.

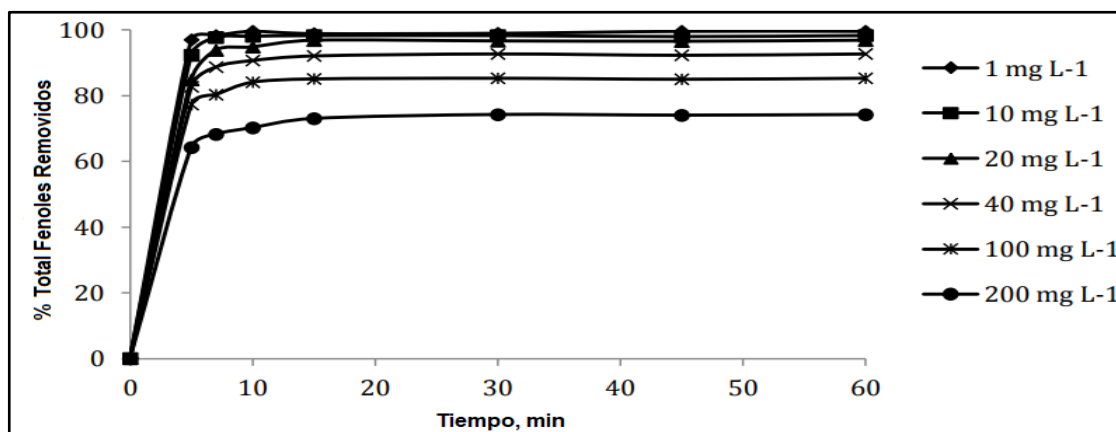
4.3.1 Procedimiento. Para el desarrollo del experimento, los fenoles totales y los derivados de fenol se hacen reaccionar con tiazol para tener una identificación de estos mediante un color característico, el cual se determina empleando un método fotométrico con un Espectrofotómetro Gamma UV-visible, teniendo un color morado. Adicionalmente, es necesario lavar las resinas de intercambio con agua doblemente destilada, teniendo en cuenta que las resinas de base fuerte y de base débil deben tener una regeneración empleando soluciones acuosas de NaOH al 4% y al 2%, respectivamente. Consecutivamente, las resinas deben tener nuevamente un lavado con agua doblemente destilada para eliminar el exceso de la base adicionada¹⁵⁰.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN EL ARTÍCULO DE ESTUDIO

El efecto del tiempo de recirculación junto con la concentración inicial se evalúa para determinar el comportamiento de las resinas Amberlyts A26 OH y Ambelite IRA-67, que se utilizan en la eliminación de fenoles en soluciones acuosas preparadas. Del mismo modo, se identifica el porcentaje de remoción que el experimento alcanza con las condiciones de operación que se especifican en esta sección.

4.4.1 Efecto del tiempo de recirculación. La influencia del tiempo de recirculación en la remoción de fenoles a las diferentes concentraciones se puede evidenciar en la **Figura 31** para la resina Amberlyts A26 y en la **Figura 32** la Amberlite IRA-67.

Figura 31. Efecto de la recirculación para la resina Amberlyts A26.

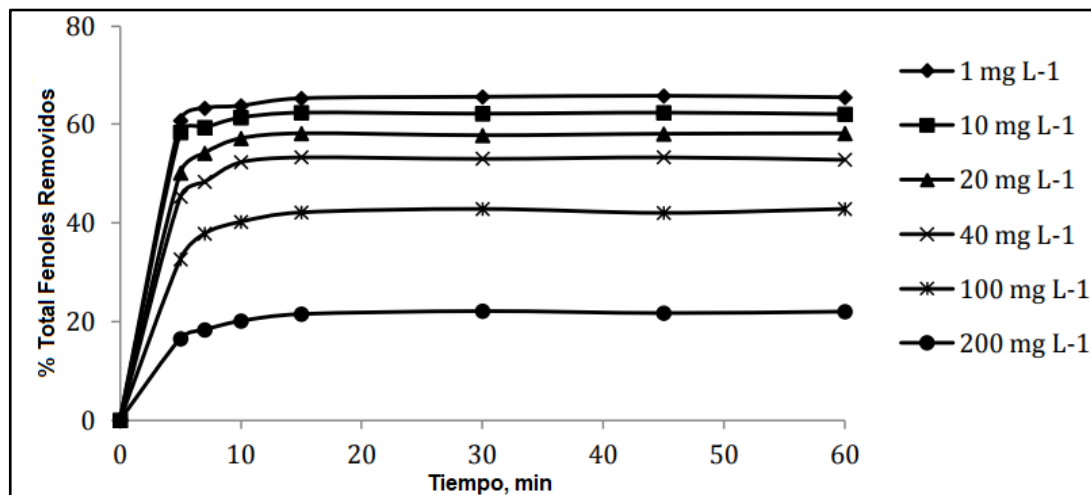


Fuente: VICTOR, María; OCHANDO; Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 8. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

¹⁵⁰ Ibid. VICTOR y MARTINEZ. p. 6.

Para la resina Amberlyts A26 se puede determinar que se llega al equilibrio en el minuto 7 aproximadamente para las concentraciones de 1, 10 y 20 mg/L, lo que quiere decir que en este punto se obtiene la remoción máxima de fenoles y que después de este permanecerá constante o con cambios poco significativos en términos de eliminación. Para el caso de las concentraciones entre 20 mg/L y 200 mg/L se obtiene el equilibrio pasado el minuto 16, donde se da la máxima remoción.

Figura 32. Efecto de la recirculación para la resina Amberlite IRA-67.



Fuente: VICTOR, María; OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 9. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

Por otra parte, para la resina Amberlite IRA-67 se alcanza el equilibrio a un tiempo de recirculación de aproximadamente 15 minutos. Cabe mencionar que el tamaño de partícula afecta directamente a la velocidad con la que se alcanza el equilibrio, es decir que entre más uniforme sea el tamaño de la partícula, menor rango para esta, la velocidad será menor¹⁵¹. Para este caso, como se puede observar en el **Cuadro 12**, la resina Amberlyst A26 OH tiene un menor rango de tamaño de partícula comparada con la Amberlite IRA-67.

Otro aspecto que afecta la velocidad para alcanzar este equilibrio tiene que ver con la capacidad de ocupar los sitios activos, lugar donde se lleva a cabo el intercambio iónico; ya que para resinas más homogéneas o finas esta capacidad alcanza el

¹⁵¹ KANHERE, S; *et al.* Studies with Ion-exchange Resins on Cinchona Alkaloids III: Exchange Rates. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. [en línea]. 1969, 58. (12). p. 2. [Consultado 03, junio, 2016]. ISSN.0022-3549. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jps.2600581232>

equilibrio a mayor velocidad¹⁵². Es importante tener en cuenta que, debido al rango de operación de pH, el cual es de 0 a 14, se permite una mejor activación de la resina Amberlyst A26 OH para realizar un intercambio iónico óptimo.

En las figuras anteriores, tanto para la resina Amberlyst A26 OH como la Amberlite IRA-67 se evidencia que la eficiencia de eliminación de fenoles aumenta a medida que el tiempo de recirculación lo hace, debido a que el contacto es mayor entre la resina y las soluciones; pero además se mejora la humectación del medio y así se favorece esta remoción¹⁵³.

4.4.2 Efecto de la concentración inicial. Para el desarrollo de los experimentos, la concentración de los fenoles varía en un rango entre 1 y 200 mg/L, teniendo una dosis constante de cada una de las resinas de 7 g/L. De esta forma, en la **Figura 33** se evidencia que la remoción de fenoles está directamente relacionada con la concentración inicial del contaminante, donde, para un 1 mg/L y 200 mg/L de fenol se alcanza una eliminación del 99.6% y del 74.2%, respectivamente, utilizando la resina de intercambio aniónico Amberlyst A26 OH.

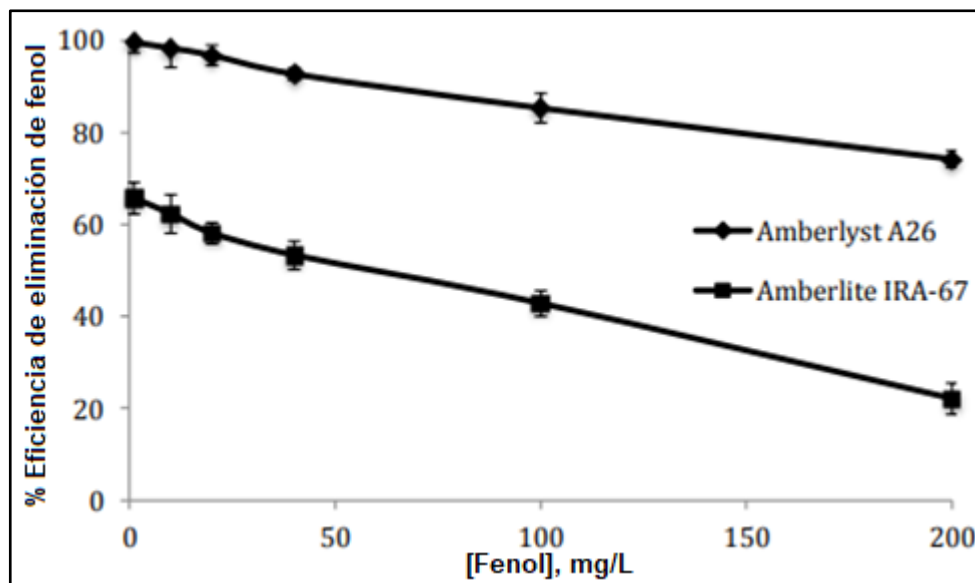
Por otra parte, utilizando la resina de intercambio aniónico de base débil Amberlite IRA-67 se observa que con una concentración inicial de fenoles de 1 mg/L y 200 mg/L se tiene una remoción del contaminante de 65.7% y de 22.1%, respectivamente. Lo anterior se presenta debido a que esta resina está activa en un rango de pH entre 0 y 7, por lo cual, tiene menor rango de operación para realizar el intercambio con los fenoles. Ahora bien, la disociación de estos contaminantes se considera como una función directa entre su concentración y el pH de la solución líquida, el cual debe ser mayor a 8 (pH alcalino) para llevar a cabo este proceso, puesto que en un pH ácido la disociación del fenol es baja¹⁵⁴.

¹⁵² DARDEL. Propiedades de las resinas intercambiadoras de iones. [Sitio WEB]. Francia: Francois de Dardel. [3, junio, 2020]. Disponible en: http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html

¹⁵³ HENRY, Glynn y HEINKE, Gary. Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. 2 ed. México: Prentice Hall, 1999. 410 p. ISBN: 970-17-0.66-2.

¹⁵⁴ VICTOR y MARTINEZ. Op. Cit. p. 9.

Figura 33. Efecto de la concentración inicial.



Fuente: VICTOR, María; OCHANDO Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. p. 9. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

Del mismo modo, se debe tener en cuenta el efecto del pH (**Figura 23**) en la corriente de salida, ya que es directamente proporcional a la eficiencia, es decir, si se aumenta el pH, la eficiencia de eliminación aumenta para cada concentración inicial, debido a que los iones OH^- son reemplazados por hidróxido que contiene el compuesto fenólico, teniendo en cuenta que el porcentaje de remoción se ve afectado por la saturación de la resina¹⁵⁵.

Por lo anterior, la resina seleccionada es la aniónica de base fuerte Amberlyst A26 OH por presentar un rango de operación de pH de 0 a 14, lo cual facilita la disociación de los fenoles mediante el intercambio iónico, teniendo en cuenta que, esta resina se caracteriza por presentar un menor rango en el tamaño de partícula (0.56 a 0.70 mm), lo que la hace tener una superficie más homogénea, facilitando su activación y así el alcance del equilibrio en un tiempo de recirculación de 7 minutos para concentraciones menores a 1 mg/L, logrando una eliminación del 99.96%. Así, al compararlo con el comportamiento de la resina de intercambio aniónico de base débil Amberlite IRA-67 se identifica que presenta un pH de activación de 0 a 7, lo que limita las condiciones de operación para remover contaminantes de soluciones acuosas como los fenoles, teniendo en cuenta que, esta alcanza el equilibrio en un tiempo de recirculación de 15 minutos para concentraciones menores a 1 mg/L, donde se logra una remoción del 65.7%,

¹⁵⁵ Ibid. VICTOR y MARTINEZ. p. 9.

además el rango del tamaño de partícula es más amplio (0.50 a 0.75 mm), razón por la cual, puede tardar más en alcanzar el equilibrio.

