



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO, DEL PROCESO DE ÓSMOSIS
INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**

María Cristina Avendaño Quintana

Asesorada por el Msc. Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO, DEL PROCESO DE ÓSMOSIS
INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARÍA CRISTINA AVENDAÑO QUINTANA
ASESORADA POR EL MSC. ING. JORGE IVÁN CIFUENTES CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO, DEL PROCESO DE OSMOSIS
INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 20 de junio de 2022.

María Cristina Avendaño Quintana



EEPFI-PP-0783-2022

Guatemala, 20 de junio de 2022

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

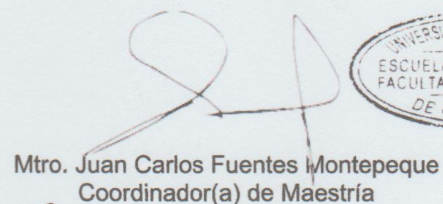
El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACION DEL ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO DEL PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y tratamiento del agua - Disposición final de efluentes líquidos**, presentado por la estudiante **María Cristina Avedano Quintana** carné número **200512274**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

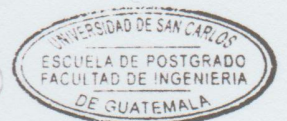
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

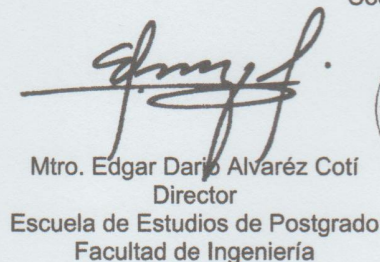
"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Jorge Ivan Cifuentes Castillo
Asesor(a)


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Jorge Ivan Cifuentes Castillo
Maestría en Ciencias Ingeniería Mecánica
Colegiado No. 34 R


Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP.EIQ.0783.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACION DEL ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO DEL PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**, presentado por el estudiante universitario **Maria Cristina Avedano Quintana**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

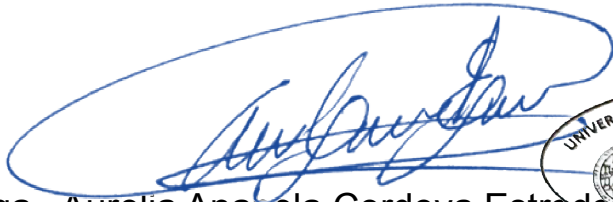
Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.
Director
Escuela De Ingenieria Quimica


Guatemala, junio de 2022

LNG.DECANATO.OI.076.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE RECHAZO, DEL PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA FARMACÉUTICA**, presentado por: **María Cristina Avendaño Quintana**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mi Hija	Diana Michelle Reyes Avendaño, por ser mi principal razón e inspiración para alcanzar esta meta. Te amo.
Mis padres	Marian Quintana y Carlos Avendaño, por su amor y apoyo a lo largo de todos mis años de estudio.
Mis abuelos	Que en paz descansen. Su amor y ejemplo son mi inspiración.
Mi familia	Por el cariño, apoyo y compañía que me han brindado siempre.
Mis amigos	Por su apoyo incondicional y todos los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios que permitió alcanzar este logro profesional.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos y herramientas para poder desarrollarme como profesional.
Laboratorio Farmacéutico	Por haberme brindado la información necesaria para realizar este diseño de investigación.
MSc. Ing. Jorge Iván Cifuentes	Por haberme guiado, apoyado y motivado antes y durante el trabajo de graduación.
MSc. Licda. Nandy Nufio	Por su ayuda y su tiempo a lo largo de la investigación.
MSc. Ing. Rodolfo Castro	Por su ayuda y su tiempo a lo largo de la investigación.
Familia, compañeros y amigos	Por su apoyo, solidaridad y cariño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.1. Problema a evaluar	15
3.2. Formulación del problema	16
3.3. Delimitación del problema	17
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVOS	21
5.1. General.....	21
5.2. Específicos	21
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	23
7. MARCO TEÓRICO.....	25
7.1. Calidad del agua.....	25
7.2. Proceso de purificación de agua	26

7.2.1.	Agua purificada en la industria farmacéutica.....	26
7.2.2.	Circuito de generación de agua purificada	28
7.2.2.1.	Sistema de pretratamiento de agua	28
7.2.2.2.	Sistema de tratamiento de agua.....	30
7.3.	Ósmosis inversa.....	34
7.3.1.	Ósmosis	34
7.3.2.	Ósmosis inversa.....	34
7.3.2.1.	Membranas de ósmosis inversa.....	36
7.4.	Aguas residuales.....	38
7.4.1.	Agua de rechazo de ósmosis inversa	39
7.4.2.	Caudal de descarga	39
7.4.3.	Calidad fisicoquímica del agua de rechazo	39
7.4.4.	Conductividad eléctrica	41
7.4.5.	Dureza.....	41
7.4.6.	Potencial de hidrógeno.....	42
7.4.7.	Temperatura.....	42
7.4.8.	Sólidos disueltos	42
7.4.9.	Color.....	43
7.4.10.	Turbidez	43
7.5.	Marco normativo	43
7.5.1.	Norma COGUANOR NTG 29001	43
7.5.2.	Guía de la Farmacopea de Estados Unidos.....	44
7.5.3.	Reglamento de aguas residuales para Guatemala.....	45
7.6.	Impacto ambiental.....	45
7.6.1.	Reúso de aguas de rechazo.....	46
7.6.2.	Dilución.....	47
7.6.3.	Concentración de sales y porcentaje de dilución	48
7.6.3.1.	Mezcla volumétrica.....	48

7.6.4.	Alternativas de reúso	49
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	51
9.	METODOLOGÍA.....	55
9.1.	Características del estudio	55
9.2.	Unidades de análisis	56
9.3.	Variables.....	56
9.4.	Fases del estudio	60
9.4.1.	Fase uno: revisión bibliográfica	60
9.4.2.	Fase dos: toma de muestras y recolección de información	61
9.4.3.	Fase tres: análisis de información y realización de dilución.....	61
9.4.4.	Fase cuatro: realización de dilución y evaluación de muestras	62
9.4.5.	Fase cinco: interpretación de información	62
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	63
11.	CRONOGRAMA.....	65
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	67
	REFERENCIAS	69
	APÉNDICES	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Agua para usos farmacéuticos.....	27
2.	Sistema de pretratamiento, tratamiento y generación de agua purificada.....	33
3.	Esquema que representa la ósmosis, el estado en equilibrio y la ósmosis inversa.....	35
4.	Interior de una membrana de ósmosis inversa.....	38
5.	Cronograma de actividades.....	65

TABLAS

I.	Desglose de variables.....	57
II.	Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo de ósmosis inversa	58
III.	Caudal de descarga de agua de rechazo.....	58
IV.	Porcentajes de dilución de agua de rechazo y agua potable	59
V.	Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo diluida	59
VI.	Alternativas de aprovechamiento para el agua de rechazo diluida	60
VII.	Recursos necesarios para la investigación	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua
cm	Centímetro
°C	Grados Celsius
h	Hora
=	Igual que
L	Litro
m	Metro
m³	Metro cúbico
μ	Micra
μm	Micrómetro
μS	Micro siemens
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
%	Porcentaje
Q.	Quetzal
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez

GLOSARIO

Afluente	En hidrología, curso de agua que no desemboca en el mar, sino en otro río. En un proceso industrial, se refiere al flujo de agua que ingresa a un sistema de tratamiento con el propósito de cambiar las características.
Agua de rechazo	En todos los sistemas de ósmosis inversa, el agua de rechazo o agua residual es el agua que sale por el tubo que se conecta y la envía al desagüe luego de haber atravesado los filtros previos a las membranas.
Agua purificada	Agua que se somete a procedimientos de purificación acorde a los estándares internacionales de calidad y las normas oficiales del país.
Alternativas de reúso	Se refiere a las opciones viables que se pueden estudiar para reutilizar algún insumo que haya atravesado por un proceso productivo principal.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas
Color	En análisis de aguas, el color es un parámetro indicador de la calidad que indica el estado de la misma, así como el origen de una posible

contaminación. Está relacionado con las sustancias disueltas y partículas en suspensión que contiene.

Conductividad eléctrica Es una medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad que se relaciona con las propiedades de los sólidos disueltos en ella, que pueden ser sales o metales.

Dilución Consiste en disminuir la cantidad de soluto por unidad de volumen de disolución. Se logra adicionando más diluyente a la misma cantidad de soluto.

Efluente Líquido residual que fluye y sale de un sistema.

Manto freático Se forma por capas de agua libre que se acumulan en el suelo a una determinada profundidad, saturándolo.

MARN Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

Ósmosis Fenómeno físico relacionado con el movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable. Tal comportamiento supone una difusión simple a través de la membrana, sin gasto de energía.

RAT Recuento aeróbico total

Sólidos Disueltos	Medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma de minerales, metales y sales. Buen indicador de la calidad del agua.
Turbidez	Medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos en el líquido, mayor será el grado de turbidez.
U.S.	Siglas en inglés de United States. Estados Unidos.
USP	Siglas en inglés de United States Pharmacopea. Farmacopea de Estados Unidos de América.
UV	Ultra violeta.

RESUMEN

El presente diseño de investigación se realizó con el objetivo de buscar, estudiar y proponer alternativas de reúso para uno de los efluentes que tiene el sistema de tratamiento de agua purificada, producida en un laboratorio farmacéutico que la emplea para diferentes finalidades.

Dentro del laboratorio farmacéutico, la producción de agua purificada ha incrementado en los últimos meses y tendrá un aumento en los próximos años como consecuencia de un aumento en las actividades productivas internas, por lo que se consideró oportuno realizar este estudio y así tener información sobre las opciones con cierto grado de factibilidad, para reutilizar el agua que es descartada con cierto grado de tratamiento previo.

El principal objetivo es el análisis de alternativas de reciclaje del agua de rechazo, basado en los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos realizados, para conocer el estado del agua que es descartada por el sistema en la etapa de ósmosis inversa.

El proyecto describe una oportunidad de recuperar el agua descartada, para utilizarla en procesos internos complementarios que pueden trabajar sin problema, usando agua con algunos parámetros fisicoquímicos menos estrictos que los que exigen el agua purificada, para reducir la huella ambiental y recursos económicos.

Como primera parte se trabajó en la exploración de campo, bibliográfica y documental, para obtener la información necesaria para realizar el diseño de investigación.

Posteriormente se realizó el diseño de la metodología, en donde se establecieron las fases del proyecto, las herramientas y recursos necesarios, la calendarización y la manera de tratar las muestras de agua a analizar.

Como siguiente paso se procedió a analizar las muestras obtenidas, efectuando algunos análisis *in situ* y otros en laboratorio, para conocer la calidad fisicoquímica del agua de rechazo. Así también, se realizaron las estimaciones de porcentaje de dilución con el objetivo de reducir la cantidad de sales y minerales presentes en las muestras. Se efectuaron las diluciones establecidas y los análisis correspondientes.

La siguiente fase consistió en el procesamiento de los datos obtenidos, para constatar cuál será el porcentaje de dilución más adecuado que pueda producir agua para consumo en procesos complementarios.

Por último, se hizo un análisis de alternativas que puedan ser tomadas en cuenta para reciclar el agua de rechazo.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de agua purificada en la industria farmacéutica es el proceso más importante en la fabricación de medicamentos, desde el punto de vista de diseño, infraestructura, inversión, operación, desempeño, mantenimiento y monitoreo. A partir de esta materia prima se puede garantizar la calidad de los procesos y subprocesos que necesitan agua purificada, tales como la generación de agua de inyección, análisis de fisicoquímica y microbiología y procesos de limpieza. Además, para usarla como ingrediente para jarabes, cremas, aerosoles, suspensiones y soluciones de recubrimiento.

Este insumo se obtiene diariamente por medio de un circuito que comprende varias fases de tratamiento previo a la etapa final, que se trata de la purificación por ósmosis inversa y electrodesionización. El equipo de ósmosis inversa opera al filtrar el agua por medio de una presión mecánica, haciéndola pasar por membranas semipermeables para eliminar impurezas. El agua que no atraviesa las membranas es rechazada junto con las impurezas disueltas y se descarga al sistema de alcantarillado municipal.

El agua rechazada contiene una alta cantidad de sales minerales, por lo que podría clasificarse como agua residual; sin embargo, si esta recibe un tratamiento previo al proceso de ósmosis inversa, se puede deducir que los parámetros microbiológicos están dentro de un rango aceptable, y podría ser considerada como un recurso con potencial reutilizable.

El presente trabajo de investigación se enfoca en el problema de un laboratorio farmacéutico, que diariamente vierte aguas de rechazo en el drenaje

y no lo aprovecha para otros procesos complementarios. A partir de esto, se propone hacer una evaluación de la calidad del agua de rechazo y analizar las características fisicoquímicas básicas de interés, para establecer un porcentaje de dilución con agua potable, que permita mejorar las características de las aguas de rechazo y así poder reutilizarlas.

El reciclaje de las aguas de rechazo significaría un ahorro en el circuito de generación de agua purificada y ahorro en el costo de extracción del pozo. Además, prolongaría la vida útil de la fuente de abastecimiento para un uso más consciente y responsable del recurso. También tendría la oportunidad de evaluar otros sistemas en donde pueda existir reutilización, con lo cual se promueve el desarrollo de la gestión integral del agua dentro de la empresa. El aprovechamiento de las aguas de rechazo también beneficiaría a la conservación del manto freático del área alrededor.

Con los resultados obtenidos se espera conocer la calidad fisicoquímica de las aguas de rechazo, saber los parámetros más relevantes necesarios de modificar y controlar, para proponer alternativas de aprovechamiento de este recurso.