4.5 CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE REMOCIÓN DE FENOLES

La cuantificación teórica referente a la remoción de fenoles para las aguas pretratadas de Pharmetique Labs S.A. se realiza mediante la **Ecuación 4** la cual, permite determinar la concentración final que se puede alcanzar aplicando el tratamiento de intercambio iónico, donde se emplea la resina aniónica de base fuerte Amberlyst A26 OH. Asimismo, se debe tener en cuenta que el porcentaje de remoción que se utiliza se basa en el experimento expuesto en este capítulo. Por otra parte, la concentración inicial de fenoles de la PTAR tiene un valor de 0.32 mg/L (ver **ANEXO C**), tal como se identifica en el diagnóstico del presente proyecto.

Ecuación 4. Porcentaje de remoción de fenoles.

$$\% \text{ remoción} = \frac{[\text{fenoles}]_{\text{afluente}} - [\text{fenoles}]_{\text{efluente}}}{[\text{fenoles}]_{\text{afluente}}} * 100\%$$

Fuente: MEJÍA LÓPEZ, Ana; CABRERA, Mario y CARRILLO, Yurina. Remoción de Contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala laboratorio. La Granja. [en línea]. 2017, 26 (2). p. 79. [Consultado 05, junio, 2020]. e-ISSN 1390-8596. Disponible en: <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/26.2017.07>

Al momento de determinar esta concentración final de fenoles teórica, se tiene en cuenta el porcentaje de remoción alcanzado por la resina Amberlyst A26 OH el cual fue de 99.96%, analizado anteriormente. Cabe aclarar que este porcentaje de eliminación se ve influenciado por la concentración inicial de fenoles, donde a menor concentración la remoción es más efectiva.

$$[\text{fenoles}]_{\text{efluente}} = 0.32 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - \left(\frac{99.96\% * 0.32 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{100\%} \right) = 0.000128 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Según los resultados mostrados anteriormente, la concentración final de fenoles que se esperara obtener al aplicar el intercambio iónico con la resina ya mencionada es de 0.000128 mg/L, la cual cumple con la Resolución 1207 de 2014, donde se exige una concentración máxima de 0.002 mg/L; y así, se puede dar un reusó industrial a estas.

4.6 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Al momento de realizar la descripción de la propuesta se tiene en cuenta las especificaciones de la columna, donde se determina el tipo de proceso para la columna de intercambio y la configuración del sistema de regeneración. Seguido de esto, es importante determinar el tipo de resina a utilizar, teniendo en cuenta que, después del estudio analizado, se debe utilizar una resina de intercambio aniónico de base fuerte para la remoción de fenoles, la cual puede ser la Amberlyst A26 OH.

No obstante, para mantener una viabilidad económica se propone implementar la resina Ambersep 900 OH, la cual tiene las condiciones de operación y propiedades similares a la analizada, como si indica en el **Cuadro 14** según la información tomada de la ficha técnica (ver **ANEXO F**), lo que permite conservar el porcentaje de remoción requerido. Por esta razón, en el presente capítulo se determinan los parámetros de diseño de la columna y los costos referentes a la propuesta planteada.

Cuadro 14. Comparación Amberlyst A26 OH con Ambersep 900 OH.

Propiedades	Amberlyst A26 OH	Ambersep 900 OH
Grupo funcional	Amonio cuaternario	Amonio cuaternario
Matriz	Estireno-divinilbenceno	Estireno-divinilbenceno
Capacidad de intercambio	0.80	0.80
Densidad (g/L)	675	675
Tamaño de partícula (mm)	0.56 a 0.70	0.56 a 0.70
Rango de pH efectivo	0-14	0-14
Temperatura máxima de operación (°C)	60	60

Fuente: elaboración propia, con base en fichas técnicas.

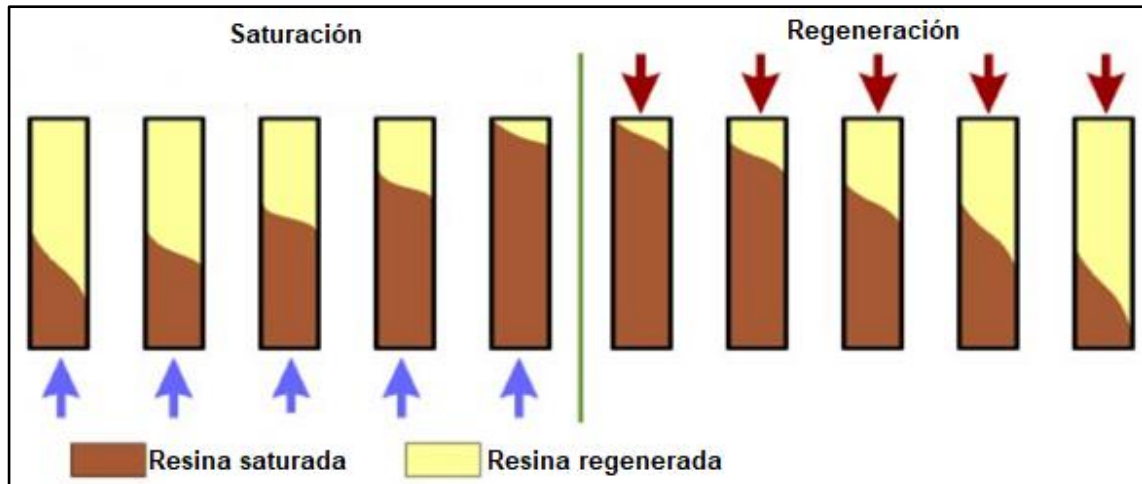
4.6.1 Especificaciones de la columna. El proceso de intercambio iónico que se utiliza es semi continuo, debido a que este produce un alto grado de dilución de los iones; ya que la etapa de operación se alterna con la de regeneración y así se mantiene la eficiencia de la resina aniónica. Además, se define el lecho de tipo fijo para la columna ya que la operación se realizará con un solo tipo de resina, entonces se puede definir como un lecho fijo de estilo unitario¹⁵⁶.

Seguido de esto es importante determinar la configuración de la regeneración para la columna de intercambio, el cual puede ser en co-corriente, donde las aguas contaminadas pasan de arriba abajo y la solución de regenerante lo hace en la misma dirección o en contra corriente donde la solución de regenerante pasa en

¹⁵⁶ SÁNCHEZ RUIZ. Op. Cit. p.11-12.

dirección contraria a la del fluido contaminado¹⁵⁷. El método de contra corriente tiene algunas ventajas sobre el de co-corriente, ya que se obtiene mejor calidad del agua tratada debido a que la fuga iónica es más pequeña y se necesita menos cantidad de regenerante. Por esto, para este caso se selecciona un sistema de regeneración en contra corriente, donde el agotamiento se da de abajo para arriba y la regeneración de manera contraria, lo cual se evidencia en la **Figura 34**.

Figura 34. Configuración del sistema de regeneración en contra corriente.



Fuente: DARDEL. Propiedades de las resinas intercambiadoras de iones. [Sitio WEB]. Francia: Francois de Dardel. [10, junio, 2020]. Disponible en: http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html

En definitiva, se propone utilizar una columna semi continua de lecho fijo con un sistema de regeneración en contra corriente, ya que estas condiciones son aptas para las aguas tratadas de Pharmetiques Labs S.A como se explicó anteriormente.

4.6.2 Parámetros de diseño de la columna. Las condiciones de diseño del equipo de intercambio dependen directamente de la resina que se utiliza, siendo en este caso, la Ambersep 900 OH, la cual cuenta con un rango de 1 a 3 gpm/ft³, lo que equivale a un rango de 8 a 24 BV/ h respectivamente para la Tasa de Flujo de Servicio (SFR) (**ANEXO D**) tal como se especifica en la ficha técnica de esta; teniendo en cuenta que la unidad de BV representa el volumen del lecho, como se define en la **Figura 35**.

¹⁵⁷ DARDEL. Op. Cit.

Figura 35. Definición de BV.

$$1 \text{ BV} \rightarrow \frac{1 \text{ m}^3 \text{ solución a tratar}}{1 \text{ m}^3 \text{ resina}}$$

Fuente: elaboración propia, con base en SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 69. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Según lo anterior, se realiza el dimensionamiento de la columna de lecho fijo, como se muestra a continuación:

4.6.2.1 Volumen de la resina. El volumen de la resina se calcula a partir del SFR, tomando un valor de 24 BV/h, por recomendación del proveedor. De esta forma, se utiliza la **Ecuación 5** para determinar el volumen que ocupa la resina dentro de la columna de intercambio iónico de lecho fijo, teniendo en cuenta que el caudal de vertimiento que tiene la PTAR es de 2.8 m³/h.

Ecuación 5. SFR.

$$SFR = \frac{Q_V}{V_R}$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 56. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

Q_V : Caudal de vertimiento

V_R : Volumen de la resina.

A partir de lo anterior, se determina el volumen de la resina tal como se muestra a continuación:

$$V_R = \frac{Q_V}{SFR} = \frac{2.8 \frac{m^3_{solución}}{h}}{24 \frac{m^3_{solución}}{m^3_{resina}h}} = 0.1167 m^3_{resina} \approx 117 L$$

Así, el volumen de resina Ambersep 900 OH necesaria para el tratamiento terciario de las aguas tratadas de Pharmetique Labs S.A. es de 117 L.

Ahora bien, se realiza el mismo procedimiento para conocer la cantidad de resina necesaria de Amberlyst A26 OH, partiendo del valor del SFR, el cual está en un rango de 1 a 4 BV/ h tal como se indica en la ficha técnica (ver **ANEXO D**). Por recomendación del proveedor, se trabaja con 4 BV/h.

$$V_R = \frac{Q_V}{SFR} = \frac{2.8 \frac{m^3_{solución}}{h}}{4 \frac{m^3_{solución}}{m^3_{resina}h}} = 0.7 m^3_{resina} \approx 700 L$$

A partir de lo anterior, se propone utilizar la resina de intercambio aniónica de base fuerte Ambersep 900 OH, la cual es rentable económicamente y de fácil adquisición, teniendo en cuenta que al momento de utilizar esta se necesitan 117 L/año; en cambio, al utilizar la resina Amberlyst A26 OH se necesitan 700 L/año. A su vez, la relación entre cantidad de volumen de resina y los costos asociados a esta, son directamente proporcionales, por lo cual, la resina propuesta es viable en cuanto a la inversión necesaria para llevar a cabo el tratamiento seleccionado.

4.6.2.2 Altura de la resina activa. Para determinar la altura de la resina se tiene en cuenta el diámetro de la columna, el cual es de 0.4 m, siendo este valor viable al compararlo con el valor de referencia para el diámetro máximo de una columna de intercambio, el cual es de 3.5 m¹⁵⁸, adicionalmente, este diámetro cumple con el espacio disponible de la PTAR. De esta forma, se emplea la **Ecuación 6** para realizar el respectivo cálculo.

¹⁵⁸ SANCHEZ. Op. Cit. p. 15

Ecuación 6. Altura del lecho o resina empacada.

$$H = \frac{V_R}{A_f} = \frac{V_R}{\frac{\pi * Dc^2}{4}}$$

Fuente: CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 179. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

H : Altura del lecho o resina empacada.

V_R : Volumen de la resina utilizada.

A_f : Área de flujo dentro de la columna.

Dc : Diámetro de la columna.

Según lo anterior, la altura de la resina activa o la altura del lecho se determina a continuación.

$$H = \frac{0.1167 \text{ m}^3}{\frac{\pi * (0.4 \text{ m})^2}{4}} = 0.9287 \text{ m}$$

Posteriormente, es necesario considerar el porcentaje de expansión que puede tener la resina Ambersep 900 OH en la operación del tratamiento, el cual tiene una variación en el volumen del 30% aproximadamente, tomando este valor de la figura 2 expuesta en la ficha técnica (**ANEXO F**). Para lo cual, en la altura de la resina, se debe tener en cuenta este porcentaje de expansión como se muestra en la **Ecuación 7**.

Ecuación 7. Variación en la altura de la resina expandida.

$$E_x = H \times 0.30$$

Fuente: elaboración propia, con base en CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 179. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

H : Altura del lecho o resina empacada.

E_X : Variación de la resina expandida.

La variación de la resina activa teniendo en cuenta el porcentaje de expansión es:

$$E_X = 0.9287 \text{ m} \times 0.30 = 0.2786 \text{ m}$$

Así, la altura de la resina considerando la variación en el volumen se calcula mediante la **Ecuación 8**.

Ecuación 8. Altura de la resina expandida.

$$H_e = H + E_X$$

Fuente: CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 179. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

H_e : Altura de la resina expandida.

H : Altura del lecho o resina empacada.

E_X : Variación de la resina extendida.

Teniendo en cuenta lo anterior la altura de la resina expandida se calcula así:

$$H_e = 0.9287 \text{ m} + 0.2786 \text{ m} = 1.2073 \text{ m}$$

De esta forma, la altura de la resina dentro de la columna considerando el porcentaje de expansión que esta puede tener es de 1.2073 m.