En el capítulo uno, en la fase de exploración documental, se procederá a efectuar investigaciones bibliográficas para conocer los requisitos de las normativas bajo las cuales trabaja el laboratorio farmacéutico; normativos internos de operación, conocer los fundamentos teóricos sobre purificación de agua y reúso de agua de rechazo y, también, se investigarán proyectos similares efectuados con anterioridad para tener antecedentes de posibles soluciones y resultados.

En el capítulo dos, en el trabajo de campo, se realizarán preguntas al personal encargado acerca de las condiciones reales de operación, horarios de funcionamiento del equipo y demás información necesaria para dar mayor soporte al estudio. En esta fase se procederá a efectuar la toma de muestras, mediciones *in situ* y los análisis de laboratorio correspondientes.

En el capítulo tres se llevará a cabo el procesamiento de datos, se analizarán los resultados obtenidos de las variables establecidas, lo cual permitirá conocer la calidad del agua de rechazo y la viabilidad de reciclarla por medio del proceso de dilución. Esta fase también constará de los resultados obtenidos de la mezcla diluida de agua potable y agua de rechazo, experimentalmente.

Por último, en el capítulo cuatro, con base en los resultados obtenidos, se describirán las opciones de aprovechamiento del agua de rechazo y el establecimiento de los parámetros necesarios de modificar y controlar. Y a partir de este procedimiento, se establecerán las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

2. ANTECEDENTES

A lo largo de muchas décadas, los seres humanos no han valorado el recurso hídrico porque creían que siempre se tendría acceso a este vital líquido de manera constante y sin mayores limitaciones.

Zarza (2016) advierte que:

El agua ha sido considerada hasta hace no mucho como un recurso ilimitado. Nada más lejos de la realidad, factores como su irregular distribución geográfica, el aumento de la temperatura global, la creciente demanda de agua o el progresivo deterioro de las aguas superficiales y subterráneas, lo han convertido en un factor limitante para el desarrollo económico. Según el Banco Mundial, para el año 2050 más de 1 billón de personas vivirán en ciudades sin suficiente cantidad de agua; Y con este panorama, no es de extrañar que la reutilización del agua se haya convertido, en la actualidad, en un tema crucial dentro del sector. Hoy en día son cada vez más los países que consideran la reutilización del agua como un elemento fundamental de sus políticas hídricas. (p. 1)

Ante tal situación y en cualquier ámbito, es necesaria la reutilización y el aprovechamiento del agua obtenida de las fuentes primarias para un determinado uso, pero que, más allá del uso principal, es posible destinar este recurso para otra función previo a su descarte. Realizar esta acción en la mayor cantidad de operaciones, significaría un importante aporte a la gestión integral del recurso hídrico.

El descarte de los efluentes en cualquier planta industrial es parte importante para la gestión ambiental y del proceso productivo como tal. Además, el agua en sus diferentes calidades es parte esencial en cualquier industria y, por lo tanto, es necesario procurar un uso responsable y consciente, así como una descarga adecuada y, siempre que sea posible, considerar los posibles reúsos.

En la actualidad, se ha encontrado mayor información sobre reuso de aguas de rechazo a nivel internacional que nacional. Estos estudios han sido de utilidad para tener una base y guía para este trabajo de investigación, sobre las posibles alternativas de reciclaje del agua de rechazo de la ósmosis inversa para la purificación de agua. Sin embargo, únicamente son pequeños indicios sobre lo que se puede esperar de este estudio, ya que el agua tiene propiedades diferentes, dependiendo de las fuentes de donde se obtenga, los procesos que ha atravesado y los parámetros establecidos por las reglamentaciones de cada lugar.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco, en inglés), en la octava fase del Programa Hidrológico Internacional llamado *Seguridad hídrica, respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales*, analiza la situación de una manera global. Muestra datos estadísticos más representativos a nivel mundial, en donde se puede ver a mayor escala las consecuencias de la falta de atención y acción en cuanto a procurar, en la mayor medida posible, dar reuso a las aguas residuales y así contrarrestar los daños a mediano y largo plazo, tanto en términos económicos, como ambientales y sociales.

Casi el 85 % de las aguas residuales internacionales se descargan sin ningún tipo de tratamiento, lo cual tiene efectos negativos en la salud

pública y el ecosistema natural. El número de muertes atribuidas tan sólo a saneamiento e higiene deficientes alcanza los 1.6 millones de defunciones anuales. Implica un gran desafío el poder ejecutar soluciones sustentables y resilientes para los recursos hídricos y el saneamiento, particularmente en las áreas urbanas. El modelo actual de manejo de recursos hídricos urbanos y su respectiva infraestructura se remonta a 200 años atrás, lo cual es alarmante desde el punto de vista de que esta gestión es pilar de suma importancia para la salud humana. (Unesco, 2021, p. 10)

De lo anterior, se deduce que la problemática de la gestión del recurso hídrico es un tema que ha tenido lugar a lo largo de varias generaciones. Cada vez son más grandes y riesgosas las consecuencias que se tienen por un manejo poco sustentable, que afectan a nivel global a sectores de toda índole y en diferentes aspectos como el económico, social y de salud.

La Unesco (2021) también menciona que:

La dinámica y siempre creciente presión a escala internacional y regional, aunada a una herencia de manejo no sustentable de los recursos hídricos, provocarán que las generaciones futuras enfrenten problemas para manejar recursos hídricos escasos y menos confiables para satisfacer las necesidades de agua en las áreas urbanas, rurales e industriales. Los sistemas hídricos enfrentan múltiples desafíos, pero se debe enfocar en las oportunidades potenciales que hay en los países en desarrollo, para mejorar el abasto, distribución y uso eficiente de los recursos hídricos. Esto permitirá identificar enfoques sustentables para el manejo de los recursos hídricos basados en lecciones

aprendidas, experiencias y vías seguidas provenientes de una gran parte de los países desarrollados. (p. 10)

Por lo tanto, a pesar de tener metas retadoras por cumplir en cuanto al uso sustentable del recurso hídrico, es importante tomar nota de las propuestas e implementaciones de gobiernos y organizaciones que están más avanzados en el estudio de las oportunidades de mejora en el manejo del agua, para tener claro a dónde enfocar los recursos e inversiones que se tenga pensado ejecutar.

A nivel nacional, aún hay bastantes oportunidades de estudios en cuanto al tema de reciclaje de aguas residuales de tipo especial. Sin embargo, sí se cuentan con algunos datos recopilados por entidades que tienen entre sus finalidades estudiar y analizar el estado del recurso hídrico en el país, principalmente a nivel público, pero los resultados de estos estudios realizados no son del todo satisfactorios.

El Gobierno de la República de Guatemala y la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (2006) indica:

El sistema nacional de información no ofrece aún datos sobre la calidad del agua como recurso natural ni como bien socialmente intervenido. Como se estima que en el país solo alrededor del 5 % de las aguas residuales provenientes de los diversos usos reciben algún tratamiento (en general estas aguas son vertidas directamente en ríos, lagos y otros cuerpos de agua) y consecuentemente también se estima que en su mayoría las aguas superficiales del país están contaminadas. No existen redes de monitoreo de la calidad de aguas superficiales y subterráneas,

con excepción de algunos puntos estratégicos de la Empresa Municipal de Agua de la ciudad de Guatemala (EMPAGUA). (p. 17)

De lo anterior, se concluye que el tema de la evaluación de la calidad hídrica del país ha tenido poca prioridad dentro de los intereses gubernamentales. Lo que representa un obstáculo más por vencer para poder contar con datos actualizados, exactos, completos y accesibles, y así enfocarse en las mismas metas y objetivos. Sin embargo, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 ha sido una de las herramientas que juegan un papel crucial en conseguir lo anteriormente mencionado.

Los estudios acerca del tema de la calidad son puntuales, han sido realizados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), y por distintas universidades del país, incluyendo la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos (ERIS). Con la puesta en vigencia del Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y la Disposición de Lodos (2006), se han realizado esfuerzos serios y concretos para organizar un sistema nacional de evaluación de la calidad del agua del país, lo cual permitirá a la sociedad internalizar dentro de sus costos de producción y consumo las externalidades provocadas sobre el recurso y proveerá de las inversiones necesarias por controlar efectivamente la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. (Gobierno de la República de Guatemala y la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, 2006, p. 17)

La vigilancia y restricciones sobre el control de impactos ambientales que efectúan los distintos tipos de entes generadores en Guatemala, han presentado un incremento en los últimos años. Sin embargo, los esfuerzos por

llegar a las metas de cumplimiento aún deben superar muchos obstáculos. La industria es uno de los sectores que más se ve afectada y a la que se le adjudica una mayor responsabilidad para cumplir un acuerdo, que tiene como finalidad regular las descargas de aguas residuales. No obstante, esta regulación aún presenta condiciones muy por debajo de los requisitos normados a nivel gubernamental en otros países.

Es necesario que las entidades de toda índole se involucren en el cumplimiento de las metas correspondientes, para garantizar que las aguas disponibles sean administradas con un correcto y consciente aprovechamiento. Y así, pensar que en un futuro cercano se puedan proponer objetivos más sustentables que los actuales. Esto implicaría que las organizaciones deben mejorar sus procesos operativos de raíz. Y también podría repercutir en un diseño operacional, en donde se considere como factor importante el manejo adecuado del recurso hídrico.

Parte del mejoramiento de los procesos que involucran el consumo de agua, es la consideración del reciclaje de esta en la medida de lo posible. “La reutilización de las aguas desempeña un importante papel a la hora de hacer una planificación y gestión óptimas del uso eficiente de los recursos hídricos” (Zarza, 2016, p.1).

Para considerar la reutilización adecuada de algún efluente es necesario conocer las características principales del mismo, las cuales variarán dependiendo de los procesos de tratamiento y los usos para los que fue destinado el recurso como primera instancia. A partir de estas características, se pueden considerar las actividades para las cuales se puede reutilizar.

En este caso particular, las aguas de rechazo de ósmosis inversa están catalogadas como aguas residuales de tipo especial. Según las definiciones del Artículo No. 4 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), son “Aguas Residuales de tipo especial: las aguas residuales generadas por servicios públicos municipales y actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias y todas aquellas que no sean de tipo ordinario, así como la mezcla de las mismas” (p. 2).

Si bien el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del MARN indica que no está permitido diluir aguas residuales, se debe tener presente el Artículo 37 de dicho acuerdo, el cual indica lo siguiente: “Recirculación Interna: Todo ente generador podrá recircular las aguas residuales antes de que las mismas se viertan al cuerpo receptor. Dicha recirculación no se considerará como reúso ni estará sujeta a las disposiciones del presente Reglamento” (p.17). Por tal razón, en la presente investigación únicamente se van a considerar las aguas de rechazo de ósmosis inversa como agua residual, cuando esta sea descargada al alcantarillado público.

Según trabajos de investigación hechos con anterioridad y según la teoría sobre el comportamiento de los fluidos en la ósmosis inversa, es de esperar que las aguas de rechazo de este proceso tengan un alto concentrado de sales, ya que las membranas semipermeables que se utilizan en el proceso están diseñadas para impedir, en gran medida, el paso de las partículas disueltas en el agua de alimentación. “El permeado es la disolución que consigue atravesar la membrana. Mientras que el rechazo o concentrado es la disolución que no consigue atravesar la membrana semipermeable. Por ello, será más rica en la sal que la alimentación” (Aragón, 2016, p. 5).

La investigación de Rivera (2013) titulada *Implementación de un sistema de aprovechamiento de las aguas residuales del proceso de ósmosis inversa y plan de contingencia sísmico en Industrias Licoreras de Guatemala, Planta de agua pura Bepresa*, propone el reúso del agua concentrada de la ósmosis inversa, para reducir los costos de extracción de agua de los pozos y el aprovisionamiento de agua constante, debido a que:

Según Rivera (2013)

El desperdicio de agua de alta calidad, es un tema que en macro o micro consumo, perjudica el medio ambiente, y en la producción de la planta ya que este es por naturaleza de la producción la materia prima de la misma. (p.22).

En consecuencia, luego de analizar la situación se encontró que el problema principal es el desperdicio de agua residual en el proceso de ósmosis inversa, debido a la falta de seguimiento y mantenimiento del sistema. Por ejemplo, falta de mediciones, membranas en mal estado, extracción innecesaria del agua de pozo, falta de capacitaciones. A partir de esto, se realizaron las mediciones correspondientes de caudales y parámetros fisicoquímicos, los cuáles fueron comparados con los respectivos datos de la Norma COGUANOR; así también, fueron comparados con una simulación de membranas en buen estado. Esta medición reveló que el agua residual es apta para ser reutilizada en algunos servicios complementarios de la planta: “El análisis cualitativo para el uso del agua residual del proceso de ósmosis inversa es positivo, ya que se encuentra dentro de los parámetros que estipula la Norma COGUANOR NGO 29001”, señala (Rivera, 2013, p.108-109). Además, se concluye que los parámetros principales a controlar fueron el cloro residual, el potencial de hidrógeno, la turbiedad y la conductividad.

En el trabajo de investigación de Patiño & Campo (2021), titulado Propuesta para la reutilización de aguas de rechazo del sistema de purificación empleado en la empresa Casa del Agua en Santa Marta, se realizó una caracterización del sistema de purificación de ósmosis inversa, se diagnosticó el estado actual del sistema de purificación y se establecieron alternativas de reutilización de las aguas rechazadas por el sistema de purificación. Al haber efectuado los análisis fisicoquímicos correspondientes y hacer la comparación con los parámetros permisibles por las entidades gubernamentales, se llegó a la conclusión de que el agua de rechazo del sistema de purificación tiene altas concentraciones de sales, pero es posible trabajar con ellas luego de conseguir disminuir las concentraciones con diferentes estrategias. De esa manera, se utilizó dicho recurso para limpieza, riego en zona verde, retretes o bien para almacenamiento provisional durante épocas de escasez de agua.