4.6.2.3 Altura de la columna. Para determinar la altura es necesario tener en cuenta que la columna no se rellena completamente de la resina utilizada, por lo que es recomendable tener un espacio libre sobre el lecho con el fin de evitar afectaciones en la operación por la expansión que la resina puede presentar, para lo cual, el espacio libre puede oscilar entre el 30% y 100% de la altura del lecho¹⁵⁹. Así, para el cálculo del espacio libre se tomará como referencia el 30% de la altura expandida de la resina, aplicando la **Ecuación 9**.

¹⁵⁹ SANCHEZ. Op. Cit. p. 9

Ecuación 9. Espacio libre de la columna.

$$E_L = H_e \times 0.30$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

E_L : Espacio libre.

H_e : Altura de la resina expandida.

Según lo anterior, la altura del espacio libre es:

$$E_L = 1.2073 \text{ m} \times 0.30 = 0.3622 \text{ m}$$

Teniendo las alturas correspondientes al espacio libre y a la resina activa dentro de la columna, se determina la altura total del equipo de intercambio, teniendo en cuenta la **Ecuación 10**.

Ecuación 10. Altura total.

$$H_T = H_e + E_L$$

Fuente: elaboración propia, con base en CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 180. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Según lo anterior, la altura total de la columna de intercambio es de 1.5695, tal como se muestra en el siguiente cálculo.

$$H_T = 1.2073 \text{ m} + 0.3622 \text{ m} = 1.5695 \text{ m}$$

De esta forma, el **Tabla 13** muestra la síntesis de resultados referentes a los parámetros de diseño de la columna.

Tabla 13. Síntesis de resultados para las especificaciones de la columna.

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Volumen de la resina (L)	V_R	117
Diámetro de la columna (m)	D_C	0.4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. (Continuación).

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Altura de la resina activa (m)	H	0.9287
Altura de la resina expandida (m)	H_e	1.2073
Altura espacio libre (m)	E_L	0.3622
Altura total (m)	H_T	1.5695

Fuente: elaboración propia.

4.7 CICLO DE TRABAJO

El ciclo de trabajo es parte fundamental para aplicar el intercambio iónico a escala industrial, por esto se debe conocer la capacidad de intercambio de la resina, para después determinar los parámetros referentes a la regeneración de esta. Es importante tener en cuenta que el rendimiento económico de este proceso depende tanto de la capacidad de intercambio como de la cantidad de regenerante que es necesario¹⁶⁰.

4.7.1 Etapa de operación. En esta se realiza el intercambio iónico entre el efluente contaminado y la resina Ambersep 900 OH. Para poder predecir un buen rendimiento según la capacidad y la selectividad, se calcula la velocidad de flujo de entrada a la columna¹⁶¹ teniendo en cuenta la **Ecuación 11**.

Ecuación 11. Caudal de carga.

$$Q_{carga} = \frac{Q_V}{A_f}$$

Fuente: elaboración propia, con base en CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 198. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

Q_{carga} : velocidad de carga para la columna de intercambio.

Q_V : Caudal de vertimiento.

A_f : Área de flujo dentro de la columna.

Según lo anterior, la velocidad de carga se determina a continuación:

¹⁶⁰ SANCHEZ. Op. Cit. p. 12.

¹⁶¹ QUIMBAYO CASALLAS Y DUARTE BLANCO. Op. Cit. p. 110-111.

$$Q_{carga} = \frac{2.8 \frac{m^3}{h}}{\frac{\pi * (0.4m)^2}{4}} = 22.28 \frac{m^3}{h}$$

Por consiguiente, la corriente de agua pretratada que sale del reactor biológico debe ingresar por la parte inferior de la columna a una velocidad de 22.28 m³/h mediante una bomba para que entre en contacto la resina Ambersep 900 OH, luego pase a lo largo de columna hasta llegar a lo más alto y finalmente salga por la parte superior de esta con una concentración de fenoles menor a 0.002 mg/L hasta un tanque de almacenamiento.

4.7.2 Etapa de lavado o retrolavado. Para realizar la regeneración de la resina primero se deben eliminar las impurezas retenidas por esta durante el ciclo de trabajo, realizando un lavado al lecho con una corriente de agua ascendente, logrando la expansión de la resina del 30%, a una velocidad entre 5 a 60 m/h¹⁶², con el fin de favorecer el material del lecho y evitar la formación de canales¹⁶³. Cabe aclarar que cada proveedor realiza una recomendación sobre la velocidad del lavado rápido.

4.7.3 Etapa de regeneración. Este es uno de los pasos más importantes debido a que es vital mantener la resina en condiciones de servicio óptimas, ya que a medida que se da el paso del efluente contaminado o etapa de operación, las resinas reducen su capacidad de intercambio¹⁶⁴. Además, durante este proceso se da el arrastre del contaminante fenólico (anión) retenido por la resina con el fin de despejar los sitios activos y que se pueda dar de nuevo un intercambio iónico. Dentro de la etapa de regeneración se debe determinar la velocidad, la duración y la cantidad de regenerante, ya que como se menciona anteriormente define la rentabilidad económica de la columna.

4.7.3.1 Cantidad de regenerante. Esta es dada por el proveedor de la resina, en donde se sugiere una proporción en masa de 2 a 4% de NaOH tal como se evidencia en la ficha técnica (**ANEXO F**). En primer lugar, se debe calcular el caudal de regeneración, el cual se define por la **Ecuación 12**.

¹⁶² SANCHEZ. Op. Cit. p. 17.

¹⁶³ Ibid. SANCHEZ. p. 12.

¹⁶⁴ Ibid. SANCHEZ. p. 12.

Ecuación 12. Caudal de regeneración.

$$Q_{regeneración} = RFR * V_R$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 79. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

$Q_{regeneración}$: Caudal para la etapa de regeneración.

V_R : Volumen de la resina utilizada.

Teniendo en cuenta que el RFR o tasa de flujo de regeneración es dada por el fabricante, se toma como 8 BV/h y de terminar el caudal de regeneración como se muestra en seguida.

$$Q_{regeneración} = 8 \frac{1 \text{ m}^3 \text{ regenerante}}{1 \text{ m}^3 \text{ resina} * h} * 0.117 \text{ m}^3 = 0.936 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Ahora bien, se puede determinar la cantidad de regenerante, a partir del cálculo de la masa de NaOH, la cual depende del nivel de regenerante, que está dado por el fabricante (**ANEXO F**); donde se toma un valor de 160 entre un rango de 64 a 160 g NaOH/L de resina.

Ecuación 13. Masa del regenerante.

$$m_{NaOH} = \frac{\text{masa del NaOH}}{L \text{ resina}} * V_R$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 79. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

m_{NaOH} : masa del regenerante.

$\frac{\text{masa del NaOH}}{L \text{ resina}}$: nivel de regenerante.

V_R : Volumen de la resina utilizada.

A partir de lo anterior se calcula la masa necesaria para la solución de regenerante a utilizar en la resina Ambersep 900 OH.

$$m_{NaOH} = \frac{160 \text{ g NaOH}}{\text{L resina}} * 117 \text{ L} = 18720 \text{ g} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 18.72 \text{ kg de NaOH}$$

Como se observa anteriormente, para 117 L de resina son necesarios 18.72 kg de NaOH.

A continuación, conociendo la masa de NaOH, se debe determinar la masa de agua necesaria para la solución de regenerante (**Ecuación 14**), teniendo en cuenta que debe tener una concentración entre el 2 al 4%, tomando un valor de 3% para realizar el respectivo cálculo.

Ecuación 14. Masa de agua para la solución de regenerante.

$$m_{H_2O} = \frac{\text{masa del NaOH}}{\frac{\% \text{ masa del NaOH}}{100 \%}}$$

Fuente: QUIMBAYO CASALLAS, María Paula y DUARTE BLANCO, Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de Mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el vijal municipio de San-Mateo Boyacá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Bogotá: 2019. p. 117. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7590>

Donde:

m_{H_2O} : masa de agua.

$\% \text{ masa del NaOH}$: concentración (%peso).

En seguida, se calcula la masa de agua tal como se ve a continuación.

$$m_{H_2O} = \frac{18.72 \text{ kg de NaOH}}{\frac{3 \%}{100 \%}} = 624 \text{ kg de } H_2O$$

Así, la masa de agua necesaria para preparar la solución de regenerante es de 624 kg.

➤ **Volumen de la solución de regenerante.** Ahora bien, para determinar el volumen de esta solución, se debe calcular los volúmenes de NaOH (**Ecuación 15**) y de agua (**Ecuación 16**).

Ecuación 15. Volumen de regenerante.

$$V_{NaOH} = \frac{m_{NaOH}}{\rho_{NaOH}}$$

Fuente: CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 184. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

V_{NaOH} : volumen de regenerante.

m_{NaOH} : masa del regenerante.

ρ_{NaOH} : densidad del regenerante NaOH.

Ecuación 16. Volumen de agua para la solución.

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

Fuente: CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. p. 184. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

Donde:

V_{H_2O} : volumen de agua.

m_{H_2O} : masa de agua.

ρ_{H_2O} : densidad del agua.

Según lo anterior, el volumen de regenerante se calcula con una densidad de 2.13 kg/L para el NaOH a 25°C, tal como se muestra a continuación:

$$V_{NaOH} = \frac{18.72 \text{ kg de NaOH}}{2.13 \frac{\text{kg de NaOH}}{\text{L}}} = 8.7887 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.008789 \text{ m}^3 \approx 0.009 \text{ m}^3$$

Seguido de esto, se determina el volumen de agua necesario para esta solución, tomando la densidad del agua.

$$V_{H_2O} = \frac{624 \text{ kg de } H_2O}{1 \frac{\text{kg de } H_2O}{L}} = 624 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.624 \text{ m}^3$$

Finalmente, para determinar el volumen de la solución se realiza la sumatoria de los calculados anteriormente; esto se evidencia en el siguiente cálculo.

$$V_{regeneración} = 9L + 624 \text{ L} = 633 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.633 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se determina el volumen del tanque de regeneración, el cual debe ser un 10% mayor del volumen de la solución¹⁶⁵, necesitando así un tanque de 0.7 m³.

Por consiguiente, es necesario utilizar 633 L de solución para regenerar la resina aniónica fuerte Ambersep 900 OH, de la cual se utilizan 117 L en la columna de intercambio propuesta para la empresa Pharmetique Labs S.A; teniendo en cuenta que el volumen del tanque de solución de regenerante debe ser de 0.7 m³.

4.7.3.2 Velocidad de regeneración. Para determinar la velocidad del proceso de regeneración se tiene en cuenta el caudal del regenerante ($Q_{regeneración}$), siendo en este caso el Hidróxido de Sodio (NaOH) y el área del equipo de intercambio (A_f), tal como se indica en la **Ecuación 17**.

Ecuación 17. Velocidad de regeneración.

$$v_{regeneración} = \frac{Q_{regeneración}}{A_f}$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 79. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

$v_{regeneración}$: velocidad de regeneración.

$Q_{regeneración}$: Caudal para la etapa de regeneración.

¹⁶⁵ SALVADOR. Op. Cit. p. 80.

De esta forma, la velocidad de regeneración para el tratamiento analizado se indica a continuación:

$$v_{regeneración} = \frac{0.936 \frac{m^3}{h}}{\frac{\pi * (0.4 m)^2}{4}} = 7.4484 \frac{m}{h}$$

Ahora bien, la velocidad a la que se realiza el ciclo de regeneración teniendo un sistema en contra corriente debe estar en un rango entre 5 a 20 m/h¹⁶⁶, por lo cual, la velocidad de regeneración para el tratamiento propuesto se encuentra dentro de las especificaciones y condiciones óptimas para la operación de este.

4.7.3.3 Tiempo de regeneración. A partir de la ejecución del tratamiento la resina va perdiendo la capacidad de intercambio, por lo cual, esta requiere de un proceso de regeneración, siendo necesario determinar el tiempo que dura realizar este proceso mediante la **Ecuación 18**.

Ecuación 18. Tiempo de regeneración.

$$t_{regeneración} = \frac{V_{regeneración}}{Q_{regeneración}}$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 81. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

$t_{regeneración}$: tiempo de regeneración.

$V_{regeneración}$: volumen de regeneración.

$Q_{regeneración}$: Caudal para la etapa de regeneración.

Ahora bien, el tiempo de regeneración para la resina Ambersep 900 OH se indica a continuación:

$$t_{regeneración} = \frac{0.633 m^3}{0.936 \frac{m^3}{h}} = 0.6763 h \approx 41 min$$

De esta forma, se tiene un tiempo de 41 minutos aproximadamente para realizar la etapa de regeneración en la resina Ambersep 900 OH, teniendo en cuenta que el

¹⁶⁶SANCHEZ. Op. Cit. p. 15.

proveedor establece un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos entre el regenerante y la resina (ver **ANEXO F**), por lo cual, esta condición es óptima para la respectiva operación. Además, es importante tener en cuenta que los 41 minutos permiten mantener la eficiencia del ciclo de regeneración donde se realiza el despeje de los sitios activos con el fin de favorecer el intercambio iónico entre el contaminante y la resina que se utiliza.

4.7.4 Etapa de enjuague. Esta etapa consiste en eliminar los excesos de la solución regenerante que hayan quedado retenidos en los poros de la resina. Se realiza una vez haya terminado la etapa de regeneración, mediante un enjuague lento con baja velocidad; teniendo en cuenta que al finalizar esta etapa se realiza un enjuague rápido para eliminar todos los residuos incrustados en la columna que, a su vez el enjuague lento no pueda remover¹⁶⁷. De esta forma, la etapa de enjuague se realiza con un volumen de agua, siendo este calculado mediante la **Ecuación 19**.

Ecuación 19. Volumen de agua de enjuague.

$$V_{\text{agua de enjuague}} = 4 \times V_R$$

Fuente: QUIMBAYO CASALLAS, María Paula y DUARTE BLANCO, Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de Mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el vijal municipio de San-Mateo Boyacá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Bogotá: 2019. p. 120. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7590>

Donde:

$V_{\text{agua de enjuague}}$: volumen de agua de enjuague.

V_R : volumen de la resina.

Así, el volumen de agua del enjuague corresponde a 4 veces el volumen de la resina, para lo cual se obtiene lo siguiente:

$$V_{\text{agua de enjuague}} = 4 \times 0.117 \text{ m}^3 = 0.468 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta lo anterior, el enjuague se lleva a cabo mediante dos etapas secuenciales, donde, el enjuague lento y rápido requiere el 75% y el 25% del

¹⁶⁷ SANCHEZ. Op. Cit. p. 10.

volumen de agua del enjuague, respectivamente¹⁶⁸. De esta forma, el volumen que se requiere para el enjuague lento y rápido se indica a continuación:

$$V_{\text{agua de enjuague lento}} = 0.468 \text{ m}^3 \times 0.75 = 0.351 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agua de enjuague rápido}} = 0.468 \text{ m}^3 \times 0.25 = 0.117 \text{ m}^3$$

Entonces, se necesitan un volumen de agua de 0.351 m³ y 0.117 m³ para el enjuague lento y rápido respectivamente.

Adicionalmente, se realiza el cálculo para determinar el caudal de enjuague a partir de la **Ecuación 20**, utilizando el volumen de agua de enjuague y el tiempo que tarda el proceso de regeneración puesto que ambos procesos se relacionan al momento de operar bajo la tasa de flujo de servicio teniendo un rango de operación entre 2 a 8 BV/h.

Ecuación 20. Caudal de enjuague.

$$Q_{\text{Enjuague}} = \frac{V_{\text{agua de enjuague}}}{t_{\text{regeneración}}}$$

Fuente: SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. p. 82. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

Donde:

Q_{Enjuague} : volumen de agua de enjuague.

$V_{\text{agua de enjuague}}$: volumen de agua de enjuague.

$t_{\text{regeneración}}$: tiempo de regeneración.

A partir de lo anterior se determina el caudal de enjuague el cual se muestra a continuación:

$$Q_{\text{Enjuague}} = \frac{0.468 \text{ m}^3}{0.6763 \text{ h}} = 0.692 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

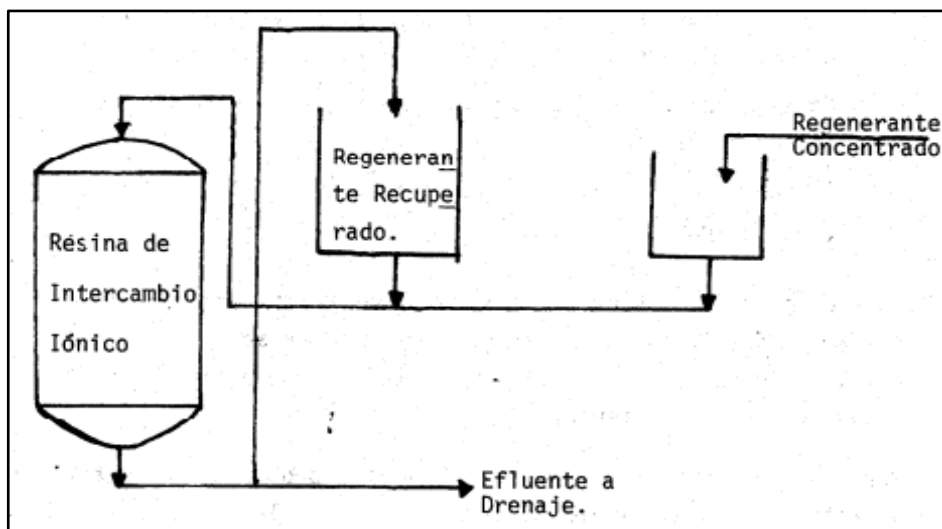
Así, durante la etapa de regeneración y enjuague son necesarios 1092 L de agua para llevar a cabo estos procesos; sin embargo, se debe tener en cuenta que estas

¹⁶⁸ QUIMBAYO CASALLAS y DUARTE BLANCO. Op. Cit. p. 121.

aguas contienen la solución de regenerante utilizado (NaOH) y el contaminante removido de los sitios activos, es decir los fenoles. Es importante mencionar, que durante la etapa de regeneración se considera un exceso de NaOH con el fin de garantizar la eficiencia de este ciclo, por lo cual, se propone dar un aprovechamiento a este para generar un ahorro en la cantidad a utilizar del regenerante puro y así, evitar problemas de contaminación¹⁶⁹.

Inicialmente, se debe tener en cuenta que la solución de regenerante tiene un exceso de NaOH, por esto al momento de realizar el paso de esta solución por la columna se debe disponer de un tanque almacenamiento que permita contener este reactivo residual para recircularlo; teniendo en cuenta que esta recirculación debe estar conectada al tanque de regenerante puro¹⁷⁰, como se evidencia en la **Figura 36**.

Figura 36. Sistema de recirculación del regenerante.



Fuente: GARCÍA ICEDO, Ramona. Reducción de cloruros y dureza mediante intercambio iónico, en agua del pozo No .1Bis de Navojoa, Sonora. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad de Sonora, Sonora. p. 15. [Consultado 24, julio, 2020]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>

Tabla 14. Síntesis de resultados para el ciclo de trabajo.

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Velocidad de carga ($\frac{m^3}{h}$)	v_{carga}	22.28

Fuente: elaboración propia.

¹⁶⁹ GARCÍA ICEDO. Op.Cit. p. 13-14.

¹⁷⁰ Ibid. GARCÍA ICEDO. p. 15.

Tabla 14. (Continuación).

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Caudal de regeneración ($\frac{m^3}{h}$)	$Q_{regeneración}$	0.936
Masa del regenerante (kg de NaOH)	m_{NaOH}	18.72
Masa de agua para la solución de regenerante (kg de H ₂ O)	m_{H_2O}	624
Volumen de regenerante (m^3)	V_{NaOH}	0.009
Volumen de agua (m^3)	V_{H_2O}	0.624
Volumen de agua enjuague lento (m^3)	$V_{agua\ de\ enjuague\ lento}$	0.351
Volumen de agua enjuague rápido (m^3)	$V_{agua\ de\ enjuague\ rápido}$	0.117
Caudal de enjuague ($\frac{m^3}{h}$)	$Q_{Enjuague}$	0.692

Fuente: elaboración propia.

Se puede concluir que la evaluación del tratamiento seleccionado utilizando la resina de intercambio aniónica fuerte como la Amberlyst A26 OH logra una remoción del 99.96% para concentraciones menores a 1 mg/L, teniendo en cuenta que esta eliminación se logra a un pH de 7 y con un tiempo de recirculación de 60 minutos; llegando al equilibrio rápidamente, a los 7 minutos, debido a que esta resina tiene mejor activación por su amplio rango de pH y es más homogénea, según el rango de tamaño de partícula.

Así, teniendo una concentración de fenoles en el afluente de 0.32 mg/L, este alcanza la remoción necesaria hasta una concentración en el efluente de 0.000128 mg/L; cumpliendo con el valor máximo permitido por la Resolución 1207 de 2014, el cual es de 0.002 mg/L. Esto conlleva a que sea posible dar un uso eficiente a las aguas tratadas de manera industrial, es decir en actividades que no involucren el proceso productivo, como en la prelimpieza de los reactores y tanques de almacenamiento utilizados en áreas de fabricación de jarabes o emulsiones, donde el consumo es de 77400 L por semana, como se mostró en el diagnóstico.

Todo esto con el fin de conservar la riqueza y diversidad medio ambiental que posee Colombia, considerando el impacto del vertimiento de las aguas tratadas, ya que pueden ser reutilizadas industrialmente reduciendo el consumo de agua potable en actividades relacionadas con la limpieza de equipos, teniendo en cuenta que es un recurso indispensable, no renovable y que a medida que pasa el tiempo se va agotando. Adicionalmente, se busca garantizar el cumplimiento de la Ley 373 de 1997, la cual trata sobre la reutilización del agua y asimismo evitar futuras multas por el incumplimiento de esta.

Por parte, para la descripción de la propuesta de una columna de intercambio iónico se concluye el uso de una resina aniónica fuerte, como la Ambersep 900 OH, debido a que tiene propiedades y condiciones de operación similares a la estudiada (Amberlyst A26); pero, además es rentable económicamente y de fácil adquisición. Se define también que la columna debe trabajar de forma semi continua de lecho fijo y con un sistema de regeneración en contra corriente.

Además, dentro de los parámetros de diseño para la columna, se obtiene un volumen de 0.117 m^3 de resina por año para el caudal de vertimiento de la empresa Pharmedique Labs S.A, el cual es de 2.8 m^3 por hora. Luego, se determina que el diámetro de la columna es de 0.4 m , con una altura de la resina de 1.2073 m , teniendo en cuenta el porcentaje de expansión (30%) y que la altura total de columna es de 1.5695 m , cumpliendo así con los requerimientos de espacio definidos por la empresa y teniendo en cuenta las especificaciones del proveedor.

Por último, se calculan las variables que influyen en el ciclo de trabajo de la resina aniónica, el cual consta de la etapa de operación, retro lavado, regeneración y enjuague. Por esto, se determina la velocidad o caudal de carga el cual es $22.28 \text{ m}^3/\text{h}$; teniendo en cuenta que, para cumplir con esta velocidad es necesario implementar una bomba de alimentación. Luego, para la etapa de retro lavado se hace pasar un flujo de agua de manera ascendente a una velocidad promedio de 25 m/h , con el fin de eliminar las impurezas retenidas durante la etapa anterior antes de la regeneración. Seguido de esto, para regenerar la resina Ambersep 900 OH es necesario utilizar una solución de regenerante de NaOH de 0.633 m^3 con una concentración del 3%, a una velocidad de 7.4484 m/h y en un tiempo de 41 minutos.

Al finalizar con el ciclo de regeneración, se realiza un enjuague para eliminar los excesos de la solución de regenerante, haciendo primero un enjuague lento con 0.351 m^3 de agua y luego uno rápido con 0.117 m^3 , obteniendo así un volumen de agua total para el enjuague de 0.468 m^3 con un caudal de $0.692 \text{ m}^3/\text{h}$; todo esto con el objetivo de que las condiciones de intercambio se restablezcan y así, se cumpla con la remoción necesaria para obtener una concentración menor de 0.002 mg/L de fenoles y reutilizar estas en operaciones de prelimpieza en las áreas de fabricación de jarabes y emulsiones.

5. COSTOS

Teniendo en cuenta la propuesta planteada en el capítulo 4, se establece la viabilidad económica a partir de los costos de inversión que se requieren para llevar a cabo el tratamiento terciario de resinas de intercambio iónico en la PTAR de Pharmetique Labs S.A., teniendo presente que se consideran los costos de instalación, y adicionalmente, se determina el posible ahorro referente al consumo de agua potable que se utiliza en labores de limpieza de equipos.

5.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Al momento de determinar los costos de inversión para la propuesta de una columna de intercambio aniónica con la resina Ambersep 900 OH para la empresa Pharmetique Labs S.A., se tiene en cuenta condiciones como el volumen necesario de la resina, la altura de la columna y la cantidad de regenerante. A continuación, se muestran los costos asociados a la inversión en el **Tabla 15**; donde el precio del tubo del PVC de referencia 2900085 fue tomado de PAVCO¹⁷¹, el del regenerante NaOH de Sodimac¹⁷², el de las electrobombas con referencia ESP18-12 de Aquastrong¹⁷³, el de las mangueras de diámetro de 2 pulgadas de Grainger¹⁷⁴, el del tanque de 1000 L para la solución de regenerante de Homecenter¹⁷⁵ junto con el del almacenamiento para el agua tratada de 10000 L y el de la resina mediante una cotización (**ANEXO G**).

Tabla 15. Costos de inversión.