Las aguas de rechazo del sistema de purificación empleado en la empresa Casa del Agua en Santa Marta, se pueden reutilizar para múltiples usos, teniendo en cuenta la normativa que aplica para cada uso. Dicha reutilización genera un aporte positivo al mitigar el impacto ambiental generado por este proceso industrial, se mejora dicho proceso industrial, se aprovecha al máximo un recurso que por tiempos es escaso, y también se disminuyen problemas asociados a lo antes mencionado, y que favorecen a la empresa, comunidad, medio ambiente y demás. (Patiño & Campo, 2021, p. 54)

Existen diferentes parámetros de operación que también pueden ser objeto de estudio y modificación, en el momento de buscar el punto óptimo de operación de un sistema de ósmosis inversa. Los principales serían la presión de flujo, temperatura de alimentación y pH.

Herrera (2007) explica que:

A medida que aumenta la presión, aumenta el caudal de permeado y el rechazo de sales es mayor manteniendo una temperatura constante. A medida que la temperatura de alimentación aumenta, el caudal aumenta y el rechazo de sales disminuye manteniendo presión constante. (p.5)

Esto fue determinado al analizar las propiedades fisicoquímicas del permeado en las diferentes condiciones. Estos datos son de utilidad para poder interpretar mejor el sistema en general y considerar que, al realizar el estudio, se tomen en cuenta las condiciones normales de operación del sistema, debido a que en este trabajo de investigación no será objeto de estudio la variación de las mismas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos meses se ha incrementado la producción de agua purificada debido a un incremento de los procesos productivos, lo cual genera una mayor cantidad de agua de rechazo de ósmosis inversa sin ser reutilizada.

3.1. Problema a evaluar

Desaprovechamiento de las aguas de rechazo del proceso de ósmosis inversa, que se utiliza para generar agua purificada en una planta farmacéutica de Villa Nueva, para otra actividad interna complementaria del proceso y que contribuya a reducir la generación y consumo de agua potable obtenida del pozo.

- Descripción

El sistema de tratamiento para obtener agua purificada, utilizada en una gran parte de los procesos productivos de una planta farmacéutica, tanto como excipientes de producto como subprocesos de manufactura y parte de los procesos de limpieza, genera agua de rechazo luego de haber pasado por el proceso de ósmosis inversa, la cual es producida en proporción 1:1 respecto del agua purificada obtenida.

Previo a que el agua de rechazo sea generada como residuo del proceso de ósmosis inversa, esta ya ha pasado por una serie de pasos de pretratamiento y tratamiento, para llegar a ser agua con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos controlados. En ese sentido, la principal

diferencia entre la calidad del agua de alimentación de ósmosis inversa y el agua de rechazo es la concentración de las sales; es decir, que para este punto del proceso se puede asumir que los parámetros microbiológicos del agua están bastante controlados, por lo que el principal punto de interés es evaluar la calidad fisicoquímica.

El mercado de medicamentos ha tenido alzas en los últimos años, lo cual se traduce en un incremento en la fabricación de productos ya existentes, creación de nuevas líneas de productos, ampliación de áreas de manufactura, ampliación de áreas de mantenimiento, implementación de turnos nocturnos y, por ende, mayor consumo de agua de todo tipo, principalmente agua purificada. Esto se nota por el aumento en el tiempo de operación del sistema de tratamiento de agua y, a su vez, aumento en las aguas de rechazo de ósmosis inversa, la cual es descargada en el drenaje. En consecuencia, altera las condiciones del agua del área y afecta de manera negativa la sostenibilidad del recurso hídrico, indispensable para la vida humana y sus actividades.

3.2. Formulación del problema

El planteamiento y descripción del problema, acerca del desaprovechamiento de las aguas de rechazo del proceso de ósmosis inversa, se formulará por medio de las siguientes preguntas:

- Pregunta central

¿Es posible utilizar el agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa, diluida con agua potable, como fuente de abastecimiento para otros procesos internos de la planta y reducir la descarga de agua parcialmente tratada?

- Preguntas auxiliares
 - ¿Cuáles son las características fisicoquímicas principales del agua de rechazo de ósmosis inversa?
 - ¿Es posible mejorar la calidad del agua de rechazo al efectuar una dilución con agua potable?
 - ¿Qué proporción de dilución sería la adecuada para obtener agua en condiciones aceptables para reúso?
 - ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos necesarios de monitorear en el reúso de la mezcla de agua?
 - ¿Cuáles son los posibles procesos complementarios, aptos para abastecerse de la mezcla de agua?

3.3. Delimitación del problema

Como causas principales del problema se desconoce la calidad fisicoquímica de las aguas de rechazo, por lo que no se pueden tomar decisiones sobre un posible aprovechamiento. Lo anterior causa poca eficiencia comparada a la que se podría tener en el circuito de purificación si estas aguas se reutilizaran, ya que es agua que ya ha recibido varias etapas de pretratamiento para tener cierta calidad. Como consecuencia, provoca un desperdicio en el recurso hídrico que podría conservarse mejor con un buen manejo y administración del mismo. También existe una pérdida económica en un sistema de agua que no se está explotando del todo, que repercute en la alteración de las características del manto freático a donde es descargada el agua de rechazo.

El proyecto de investigación se llevará a cabo en el sistema de generación de agua purificada y agua potable, del área de mantenimiento de un laboratorio farmacéutico ubicado en Villa Nueva, Guatemala, y se tomarán las muestras en el punto de descarga del equipo de ósmosis inversa.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se justifica en la línea de investigación de disposición final de efluentes líquidos de la Maestría en Energía y Ambiente, sabiendo que las aguas de rechazo de ósmosis inversa son consideradas como efluente líquido, debido a que sus características han sido alteradas por un proceso industrial.

Con este trabajo de investigación se aportarán mejoras al proceso de tratamiento de agua para uso farmacéutico, para intentar recuperar agua ya procesada en un 50%. Dado que, solo para llegar a la etapa previa a la ósmosis, el agua descartada ya posee un costo que incluye desde filtros multimedia, bombeo, resinas de intercambio iónico, dosificación de cloro y lámpara ultravioleta; Además, también implica muestreos y análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

Por lo anterior, se puede deducir que el agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa tiene características posibles de modificar de manera sencilla, como la dilución con agua potable, y así buscar alternativas para el reúso de este recurso.

Se obtendrán datos de las características fisicoquímicas del agua de rechazo, para estimar el porcentaje de dilución para hacer una mezcla volumétrica con agua potable y dirigirlo a procesos complementarios de la planta.

Este tratamiento del líquido beneficia la capacidad de regeneración del manto freático y sus niveles sostenibles, debido a que es un punto crítico a causa de las actividades humanas de diversa índole. Se busca promover la reutilización del recurso hídrico dentro de la operación industrial, y así tener un impacto positivo tanto en aspectos económicos de la empresa como en la conservación del agua de esta zona. Además, habrá disminución de descarga de aguas residuales de tipo especial.

Por aparte, este trabajo serviría como plan piloto y punto de partida para realizar otros estudios que cuenten con procesos, recursos y demás condiciones similares dentro del laboratorio.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar la calidad fisicoquímica del agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa, para búsqueda de alternativas de reúso.

5.2. Específicos

- Establecer un porcentaje de dilución de agua de rechazo y agua potable para un posible reúso.
- Verificar que el agua de rechazo diluida cuente con las condiciones necesarias del agua utilizada en los procesos internos complementarios.
- Identificar los parámetros fisicoquímicos más relevantes a controlar en la dilución del agua de rechazo de ósmosis inversa, para establecerlos como parámetros de control previos al reciclaje.
- Evaluar el reúso del agua de rechazo de ósmosis inversa mediante la aplicación de dilución con agua potable.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Uno de los insumos más importantes en cualquier industria es el agua con sus diferentes tratamientos y acondicionamientos. La industria farmacéutica no es la excepción, ya que el agua es la materia prima más importante para este negocio y es una de las industrias que más invierte en acondicionamiento de agua debido al uso que tienen sus productos. Dichos usos son desde medicamentos de uso tópico, medicamentos que se ingieren por vía oral, y los que se administran por vía intravenosa. Por esta razón se cuenta con distintas categorías de este recurso. El agua purificada se genera diariamente en una cantidad considerable, y también es descartada el agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa, la cuál es la última etapa del sistema de agua purificada.

Por lo anterior, se ha identificado la necesidad de buscar alternativas de aprovechamiento del agua de rechazo, que permitan dar una mejor eficiencia al sistema de generación de agua purificada y disminuir el caudal de descarga del efluente de ósmosis inversa.

El estudio que se va a realizar presentará información sobre la calidad fisicoquímica del agua de rechazo, el caudal promedio del agua de rechazo y un porcentaje de dilución viable para una reutilización del agua de rechazo. Además, se presentarán algunas características fisicoquímicas de la mezcla volumétrica de agua de rechazo y agua potable y, por último, se considerarán algunas propuestas de posibles alternativas de reúso de la mezcla de agua en procesos complementarios de la planta.

Al obtener los resultados anteriormente mencionados, se estará promoviendo una cultura de mejora y aprovechamiento de recursos en general dentro de la empresa. Se propondrán alternativas para contribuir con la reducción de la huella hídrica de los procesos productivos y, a la vez, proporcionar un plan de mejora para poder cumplir siempre con los requisitos gubernamentales acerca de la descarga de efluentes líquidos. La reutilización del agua de rechazo también se verá reflejada desde el punto de vista económico, al disminuir la extracción de agua de pozo, lo que representa un ahorro de energía, tiempo, mantenimiento de la bomba y garantía de que el recurso siga disponible en la fuente de abastecimiento.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Calidad del agua

Es un término utilizado para explicar de manera un poco más general la caracterización del agua, basado en análisis físicos, químicos y biológicos de una determinada muestra, con la finalidad de verificar el estado en el que se encuentra el líquido. “Tomando en cuenta que, por definición, la calidad es la expresión de un conjunto de características de un bien o servicio para enfrentar la satisfacción de un usuario o consumidor” (Rivera, 2007, p.10-11).

Esta información es de mucha utilidad. Es el punto de partida para establecer los usos a los que puede ser destinada el agua, así como el diseño de tratamiento y acondicionamiento requerido, para que el recurso cumpla con las especificaciones requeridas según el uso que se le dará.

El agua es uno de los insumos principales en la mayoría de procesos, tanto a nivel de la vida cotidiana como en procesos industriales y procesos de generación de energía, entre otros.

Para darle un uso óptimo a este recurso tan importante se han llegado a clasificar diferentes tipos de agua en función de su caracterización, al evaluar tanto parámetros físicos, químicos y biológicos como microbiológicos. En la mayoría de veces, para llegar a obtener los parámetros deseados para cierto proceso, se han diseñado diferentes tipos de pretratamientos y tratamientos para obtener las características idóneas.

En la industria farmacéutica el agua es utilizada en un sin número de actividades, que van desde la más sencilla como limpiar una pared o lavar un utensilio, hasta las más complejas como formar parte de los excipientes de una vacuna o algún otro tipo de solución administrada por la vía intravenosa.

7.2. Proceso de purificación de agua

El agua potable, la mayoría de veces, necesita pasar por etapas adicionales de tratamiento para poder considerarse como agua purificada.

7.2.1. Agua purificada en la industria farmacéutica

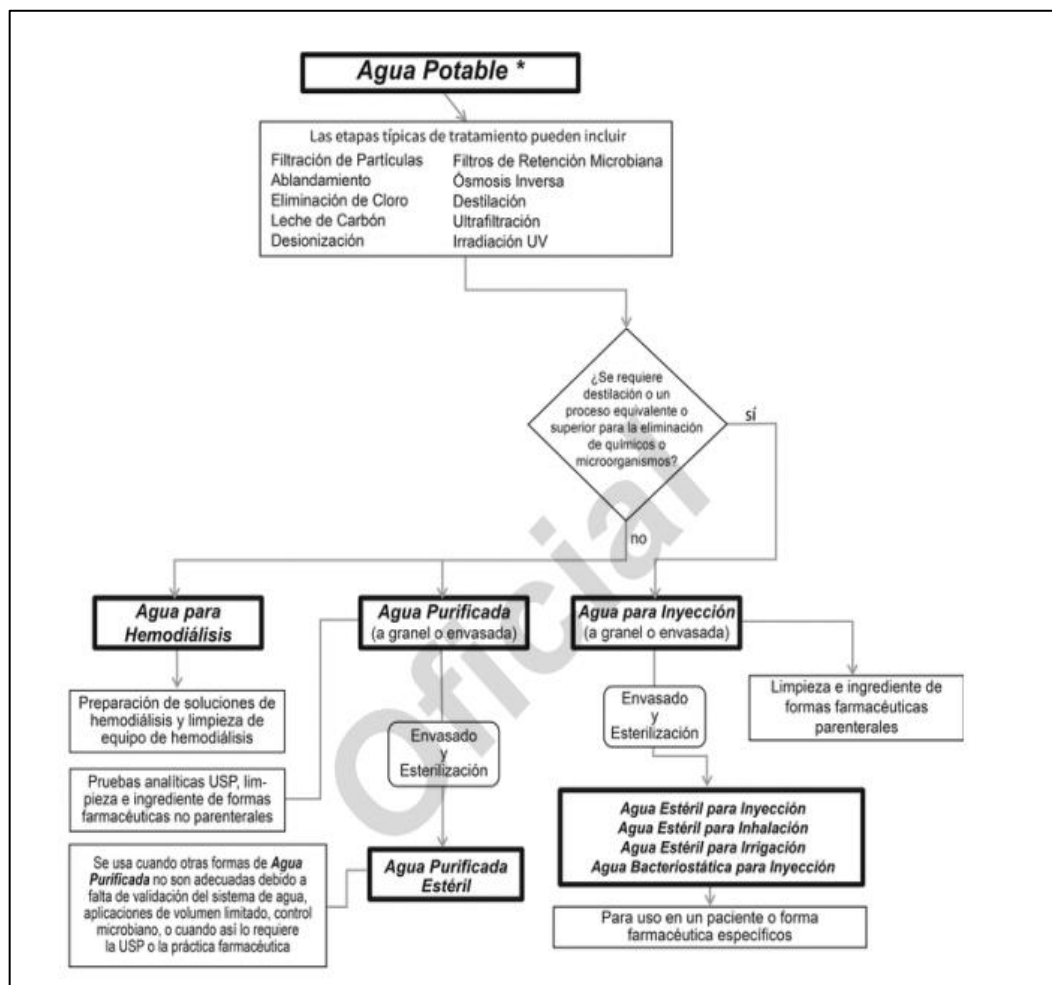
En la industria farmacéutica, el agua purificada tiene tal importancia que se ha catalogado como uno de los sistemas críticos a los que debe dar principal atención. Esto con la finalidad de garantizar una alta calidad, inocuidad y esterilidad dentro de los procesos de manufactura, procesos de limpieza de áreas y equipo y procesos complementarios como los de mantenimiento y de administración.