Equipo/insumo	Presentación	Cantidad	Precio	Total
Tubo PVC	Metro	2	\$165.000	\$330.000
Resina Ambersep 900 OH	Litro	117	\$38.000	\$4.446.000

Fuente: elaboración propia.

¹⁷¹ PAVCO. Tubería PVC Alcantarillado – Novafort. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/tuberia-pvc-alcantarillado-novafort-pavco>

¹⁷² SODIMAC. Soda cáustica escamas 1 kg multiusos – Aquacol. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/5570549/soda-caustica-escamas-1-kg-multiusos>

¹⁷³ AQUASTRONG. Motobomba Bomba Sumergible 1hp Aguas Sucias Italiana. [Sitios WEB]. Medellín: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <http://aquastrong.it/>

¹⁷⁴ GRAINGER. Juego Manguera de Bomba. [Sitio WEB]. México: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Juego-Manguera-de-Bomba%2CDi%C3%A1m-Int-2pulg/p/1ZNC2?analytics=searchResults>

¹⁷⁵ HOMECENTER. Tanques y filtros de agua – Rotoplasr. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/204584/tanque-10000-litros>

Tabla 15. (Continuación).

Equipo/insumo	Presentación	Cantidad	Precio	Total
Regenerante (NaOH)	Kilogramo	19	\$3.000	\$57.000
Tanque para la solución regenerante (1000 L)	Litro	1	\$247.000	\$247.000
Electrobomba	Unidad	4	\$649.000	\$2.596.000
Manguera de conexión	Metro	4	\$9.100	\$36.400
Tanque de almacenamiento para el agua tratada (10000 L)	Litro	2	\$5.715.000	\$11.430.000
TOTAL				\$19.142.400

Fuente: elaboración propia.

Según la **Tabla 15** los costos de inversión necesarios para ejecutar el tratamiento de resinas de intercambio iónico son de \$19.142.400 teniendo en cuenta que este es un valor bajo al compararlo con los costos de los tratamientos analizados en el capítulo 3, los cuales son de \$45.400.000 para oxidación avanzada y \$180.000.000 para adsorción con carbono, permitiendo así, que la operación del tratamiento seleccionado sea una propuesta viable en la empresa Pharmetique Labs S.A.

5.2 COSTOS DE INSTALACIÓN

Los costos de instalación de la propuesta planteada hacen referencia al personal necesario para implementar los equipos que se requieren en el tratamiento terciario de resinas de intercambio iónico en la empresa Pharmetique Labs S.A. Para estimar estos costos primero se debe tener en cuenta los porcentajes del costo de instalación que se clasifican según el tipo de equipo, tal como muestra en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Porcentaje para el costo de instalación.

Tipo de equipo	% costo de instalación
Tanques de almacenamiento	30-60

Fuente: elaboración propia, con base en PETERS, Max y TIMMERHAUS, Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. 4 ed. New York: McGraw-Hill chemical engineering series, 1991. p. 185-186. ISBN 007-100871-3. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: https://www.dioneoil.com/uploads/6/8/7/4/6874938/plant_design_and_economics_for_chemical_engineers.pdf

Tabla 16. (Continuación).

Tipo de equipo	% costo de instalación
Electrobomba	25-60
Otros equipos	20

Fuente: elaboración propia, con base en PETERS, Max y TIMMERHAUS, Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. 4 ed. New York: McGraw-Hill chemical engineering series, 1991. p. 185-186. ISBN 007-100871-3. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: https://www.dioneoil.com/uploads/6/8/7/4/6874938/plant_design_and_economics_for_chemical_engineers.pdf

Según los porcentajes que se identifican en la tabla anterior se determina que, para los equipos referentes a los tanques de almacenamiento y las electrobombas requeridas, se asigna el 40% de los costos de inversión; por otra parte, el tubo de PVC, la resina Ambersep 900 OH y las mangueras de conexión tienen el 20%¹⁷⁶ de los costos anteriormente nombrados, tal como se muestra a continuación:

Tabla 17. Costos de instalación.

Equipo	Costo de inversión	% Costo de instalación	Costo de instalación
Tubo PVC	\$330.000	20%	\$66.000
Resina Ambersep 900 OH	\$4.446.000	20%	\$889.200
Tanque para la solución regenerante (1000 L)	\$247.000	40%	\$98.800
Electrobomba	\$2.596.000	40%	\$1.038.400
Manguera de conexión	\$36.400	20%	\$7.280
Tanque de almacenamiento para el agua tratada (10000 L)	\$11.430.000	40%	\$4.572.000
TOTAL	-	-	\$6.671.680

Fuente: elaboración propia.

¹⁷⁶ PETERS, Max y TIMMERHAUS, Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. 4 ed. New York: McGraw-Hill chemical engineering series, 1991. p. 185-186. ISBN 007-100871-3. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: https://www.dioneoil.com/uploads/6/8/7/4/6874938/plant_design_and_economics_for_chemical_engineers.pdf

De esta forma, se estima que en el momento de llevar a cabo el tratamiento terciario de resinas de intercambio iónico en la empresa Pharmedique Labs S.A. se requiere de aproximadamente \$6.671.680 destinados para los costos de instalación de los equipos necesarios para la propuesta.

5.3 AHORRO EN EL CONSUMO DEL AGUA POTABLE

Otro aspecto importante del proyecto en curso tiene que ver con el ahorro del recurso hídrico mediante la propuesta de reutilizar las aguas tratadas en el proceso de prelimpieza para los equipos en el área de fabricación de jarabes y emulsiones; teniendo en cuenta que cumplan con los parámetros necesarios para este uso eficiente. Por esto, se muestran a continuación los ahorros esperados al aplicar la propuesta.

Tal como se evidenció en el diagnóstico, se utilizan 77400 L/sem de agua potable en labores de limpieza de equipos, para lo cual, al incluir el tratamiento seleccionado en la PTAR, se espera que este almacene 20000 L/sem de las aguas tratadas, para lo cual, se tendría un almacenamiento mensual de 80000 L que serían destinados para la actividad mencionada. Asimismo, anualmente se tiene un consumo promedio de 24.381.000 L, con un costo de \$186.903.471; donde, para establecer el ahorro aproximado se tiene en cuenta lo siguiente:

Inicialmente se determina el volumen de agua tratada por año, el cual se muestra a continuación:

$$Q_{\text{Agua Tratada}} = 80000 \frac{L}{\text{mes}} \times \frac{12 \text{ mes}}{1 \text{ año}} = 960000 \frac{L}{\text{año}}$$

De lo anterior, se evidencia que, al momento de implementar la columna de intercambio iónico, se espera reutilizar 960000 L por año en actividades de pre-limpieza de equipos, ya que son actividades que no involucran el proceso productivo. Seguido de esto, se determina el nuevo consumo de agua potable por año, teniendo en cuenta el caudal de agua tratada.

$$Q_{\text{Ahorro Agua Potable}} = 24.381.000 \frac{L}{\text{año}} - 960000 \frac{L}{\text{año}} = 23.421.000 \frac{L}{\text{año}}$$

Por consiguiente, el nuevo caudal de consumo de agua que se espera obtener debe ser de 23451000 L por año aproximadamente, siendo menor al consumo que tiene actualmente la empresa, evidenciando así un ahorro del recurso hídrico que permite un uso eficiente de este.

Ahora bien, este ahorro del consumo hídrico se ve evidenciado en los costos que la empresa presenta actualmente en el pago del agua. Seguido de esto se muestra el

cálculo del costo anual del nuevo consumo de agua mencionado anteriormente y el ahorro en precio de este recurso hídrico.

$$Costo_{Agua Potable} = \frac{186.903.471 \frac{\$}{año}}{24.381.000 \frac{L}{año}} \times 23.421.000 \frac{L}{año} = 179.544.161 \frac{\$}{año}$$

$$Ahorro_{Agua Potable} = 186.903.471 \frac{\$}{año} - 179.544.161 \frac{\$}{año} = 7.359.310 \frac{\$}{año}$$

De esta forma, al implementar el tratamiento de resinas de intercambio iónico, se tiene un ahorro anual en precio de \$7.359.310, con un caudal reducido de 23.421.000 L por año, teniendo en cuenta que los costos de inversión que se requieren para la implementación del tratamiento se pueden recuperar en 3 años aproximadamente con el ahorro que se genera, por lo cual, esto hace que la propuesta planteada sea rentable para la empresa Pharmetique Labs S.A.

6. CONCLUSIONES

- Se realizó el diagnóstico del estado actual de las aguas residuales en la planta de tratamiento, donde se determinó el cumplimiento de los parámetros de vertimiento para la industria farmacéutica según la Resolución 631 de 2015, además se identificaron los usos del agua potable en actividades de limpieza para el área de fabricación de jarabes o emulsiones, generando un consumo promedio de este recurso de 2032 m³, adicional se realizó un balance hídrico donde se identificó un consumo de 77400 L por semana para la limpieza y la comparación de los valores límites permisibles con la Resolución 1207 de 2014, donde se evidenció que el parámetro de fenoles no cumple con la concentración máxima de 0.002 mg/L teniendo una concentración de 0.32 mg/L en las aguas tratadas, incumpliendo con las condiciones para dar un reúso industrial.
- Se seleccionó el tratamiento terciario de forma teórica mediante una matriz de decisión, teniendo en cuenta seis criterios de selección, siendo resinas de intercambio iónico el óptimo comparado con la oxidación avanzada y la adsorción con carbono, ya que este tiene una capacidad de remoción del 99.96% utilizando una resina aniónica fuerte, requiriendo una altura mínima de 0.75 m y dos tanques de almacenamiento, lo que lo hace viable; teniendo los afluentes de la PTAR las condiciones de temperatura y pH adecuadas; identificando que el pH puede variar pero su control no genera gastos adicionales y que dentro de los costos se tiene en cuenta la vida útil de 10 años debido a que esta cuenta con un proceso de regeneración con NaOH.
- Se evaluó el tratamiento seleccionado de resinas de intercambio iónico de manera teórica, el cual alcanza una remoción de fenoles de 99.96% con la resina aniónica fuerte Amberlyst A26 OH, logrando una concentración final de 0.000128 mg/L, dando cumplimiento a la Resolución 1207 de 2014 la cual establece tener una concentración máxima de 0.002 mg/L con el fin de dar un reúso industrial; así, para presentar la propuesta se evaluó la resina de intercambio Ambersep 900 OH, debido a que esta es más rentable, teniendo presente que cuenta con las mismas propiedades de la resina utilizada en el estudio, por lo cual, se realizó el dimensionamiento de la propuesta, teniendo una altura de la columna de 1.5695 m, con un diámetro de 0.4 m; por otra parte, el volumen de la resina y el regenerante a utilizar por año equivale a 117 L y a 9 L, respectivamente.
- Se determinaron los costos de inversión para la columna de intercambio aniónica los cuales fueron de \$19.142.400, teniendo en cuenta 2 metros de tubo de PVC, 1 tanque de 1000 L para la solución de regenerante, 2 tanques de 10000 L para el almacenamiento de las aguas tratadas, 4 electrobombas, 4 mangueras de conexión, 117 L de resina y 19 kg de regenerante; así como el ahorro en el consumo de agua potable el cual es de \$7.359.310 por año, permitiendo que la inversión se recupere en 3 años aproximadamente.

7. RECOMENDACIONES

- Desarrollar a nivel experimental la propuesta planteada en el presente proyecto debido a que esta se analizó de forma teórica con el objetivo de contrastar los resultados que se obtengan.
- Realizar una propuesta que permita tener un sistema de descargue para los tanques de almacenamiento, con el fin de que las aguas tratadas puedan ser reutilizadas en la prelimpieza de equipos.
- Proponer el uso del filtro de carbono, con el que ya cuenta la empresa, adicionándolo al sistema de intercambio iónico para evaluar los alcances en temas de calidad del agua que esto conlleva.
- Estudiar la posibilidad de disminuir la cantidad de regenerante con el fin de minimizar los costos asociados a este sin disminuir la eficiencia de remoción de la resina propuesta.
- Determinar la posibilidad de implementar más de dos tanques de almacenamiento teniendo en cuenta el nuevo espacio disponible para la PTAR con el fin de aprovechar un mayor volumen del efluente tratado.
- Evaluar la viabilidad de dar un uso eficiente a las aguas tratadas en actividades de uso agrícola, una vez aplicado el tratamiento con resinas de intercambio iónico.
- Revisar la disponibilidad de los tanques de preparación y mezcla de soluciones con los que ya cuenta la empresa, para utilizarlos en la elaboración de la solución de regenerante y así disminuir los costos de instalación.

BIBLIOGRAFIA

ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS. Tratamiento. [Sitio WEB]. Washington D.C. La entidad. [16, febrero,2020]. Disponible en: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation.html>

AGUAS INDUSTRIALES. Ventajas y desventajas de los reactores biológicos secuenciales (SBR). [Sitio WEB]. La Rioja: la entidad. [18, febrero, 2020]. Disponible en: <http://aguasindustriales.es/ventajas-y-desventajas-de-los-reactores-biologicos-secuenciales-sbr/>

ALARCÓN RONDÓN, Eliana Iveth y NEITA PINTO, Laura Catalina. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada en una empresa de cereales en la ciudad de Bogotá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Bogotá: 2017. 107 p. [Consultado 16, febrero, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6042>

ÁLVAREZ MÉNDES, Jennifer. Nanotubos de carbono. Empleo como material adsorbente para la determinación de metales. [en línea]. Trabajo de grado para optar al grado de Doctora en Química. Universidad de Santiago de Compostela, Lugo: 2015. 254 p. [Consultado 19, mayo, 2020]. Disponible en: shorturl.at/loX29

ANDÍA CARDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: coagulación y floculación. En: Sedapal. [sitio web]. Lima: la entidad. 44 p. [16-02-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

AQUASTRONG. Motobomba Bomba Sumergible 1hp Aguas Sucias Italiana. [Sitios WEB]. Medellín: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <http://aquastrong.it/>

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Glosario. En: Ministerio de Ambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. prr. 22. [5-08-2020]. Disponible en: <http://portal.anla.gov.co/permiso-ocupacion-cauce#:~:text=Caudal%20%C3%ADquido%3A%20Volumen%20de%20agua,en%20una%20unidad%20de%20tiempo.>

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. [sitio web]. Bogotá: Ministerio de Ambiente. Glosario Ambiental. [18-02-2020]. Disponible en: <http://portal.anla.gov.co/permiso-ocupacion-cauce>

BARBOSA TRILLOS, Dalje Sunith. Diseño, operación y modelización de procesos continuos biorreactor enzimático-módulo de membrana, aplicación a la eliminación de contaminantes fenólicos de efluentes industriales. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Doctor. Universidad de Murcia, Murcia: 2012. 391 p.

[Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/28426>

BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas [en línea]. En: Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Bogotá D.C. 2014. 12 p. [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>

CANJURA ASTORGA, Karla y JEANNETTE LEMUS, Zuleyma. Propuesta de un sistema de tratamiento para las aguas residuales provenientes de lavadores públicos del municipio de Nejapa. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad del Salvador, San Salvador: 2003. 124 p. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2625/1/Propuesta_de_un_sistema_de_tratamiento_para_las_aguas_residuales_provenientes_de_lavaderos_p%C3%BAblicos_del_municipio_de_Nejapa.pdf

CARRILLO ARAGÓN, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cádiz, Cádiz: 2007. 409 p. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/6484>

CENTRO VIRTUA DE FORMACIÓN DEL AGUA. Contaminación del agua por detergentes (eutrofización). En: Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A.C. [sitio WEB]. México: la entidad. [25, julio, 2020]. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-detergentes-eutrofizacion/#:~:text=El%20poder%20contaminante%20de%20los,respiraci%C3%B3n%20y%20provoc%C3%A1ndoles%20la%20muerte.>

COGOLLO FLÓREZ, Juan. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Dyna. [en línea]. 2011, 78 (165). 18-27. [Consultado 16, febrero, 2020]. ISSN electrónico 2346-2183. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Ley 373. (11, junio, 1997). Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. En: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá. 1997. 6 p. [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpo de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En: Red de desarrollo sostenible de Colombia. Bogotá. 2015. 73 p. [Consultado: 16 de febrero de 2015]. Disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

CONCEPTO.DE. Tratamiento de aguas residuales. [Sitio WEB]. Argentina. La entidad. [12, febrero,2020]. Disponible en: <https://concepto.de/tratamiento-de-aguas-residuales/>

CONDORCHEM ENVITECH. [sitio web]. España: ce. Tratamiento de aguas. [25-04-2020]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/resinas-intercambio-ionico/>

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO. Glosario Ambiental. En: Corporación Autónoma Regional del Quindío. [sitio web]. Armenia: la entidad. 38 p. [11-02-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.crq.gov.co/Documentos/GLOSARIO%20AMBIENTAL/GLOSARIO%20AMBIENTAL.pdf>

DARDEL. Propiedades de las resinas intercambiadoras de iones. [Sitio WEB]. Francia: Francois de Dardel. [3, junio, 2020]. Disponible en: http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html

DELGADILLO GAMBOA, Gloria. Adsorción de fenol con carbones activados preparados a partir de pepas de níspero de palo por activación química. Revista de la Sociedad Química del Perú. [en línea]. 2009, 75 (1). 64-75. [Consultado 18, mayo, 2020]. 1810-634X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371937612009>

DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson y LITTER, Marta. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: ResearchDate. [sitio web]. 25 p. [28-04-2019]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la Eliminacion_de_contaminantes

ECURED. Fenol. [Sitio WEB]. Colombia: la entidad. [25-07-2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Fenol>

ES EL AGUA. Características de las bombas peristálticas y apartado especial para conocer los dúplex. [sitio WEB]. España: la entidad. [03, junio, 2020]. Disponible en: shorturl.at/jvBT1

ESALTIA. 10 maneras de ahorrar dinero al comprar un generador de ozono comercial o industrial. [Sitio WEB]. Alicante: la entidad. [19-05-2020]. Disponible en: <http://www.esozono.com/10-maneras-de-ahorrar-dinero-al-comprar-un-generador-de-ozono-comercial-o-industrial/>

FERNANDEZ ALBA, Antonio; *et al.* Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [sitio web]. Organización Madri+d: la entidad. p. 60. [18-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

FERNANDEZ GONZALEZ, Jesús; BEASCOECHEA, Eduardo; MUÑO, José y CURT FERNANDEZ DE LA MORA, María D. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. En: Fundación Global Nature. [sitio web]. Las Rozas: la entidad. 12 p. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%20Anexos1.pdf>

FORERO, J.; *et al.* Ozono para tratamiento de fenol en aguas residuales industriales. CTF Cienc. Tecnol. Futuro. [en línea]. 2001, 2, (2). 10 p. [19-05-2020]. ISSN 0122-5383. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832001000100002&lng=en&nrm=iso

FUNDAMENTOS DE QUÍMICA. Espectrofotometría. En: Universidad Pablo de Olavide. [sitio web]. Sevilla: la entidad. p. 1. [13-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/quimbiotec/FQpractica4.pdf>

GARCÍA ICEDO, Ramona. Reducción de cloruros y dureza mediante intercambio iónico, en agua del pozo No .1Bis de Navojoa, Sonora. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad de Sonora, Sonora. 25 p. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>

GRAINGER. Juego Manguera de Bomba. [Sitio WEB]. México: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Juego-Manguera-de-Bomba%2CDi%C3%A1m-Int-2pulg/p/1ZNC2?analytics=searchResults>

HENRY, Glynn y HEINKE, Gary. Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. 2 ed. México: Prentice Hall, 1999. 410 p. ISBN: 970-17-0.66-2.

HOMECENTER. Tanques y filtros de agua – Rotoplast. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en:

<https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/204584/tanque-10000-litros>

IGBINOSA, Etinosa, *et al.* Toxicological Profile of Chlorophenols and Their Derivatives in the Environment: The Public Health Perspecti. The Scientific World Journal. [en línea]. 2013, 2013. (1).11. 12 p. [Consultado 27, abril,2020]. ISSN electrónico 2356-6140. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/460215/>

INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA. Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono. En: *madrimasd*. [sitio web]. Madrid: la entidad. 179 p. [19-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: shorturl.at/adkO3

INGENIERO CHIRINOS A. Importancia del fenol. [Sitio WEB]. Perú: la entidad. [24, julio, 2020]. Disponible en: <https://www.importancia.cc/fenol/>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INVESTIGACIÓN. Resinas intercambiadoras de aniones. En: Universidad de Concepción. [sitio web]. Chile: la entidad. 9 p. [26-04-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www2.udec.cl/~analitic/Interc-iones.pdf>

KAINDL, Nikolaus y LIECHTI, Pierre-André. Design and operation experience of advanced effluent treatment with ozonation and subsequent biofiltration at the paper mill SCA-Graphic Laakirchen AG – Austria. En: *ResearchGate*. [sitio web]. 10 p. [19-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/233312878_Advanced_Effluent_Treatment_with_Ozonation_and_Biofiltration_at_the_Paper_Mill_SCA-Graphic_Laakirchen_AG_-_Austria_Design_and_Operation_Experience

KANHERE, S; *et al.* Studies with Ion-exchange Resins on Cinchona Alkaloids III: Exchange Rates. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. [en línea]. 1969, 58. (12). 3 p. [Consultado 03, junio, 2016]. ISSN.0022-3549. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jps.2600581232>

LENNTECH. Amberlyst A26 OH. En: Dow Chemical Company. [sitio web]. Países Bajos: la entidad. 2 p. [03-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Amberlyst-A26-L.pdf>

LENNTECH. Glosario del agua. [Sitio WEB]. Florida: la entidad. [17, febrero, 2020]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm#F>

MACHINESEEKER. Todas las categorías. [Sitio WEB]. Venezuela. La entidad. [19, mayo, 2020]. Disponible en: <https://www.machineseeker.com.ve/>

MEJÍA LÓPEZ, Ana; CABRERA, Mario y CARRILLO, Yurina. Remoción de Contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala laboratorio. La Granja. [en línea]. 2017, 26 (2). 72-83. [Consultado 05, junio, 2020]. e-ISSN 1390-8596. Disponible en: <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/26.2017.07>

MEJÍA MORALES, Dalila. Sorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec: 2004. 71 p. [Consultado 22, mayo, 2020]. Disponible en: shorturl.at/vDFZ3

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. [sitio web]. Bogotá: Minambiente. Administración del recurso hídrico. [16-02-2020]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-dl-recurso-hidrico/demanda/uso-eficiente-y-ahorro-de-agua>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas. En: minambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. 441 p. [24-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/guia_25_sustancias.pdf

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Nonifenol y etoxilatos de nonifenol. En: Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. [sitio web]. España: la entidad. p. 1. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Nonifenol-y-Etoxilatos-de-nonifenol,15651,11,2007.html>

MONGE BES, Sarai; *et al.* Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados a tratamientos de aguas residuales industriales. En: Cyted: Ciencia y tecnología para el desarrollo. [sitio web]. Asociación de países Iberoamericanos: la entidad. 60 p. [18-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

MONTOYA DELGADO, Oscar Ernesto y MATUTE SÁNCHEZ, Ricardo Heriberto. Evaluación del carbón activado obtenido a partir de la vaina de malinche para adsorción de fenol del agua residual de laboratorio CIDEA-UCA. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de

Ingeniería, Managua: 2015. 84 p. [Consultado 25, abril, 2020]. Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/1482/1/60186.pdf>

MUÑOZ, Florinella y PAREDES, Anael. Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. *Revista Científica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador*. [en línea]. 2014, 34 (1). 6 p. [18-05-2020]. Disponible en: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/Descontaminaciondefenolesenefluente.pdf>

NAVARRO, Olga. Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Electrónica. [en línea]. Colombia: 2007. 13 p. [Consultado 11, mayo, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

OBSERVATORIO COLOMBIANO DE GOBERNANZA DEL AGUA. Glosario Jurídico – Gobernanza del Agua. En: Minambiente. [sitio web]. Colombia: la entidad. prr. 6. [5-08-2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/glosario>

OCHANDO PULIDO, Javier M.; *et al.* Performance and modeling of continuous ion Exchange processes for phenols recovery from olive mil wastewater. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2020, 249. 10 p. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN. 1383-5866. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620315586>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Sección 15: Desinfectantes y antisépticos. En: OMS. [sitio web]. 5 p. Archivo pdf. Disponible en: <http://archives.who.int/eml/wmf/2004/Spanish/pdf/Sec15-04.pdf>

OSAMAH A, Bin-Dahman y TAWFIK A, Saleh. Synthesis of carbon nanotubes grafted with PEG and its efficiency for the removal of phenol from industrial wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020, 13 (100286). 29 p. [Consultado 18, mayo, 2020]. S2215-1532(19)30308-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100286>

PARDO DÍAS, Sergio, *et al.* Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas. *Revista de Biología Tropical*. [en línea]. 2017, 65. (2). 685-699. [Consultado 24, julio, 2020]. ISSN electrónico 0034-7744. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v65n2/0034-7744-rbt-65-02-00685.pdf>

PAVCO. Tubería PVC Alcantarillado – Novafort. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/tuberia-pvc-alcantarillado-novafort-pavco>

PEREZ LOPEZ, Jhean Eleison. Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2010. 95 p. [Consultado 11, febrero, 2020]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133761.pdf>

PETERS, Max y TIMMERHAUS, Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. 4 ed. New York: McGraw-Hill chemical engineering series, 1991. 923 p. ISBN 007-100871-3. [Consultado 25, julio, 2020]. Disponible en: https://www.dioneoil.com/uploads/6/8/7/4/6874938/plant_design_and_economics_for_chemical_engineers.pdf

PHARMETIQUE LABS S.A. 1009- Análisis y caracterización de muestras provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales. Bogotá: 2015. p. 2.