Todos los procedimientos principales del laboratorio buscan cumplir con los estándares de calidad en los cuales se desea mantener la empresa; así también, para cumplir con todas las normativas nacionales e internacionales a las cuales se debe regir, dependiendo de la criticidad de los productos, las cuales también toman en cuenta aspectos como el principio activo, acción terapéutica, forma farmacéutica, dosis terapéutica, toxicidad, entre otros.

La calidad mínima del agua fuente para la producción de Agua Purificada, es la del agua potable. Esta agua fuente puede purificarse

usando operaciones unitarias que incluyen la deionización, la destilación, el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la filtración u otros procedimientos de purificación adecuados. (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p.5)

Figura 1. **Agua para usos farmacéuticos**



Fuente: U.S. United States Pharmacopeial Convention 42 (2022). *Agua para uso farmacéutico*.

Capítulos Generales. Consultado el 16 de mayo de 2022. Recuperado de

https://online.uspnf.com/uspnf/document/4_GUID-07416921-813B-43A7-A494-

F190E610AD6F_7_es-ES

7.2.2. Circuito de generación de agua purificada

Para llevar a cabo el diseño de un sistema de purificación de agua, se deben considerar aspectos como “la calidad del agua fuente, la higienización, los atributos de calidad del agua para uso farmacéutico, los usos del agua y los programas de Mantenimiento” (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p.17).

Para conseguir lo mencionado anteriormente es necesario efectuar diversos tratamientos al agua, los cuales llevan una secuencia ordenada desde la obtención del agua de pozo propio, con profundidad de 214.88 m, el cual alimenta dos cisternas ubicadas en el área de Mantenimiento.

7.2.2.1. Sistema de pretratamiento de agua

El sistema de pretratamiento de agua consta de tres bombas hidroneumáticas de agua potable, un dosificador de cloro, un filtro multimedia para la retención de sedimentos y partículas mayores a los 30 μm , un filtro de carbón activado, torres aniónicas y catiónicas, conductímetros y lámparas ultravioleta.

En el sistema de pretratamiento se modifica la calidad del agua que alimenta el sistema de tratamiento, por medio de las siguientes etapas (Figura 2):

- Extracción de agua proveniente del pozo mecánico
- Almacenamiento en la cisterna uno

- Desinfección por medio de la dosificación de cloro en el agua de la cisterna para la eliminación de bacterias, microorganismos, esporas y virus presentes.
- Filtración previa. “También denominada filtración gruesa, de partículas o de profundidad; su función es eliminar los contaminantes sólidos provenientes del suministro de agua que ingresa al sistema y proteger a los componentes subsiguientes de partículas que pueden inhibir el desempeño del equipo” (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p.17).
- Filtro de carbón activado para la eliminación de olor, color, sabor, cloro y microorganismos presentes en el agua. “Se usan para lograr ciertos atributos de calidad y para proteger de ciertas reacciones a las operaciones unitarias, las superficies de acero inoxidable, las resinas y las membranas que están a continuación en el sistema” (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p.17).
- Desionización por medio de resinas de intercambio iónico, que elimina la presencia de cationes y aniones al bajar la conductividad a los valores establecidos en las normativas vigentes. El agua es conducida por el tanque de resina catiónica y el tanque de resina aniónica.
- Monitoreo en línea de la conductividad del agua
- Esterilización por medio de lámparas ultravioleta, para eliminar bacterias y virus presentes en el agua.

7.2.2.2. Sistema de tratamiento de agua

El sistema de tratamiento y generación de agua purificada cuenta con dos tanques de 1000L de capacidad cada uno, un dosificador de cloro, un filtro multimedia, un filtro de carbón activado, torres de intercambio iónico, dosificador de bisulfito de sodio y un dosificador de hidróxido de sodio. También cuenta con conductímetros para monitorear la conductividad en distintos puntos. El sistema también incluye lámparas UV, un filtro de 5 μ y membranas semipermeables. Además, posee distintas bombas como los son bombas sanitarias, bomba de agua potable, bomba de regeneración, bomba de alta presión, bomba de alimentación del EDI, bomba para desincrustación de membranas, bomba de alimentación de agua purificada, bomba de sanitización y, por último, un sistema de electrodesionización (EDI).

En el sistema de tratamiento y generación se modifica la calidad del agua que posteriormente alimentará el circuito de agua purificada, por medio de las siguientes etapas:

- Desinfección por medio de la aplicación de cloro dosificado en el tanque (de acero inoxidable) de 1000L de agua potable.
- Filtración por medio de arenas de cuarzo (filtro multimedia) para retención de sedimentos.
- Filtración por medio de carbón activado
- Reducción de los niveles del cloro por medio de la dosificación de bisulfito de sodio.