PHARMETIQUE LABS S.A. Instrucción de fabricación local Emulsión Scott Tradicional. 7 ed. Bogotá: 2017. 17 p.

PHARMETIQUE LABS S.A. Instrucción de fabricación local Acetaminofén en jarabe. 6 ed. Bogotá: 2015. 10 p.

PORTALFARMA. Compuestos fenólicos: quinonas. [sitio web]. España: la entidad. p. 1. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://botplusweb.portalfarma.com/documentos/panorama%20documentos%20multimedia/PAM236%20PLANTAS%20MEDICINALES%20CON%20QUINONAS.PDF>

QUIMBAYO CASALLAS, María Paula y DUARTE BLANCO, Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de Mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2019. 152 p. [Consultado 26, abril, 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7590>

QUIMIA. Trampas de grasa. [Sitio WEB]. México: la entidad. [17, febrero, 2020]. Disponible en: <https://quima.com/blogs/blog/trampas-de-grasa>

RAMOS ALVARIÑO, Claridad. Los residuos de la industria farmacéutica. CENIC Ciencias Biológicas. [en línea]. 2006, 37 (1). 8 p. [15-05-2020]. 0253-5688. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220542005>

REMTAVARES. Tratamiento de aguas contaminadas por fenol mediante el proceso de Fenton heterogéneo. En: madrimasd. [sitio web]. Madrid: la entidad. [17-06-2020]. Disponible en: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/05/13/91674>

RICARDO RODRÍGUEZ, Yanet Lizania. Regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico del agua de en la empresa Ernesto Che Guevara. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa: 2011. 72 p. [Consultado 02, junio, 2020]. Disponible en: <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1856/RicardoRodr%C3%A9Guez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RÍOS CARREÑO, Laura Camila. Extracción con una resina de intercambio iónico de los ácidos carboxílicos producidos en el proceso Mixalco. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2018. 48 p. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/4125/1/172270.pdf>

RODRÍGUEZ, Carlos. Demanda Química de Oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. [en línea]. Colombia: 2007. 11 p. [Consultado 11, mayo, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+d e+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

SALAGER, Louis-Jean. Detergentes: componentes, fabricación, fórmulas, etc. En. Universidad de los Andes, Laboratorio FIRP. Venezuela: la entidad. 22 p. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S332A_Detergentes.pdf

SALVADOR AGAMEZ, Carlos Ignacio. Diseño de un sistema de intercambio catiónico del lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar). [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad San Buenaventura, Cartagena de Indias: 2014. 119 p. [Consultado 9, junio, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10819/2797>

SÁNCHEZ RUIZ, Concepción. Intercambio iónico. En: Universidad de la Coruña. [sitio web]. Coruña: la entidad. 30 p. [02-06-2020]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659>

SENSORES E INSTRUMENTACIÓN GUEMISA. Oxígeno disuelto. En: Sensores e instrumentación guemisa. [sitio web]. Rivas Vaciamadrid: la entidad. 5 p. [11-05-2020]. Archivo pdf. Disponible en: https://guemisa.com/articulos/que%20es%20oxigeno_disuelto.pdf

SODIMAC. Soda cáustica escamas 1 kg multiusos – Aquacol. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: la entidad. [13, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/5570549/soda-caustica-escamas-1-kg-multiusos>

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ. Metabolitos reactivos y respuesta tóxica. [sitio web]. España: la entidad. 8 p. [25-07-2020]. Archivo pdf. Disponible en: http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/BA-RES-11.pdf

UNIVERSIDAD DE BARCELONA. [sitio web]. Barcelona: ub. Precipitación: el carbón activo. [25-04-2020]. Disponible en: http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio_carbo.html#

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL. Investigando el tratamiento del agua. Conceptos. [Sitio WEB]. Salamanca: la entidad. [11, mayo, 2020]. Disponible en: https://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Conceptos/uni_04/u5c3s1.htm#Anchor1

VICTOR, María, OCHANDO, Javier y MARTINEZ, A. Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. [en línea]. 2016, 160. 29 p. [Consultado 02, junio, 2016]. ISSN.01383-5866. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616300235>

ANEXOS

**ANEXO A.
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA RESOLUCIÓN 631 DE 2015.**

PARÁMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS, SUSTANCIAS QUÍMICAS MEDICINALES Y PRODUCTOS BOTÁNICOS DE USO FARMACÉUTICO
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	150,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	15,00
Fenoles	mg/L	0,20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte

Anexo A. (Continuación).

PARÁMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS, SUSTANCIAS QUÍMICAS MEDICINALES Y PRODUCTOS BOTÁNICOS DE USO FARMACÉUTICO
Iones		
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	500,00
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00
Metales y Metaloides		
Antimonio (Sb)	mg/L	
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	
Cobre (Cu)	mg/L	
Cromo (Cr)	mg/L	
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01

Anexo A. (Continuación).

PARÁMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS, SUSTANCIAS QUÍMICAS MEDICINALES Y PRODUCTOS BOTÁNICOS DE USO FARMACÉUTICO
Níquel (Ni)	mg/L	
Plomo (Pb)	mg/L	
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte

Fuente: elaboración propia, con base en COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpo de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En: Red de desarrollo sostenible de Colombia. Bogotá. 2015. p. 20. [Consultado: 16 de febrero de 2015]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

**ANEXO B.
PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014.**

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento o y calderas	Descarga de Aparatos Sanitarios	Limpieza mecánica de vías Riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Fisicoquímicos					
pH	Unidades de pH	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0
Químicos					
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	mg/L	0,001		0,001	
Esteres Ftalatos	mg/L	0,005		0,005	
Fenoles	mg/L	0,002		0,002	
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	mg/L	0,01		0,01	
Biocidas					
2,4 D-ácido	mg/L	0,0001		0,0001	
Diurón	mg/L	0,0001		0,0001	
Glifosato	mg/L	0,0001		0,0001	
Mancozeb	mg/L	0,0001		0,0001	
Propineb	mg/L	0,0001		0,0001	

Anexo B. (Continuación).

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permissible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y calderas	Descarga de Aparatos Sanitarios	Limpieza mecánica de vías Riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Iones					
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,05			
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0		300,0	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0			
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0		500,0	500,0
Metales					
Aluminio	mg Al/L	5,0		5,0	
Berilio	mg Be/L	0,1		0,1	
Cadmio	mg Cd/L	0,01		0,01	
Cinc	mg Zn/L	3,0		3,0	
Cobalto	mg Co/L	0,05		0,05	
Cobre	mg Cu/L	1,0		1,0	
Cromo	mg Cr/L	0,1		0,1	
Plomo	mg Pb/L	5,0		5,0	
Hierro	mg Fe/L	5,0		5,0	
Litio	mg Li/L	2,5		2,5	
Manganeso	mg Mn/L	0,2		0,2	
Mercurio	mg Hg/L	0,001		0,001	
Molibdeno	mg Mo/L	0,07		0,07	

Anexo B. (Continuación).

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permissible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y calderas	Descarga de Aparatos Sanitarios	Limpieza mecánica de vías Riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Níquel	mg Ni/L	0,2		0,2	
Vanadio	mg V/L	0,1		0,1	
Metaloides					
Arsénico	mg As/L	0,1		0,1	
No Metales					
Selenio	mg Se/L	0,01		0,02	
Otros					
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO ₅)	mg O ₂ /L			30,0	

Fuente: BOGOTÁ D.C. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas [en línea]. En: Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Bogotá D.C. 2014. p. 4. [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>

ANEXO C.
CUANTIFICACIÓN INICIAL EXACTA DE FENOLES.



ANALQUIM LTDA.
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y CALIDAD DEL AIRE



<u>INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO</u>		CÓDIGO: 193711		
		PÁGINA: 1 de 1		
SEÑOR(ES):	ELIAN FERNANDEZ RODRIGUEZ BOJAS			
DIRECCIÓN:	C.R. 159 99 22 EN 60 4P 083			
MUESTRA PROCEDENTE DE:	BOGOTÁ	TELÉFONO: 018952157		
LUGAR TOMA DE LA MUESTRA:	FERIA PARADISIQUÉ LARI S.A. - BOGOTÁ	DEPARTAMENTO: CUNDINAMARCA		
PUNTO DE CAPTACIÓN:	SALIDA DE LA PTA			
TIPO DE MUESTRA:	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL			
FECHA DE TOMA DE LA MUESTRA:	2020-03-12	HORA TOMA DE LA MUESTRA: 11:40 H		
FECHA RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:	2020-03-12			
RESULTADOS				
PARAMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO
N. FENÓLICOS	2020-03-12	Espectrofotométrico Directo	24 50.00 B.C	0.32 mg/L PCB
No ANALISIS 3 --- FIN DEL REPORTE				
OBSERVACIONES: Muestra puntual recolectada por el cliente. Referencia (SM): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, 2017. a. Ensayo(s) de laboratorio acreditado(s) en Analquim Ltda. Resolución de acreditación N° 0827 del 09 de Agosto de 2019, IDEAM Nota: Analquim Ltda no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente asociada a la forma y otros datos que puedan afectar la validez del resultado. El presente documento no podrá ser reproducido total ni parcialmente y es válido únicamente si tiene firma original y el sello seco.				
 Qca. MAGDA JULIETH CASTAÑO ANGEL DIRECTOR DE LABORATORIO		NOTA: Los resultados del presente informe hacen referencia únicamente a la muestra analizada. Bogotá, 2020-04-04 FECHA DE EXPEDICIÓN		
FIN DE FIRMAS				
ANQ-PL-073-1 - Versión 2				
El plazo límite para cualquier observación sobre los resultados de este informe, es de 5 días hábiles contados a partir de la fecha de expedición del mismo.				

Esta versión digital es válida durante el periodo de vigencia de cuarentena nacional por el COVID-19. Para comprobar la autenticidad de este documento, comuníquese a la empresa citando número de oficio digital relacionado en la entrega oficial a través del correo corporativo controldeproyeccion@analquim.com.

Sede Laboratorio Carrera 25 No. 73 - 63/66 • www.analquim.com • Bogotá, D.C. - Colombia
Sede Administrativa Carrera 27 No. 73 - 77 • PBX: (57) (1) 8335545 • Celulares: 315 7718838 - 321 4502948 - 312 4203128 - 315 8802198
E-mail: gerenciacomercial@analquim.com - resultados@analquim.com - atencionalcliente@analquim.com - gerencia@analquim.com

Fuente: ANALQUIM LTDA. Informe de resultados de laboratorio. Bogotá D.C. (2020). pp.1.
[Consultado abril, 27].

ANEXO D. FICHA TÉCNICA RESINA AMBERLYST A26 OH.



Product Data Sheet

AMBERLYST™ A26 OH

Industrial Grade Strongly Basic Polymeric Resin

Introduction

AMBERLYST A26 OH is a strong base, type 1, anionic, macroreticular polymeric resin based on crosslinked styrene divinylbenzene copolymer containing quaternary ammonium groups. Its porous structure makes it a good choice for use in aqueous and non aqueous media. The macroreticular structure and pore size distribution imparts superior resistance to mechanical and osmotic shock.

AMBERLYST A26 OH is virtually inert in strong acids, concentrated alkalis, aliphatic and aromatic hydrocarbons, alcohols, ethers and other common solvents.

Properties

Physical form	Tan opaque spherical beads
Ionic form as shipped	Hydroxide (OH)
Concentration of active sites	≥ 0.80 eq/L
Moisture holding capacity	66 to 75% (OH form)
Shipping weight	675 g/L (42.1 lbs/ft ³)
Particle size	
Uniformity coefficient	≤ 1.45
Harmonic mean size	0.560 to 0.700 mm
Nitrogen BET	
Surface area	30 m ² /g
Average pore diameter	290 Å
Total pore volume	0.20 ml/g
Shrinkage	Water to acetone: 34%

Catalysis

AMBERLYST A26 OH is used to catalyze reactions such as aldol condensation and carbonylation where strongly basic catalyst is required. Its pore structure allows large molecules to enter and react on the basic groups.

Suggested Operating Conditions

Maximum operating temperature	60°C (140°F)
Minimum bed depth	1000 mm (39 inches) / 600 mm (24 inches)
Operating flow rate	1 to 5 BV/h (LHSV)
Pressure drop limitation	1 bar (15 psig) across the bed
Service flow rate	1 to 4 BV/h (0.125 to 0.5 gpm/ft ³)
Operating flow rate	1 to 4 BV/h
Regenerant concentration	1 N NaOH
Regenerant flow rate	1 to 4 BV/h
Rinse water requirement	4 to 10 BV (30 to 75 gal/ft ³)

Anexo D. (Continuación).

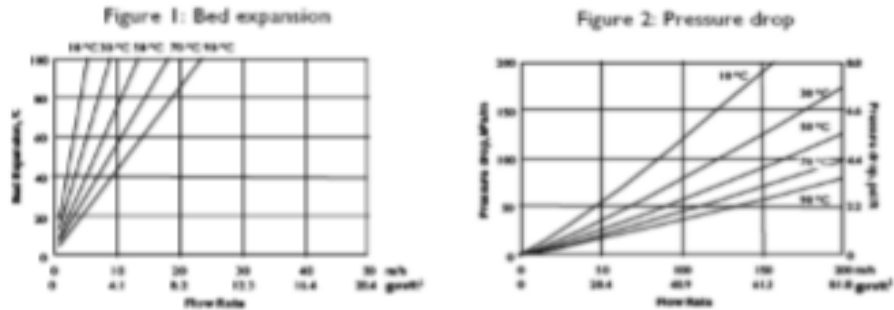
Separation technologies

AMBERLYST 26 OH is used to remove anionic transition metal complexes and mercaptans from hydrocarbons, acids from hydrocarbons and other non-polar solvents, oleic acid from chlorinated hydrocarbons and acids from phenol-acetone solutions. The macroreticular matrix provides large pores presenting a sponge like structure. This feature combined with its strong basicity permits the removal of large size soluble organic molecules.

Hydraulic Characteristics

Figure 1 shows the bed expansion of AMBERLYST A26 OH as a function of backwash flow rate and water temperature.

Figure 2 shows the pressure drop data for AMBERLYST A26 OH as a function of service flow rate and water temperature.



LENNTECH
info@lennotech.com Tel. +31-152-610-900
www.lennotech.com Fax. +31-152-616-289

Notice: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



Fuente: DOW. Amberlyst A26Y OH. Países Bajos (2020). pp.2. [Consultado agosto, 05].
Disponible en: <https://www.lennotech.com/Data-sheets/Dow-Amberlyst-A26-L.pdf>

ANEXO E. FICHA TÉCNICA RESINA AMBERLITE IRA-67.



Product Data Sheet



AMBERLITE™ IRA67 Ion Exchange Resin

Gaussian, Acrylic, Gel, Weak Base Anion Exchange Resin for Industrial Demineralization Applications

Description

AMBERLITE™ IRA67 Ion Exchange Resin is a general-purpose demineralization resin with a long-established track record of reliable performance in the industry. This resin offers a good balance of high capacity, high stability and organic fouling resistance for co-flow regenerated systems in industrial water treatment.



Weak base anion resins are well-suited for use with strong base anion resins to improve overall efficiency and throughput of a demineralization system. Acrylic weak base anion resins effectively remove mineral acids as well as carbon dioxide and organics, reducing the ionic load on the strong base anion resin and also protecting it from organic fouling. The weak base anion resin increases a system's overall capacity to remove organics.

AMBERLITE IRA67 has exceptional physical stability and organic fouling resistance. The hydrophilic acrylic structure provides unique chemical and physical properties enabling the resin to be operated under continuous high load of natural organic compounds when temperatures do not consistently exceed 35°C (95°F).

Applications

- Demineralization, ideally when treating water with:
 - High organic fouling potential
 - High percentage of mineral acidity (FMA)
 - Relatively high remaining carbon dioxide content
 - System layouts without a degasifier

System Designs

- Co-current

Anexo E. (Continuación).

Typical Physical and Chemical Properties**

Physical Properties	
Copolymer	Crosslinked acrylic
Matrix	Gel
Type	Weak base anion
Functional Group	Tertiary amine
Physical Form	White, translucent, spherical beads
Chemical Properties	
Ionic Form as Shipped	Free base (FB)
Total Exchange Capacity	≥ 1.60 eq/L (FB form)
Water Retention Capacity	56.0 – 62.0% (FB form)
Particle Size	
Particle Diameter †	500 – 750 µm
Uniformity Coefficient	≤ 1.80
< 300 µm	≤ 1.0%
> 1180 µm	≤ 5.0%
Stability	
Whole Uncracked Beads	≥ 95%
Swelling	FB → HCl ≤ 20%
Density	
Particle Density	1.07 g/mL
Shipping Weight	650 g/L

† For additional particle size information, please refer to the [Particle Size Distribution Cross Reference Chart](#) (Form No. 177-01773).

Suggested Operating Conditions**

Temperature Range (FB form)	5 – 60°C (41 – 140°F)
pH Range	
Service Cycle	0 – 6
Stable	0 – 14

For additional information regarding recommended minimum bed depth, operating conditions, and regeneration conditions for [separate beds](#) (Form No. 177-03729) in water treatment, please refer to our Tech Fact.

Hydraulic Characteristics

Estimated bed expansion of AMBERLITE™ IRA67 Ion Exchange Resin as a function of backwash flowrate and temperature is shown in Figure 1.

Estimated pressure drop for AMBERLITE IRA67 as a function of service flowrate and temperature is shown in Figure 2. These pressure drop expectations are valid at the start of the service run with clean water and a well-classified bed.

Figure 1: Backwash Expansion

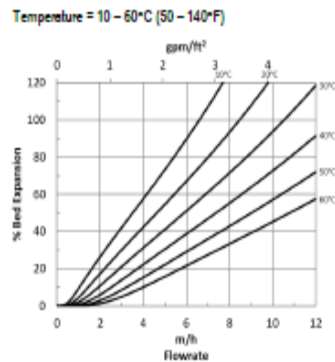
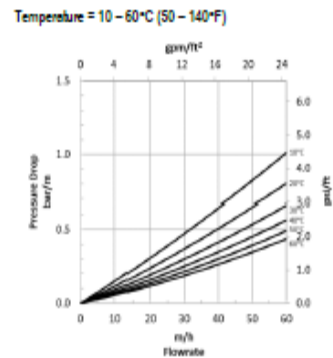


Figure 2: Pressure Drop



Anexo E. (Continuación).

Product Stewardship

Dow has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products—from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

LENNTECH

info@lenntech.com Tel. +31-152-610-900
www.lenntech.com Fax. +31-152-616-289

WARNING: Oxidizing agents such as nitric acid attack organic ion exchange resins under certain conditions. This could lead to anything from slight resin degradation to a violent exothermic reaction (explosion). Before using strong oxidizing agents, consult sources knowledgeable in handling such materials.

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

*All information set forth herein is for informational purposes only. This information is general information and may differ from that based on actual conditions. Please note that physical properties may vary depending on certain conditions and while operating conditions stated in this document are intended to lengthen product lifespan and/or improve product performance, it will ultimately depend on actual circumstances and is in no event a guarantee of achieving any specific results. Nothing in this document should be treated as a warranty by Dow.



ANEXO F. FICHA TÉCNICA RESINA AMBERSEP 900 OH.

ROHM|HAAS 

LENNTECH Water treatment and Air purification

LENNTECH

info@lennotech.com

www.lennotech.com

Tel. +31-15-261.09.00

Fax. +31-15-261.62.89

AMBERSEP® 900 OH

Strong Base Anion Exchanger

PRODUCT DATA SHEET

AMBERSEP 900 OH is a strongly basic, macroreticular, Type I, quaternary ammonium anion exchange resin specially sized for use in Ambersep resin systems. Its patented macroreticular structure provides the ultimate in physical stability, making Ambersep 900 resin perfect for physically demanding applications such as high-flow rate

condensate polishing. Ambersep 900 resin has a styrene-divinylbenzene polymer matrix which imparts the chemical stability needed for high purity, regenerable mixed bed applications such as the production of ultrapure water for semiconductor manufacturing.

PROPERTIES

Matrix	Styrene-divinylbenzene copolymer
Functional Groups	Type I quaternary ammonium
Physical Form	Light tan opaque beads
Ionic Form as Shipped	Hydroxide
Total Exchange Capacity	0.8 meq/ml minimum (OH ⁻ form)
Moisture Holding Capacity	66 to 76 % (OH ⁻ form)
Shipping Weight	42 lbs./ft ³
Uniformity Coefficient	1.4 maximum
Screen Grading (wet)	16 to 48 mesh (US Std Screens)
Screen Analysis	5 % maximum on 16 mesh (US Std Screens)
	0.5 % maximum thru 48 mesh (US Std Screens)
Maximum Reversible Swelling	Cl ⁻ → OH ⁻ : approximately 20 %

Test methods are available on request.

SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

pH Range	0 to 14
Maximum Operating Temperature	140 °F (OH ⁻ form) / 170 °F (Cl ⁻ form)
Minimum Bed Depth	24 inches
Service Flow Rate	1 to 3 gpm/ft ³
Service Flow Rate (Linear Velocity)	10 to 60 gpm/ft ²
Regenerant (100% basis)	NaOH
Level	4 to 10 lbs./ft ³
Concentration	2 to 4 %
Flow Rate	0.25 to 1.0 gpm/ft ³
Minimum Contact Time	90 minutes
Slow Rinse	15 gal/ft ³ at regeneration flow rate
Fast Rinse	50 to 60 gal/ft ³ approximate

Anexo F. (Continuación).

LIMITS OF USE

AMBERSEP 900 OH is suitable for industrial uses. For all other specific applications such as pharmaceutical, food processing or potable water applications, it is recommended that all potential users seek advice from Rohm and Haas Company in order to determine the best resin choice and optimum operating conditions.

HYDRAULIC CHARACTERISTICS

Figure 1 shows the pressure drop data as a function of service flow rate and water temperature. Figure 2 shows the bed expansion of AMBERSEP 900 OH, as a function of backwash flow rate and water temperature. Pressure drop data are valid at the start of the service run with clear water and a correctly classified bed.

Fig. 1: Pressure Drop

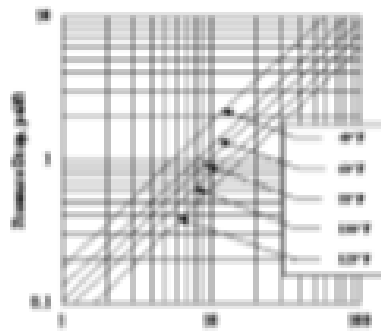
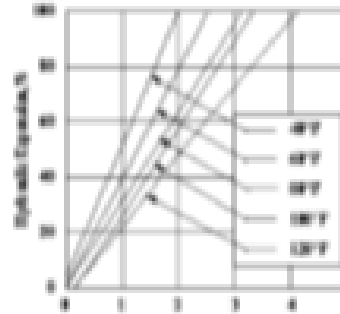


Fig. 2: Bed Expansion



ROHM/HAAAS

AMBERSEP is a trademark of Rohm and Haas Company and its affiliate, Philadelphia, USA.

Ambersep resins and polymeric adsorbents, in product, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which his exchange resin and polymeric adsorbents, in product, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which his exchange resin and polymeric adsorbents, in product, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which his exchange resin and polymeric adsorbents, in product, contain by-products resulting from the manufacturing process.

Rohm and Haas Company makes no warranties either expressed or implied as to the accuracy or appropriateness of these data and expressly disclaims any liability upon Rohm and Haas arising out of it. We recommend that the user determine for themselves the suitability of Ambersep 900 OH for their application and purposes. We make no representation as to the value or utility of these data.

LENNTECH Water treatment and Air purification

Fuente: ROHM AND HAAS. Ambersep 900 OH. Países Bajos (2020). pp.2. [Consultado agosto, 05]. Disponible en: <https://www.lennotech.com/Data-sheets/Rohm-&-Haas-Ambersep-900-OH-L.pdf>

**ANEXO G.
COTIZACIÓN RESINA AMBERSEP 900 OH.**

	Modelo	Marca	Cantidad	Precio/Unidad	Total	Tiempo de entrega
1	Amberlite HPR900 OH Ion Exchange Resin Ficha técnica	Dow	125 Litros	\$ 10.00	\$ 1,250.00	10-12 semanas por confirmar al momento de la orden
EX.A Export Document					\$ 100.00	
Precio Neto Total USD					\$ 1,350.00	

Destino Prospecto	Colombia
Cotización de referencia	KP-4823
Condiciones de pago	payment in advance
Condiciones de transporte	FCA Delfgauw, The Netherlands

Fuente: LENNTECH. Cotización resina Ambersep 900 OH. Países Bajos. (2020). pp.1. [Consultado junio, 10].

**ANEXO H.
FRECUENCIA DEL CONTROL INTERNO DE LOS PARÁMETROS.**

Parámetro	Frecuencia
pH.	Tres veces a la semana
	Tres veces a la semana
Temperatura	Tres veces a la semana
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Dos veces por Semana.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Dos veces por Semana.
Tensoactivos (Detergentes)	Semanal.
Sólidos Decantables (SD)	Tres veces a la semana
Oxígeno Disuelto (OD)	Tres veces a la semana
Caudal.	Tres veces a la semana

Fuente: elaboración propia, con base en PHARMETIQUE LABS S.A.