- Desionización por medio de resinas de intercambio iónico
- Filtrado de partículas mayores a 5 μ
- Esterilización por luz ultravioleta para combatir la formación microbiana.
- Filtración a presión por medio de membranas de ósmosis.
- Nivelación del pH con dosificación de soda cáustica.
- Esterilización por medio de luz ultravioleta, para disminuir el bioensuciamiento.
- Electrodesionización y clasificación del agua (en cumplimiento y no cumplimiento).
- Entrada del agua al tanque (de acero inoxidable) de 1000L de agua purificada.
- Esterilización por medio de luz ultravioleta

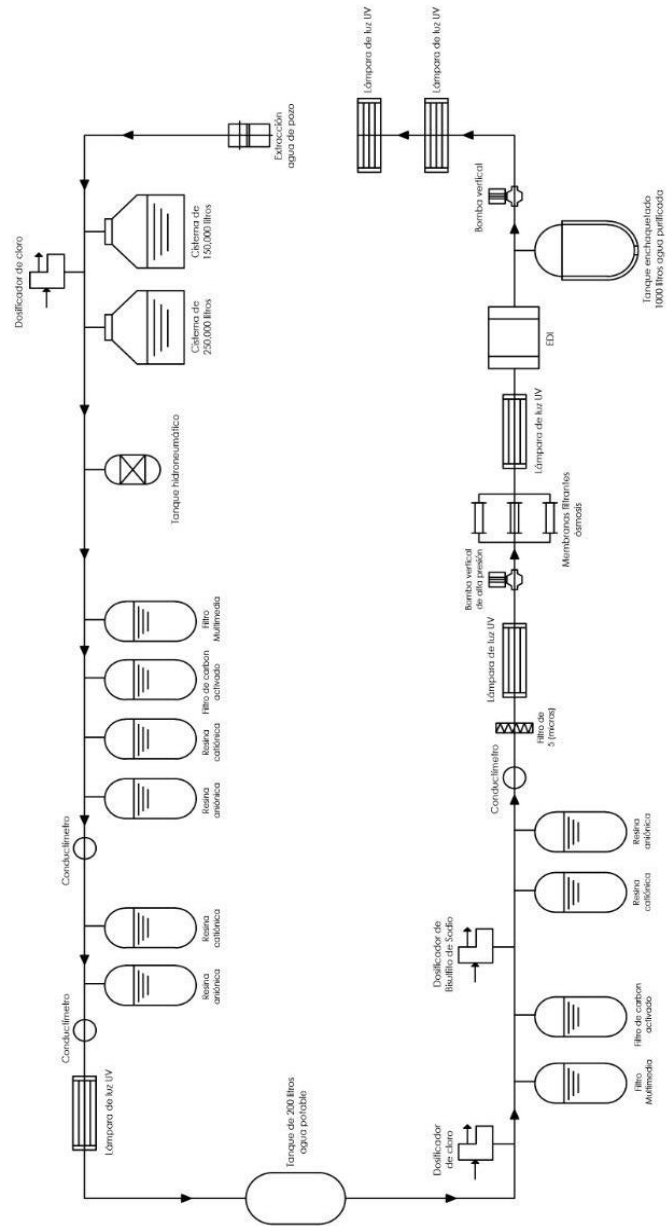
El control del circuito de agua purificada se encuentra en el piso técnico del área de Mantenimiento, que cuenta con puntos de uso ubicados en áreas de Producción. Este circuito se encuentra en recirculación las 24 horas del día, para disminuir la probabilidad de crecimiento de microorganismos.

Cabe mencionar que dentro de esta secuencia se encuentran algunos conductímetros, flujómetros y manómetros que indican el comportamiento de las operaciones de manera más puntual, que permiten mantener el sistema

dentro de los parámetros de operación adecuados. Además, también hay puntos de muestreo de agua que se monitorean diariamente, para realizar los análisis fisicoquímicos y microbiológicos respectivos.

Se cuenta con un total de nueve puntos de muestreo, ubicados desde el pozo hasta la primera etapa de agua tratada. Luego existen otros cuatro puntos de muestreo, que conforman los pasos de pretratamiento previo a que el agua pase por las membranas de ósmosis inversa, lo cual permite un control más puntual del rendimiento de cada paso, en función de la calidad del agua. “Cada una de las operaciones unitarias contribuye con atributos de purificación específicos relacionados con los parámetros físicos y microbiológicos” (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p.17).

Figura 2. Sistema de pretratamiento, tratamiento y generación de agua purificada



Fuente: diagramas internos del laboratorio. (Área de Validaciones, 2020). *Procedimiento de validación del sistema de agua para uso farmacéutico*. Consultado el 16 de mayo de 2022.

Recuperado de: confidencial.

7.3. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un tratamiento físicoquímico y uno de los procesos más utilizados en los sistemas de purificación de agua, ya que garantiza la eliminación de gran parte de partículas en suspensión.

7.3.1. Ósmosis

Es un proceso físico que ocurre cuando el solvente de una solución, menos concentrada, pasa a través de una membrana semipermeable a otra solución mayor concentrada, hasta igualar las concentraciones en las soluciones. La membrana semipermeable permite únicamente el paso del solvente (que es agua, en la mayoría de veces) y no del soluto. La ósmosis también ocurre de manera natural en varios casos de la naturaleza, siempre y cuando existan las dos soluciones con diferencia de concentraciones y la membrana semipermeable de por medio.

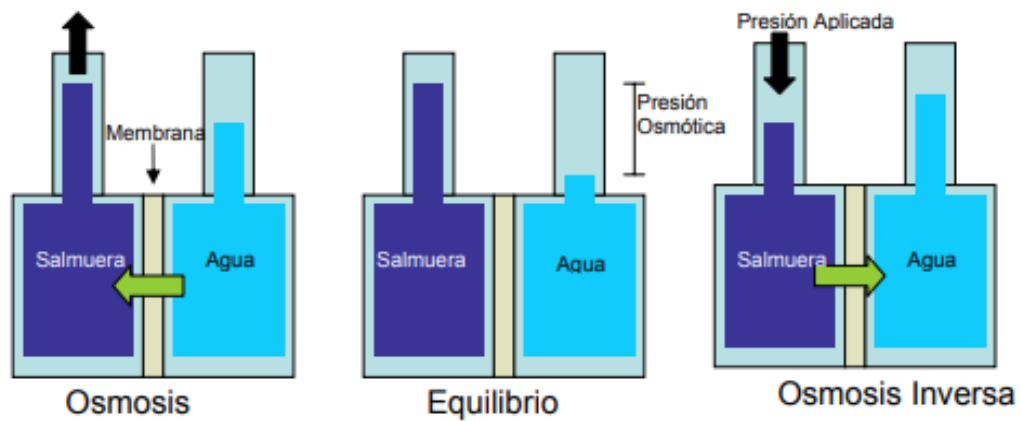
7.3.2. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa se da cuando el flujo del líquido o solvente ocurre en dirección contraria al proceso de ósmosis; es decir, de la solución de mayor concentración pasa solvente a la solución de menor concentración. Esto no ocurre de manera natural, “se logra aplicando una presión lo suficientemente alta en el lado de alta concentración. Este proceso, por lo tanto, es muy útil para filtrar aquellas partículas impermeables por la membrana” (Silva, 2006, p.5).

A la parte de la solución que atraviesa la membrana se le denomina permeado, mientras que a la parte de la solución que no logra atravesar la

membrana se le conoce como rechazo o concentrado. Esta última es más rica en sales que el suministro. (Aragón, 2016)

Figura 3. **Esquema que representa la ósmosis, el estado en equilibrio y la ósmosis inversa**



Fuente: Silva (2006). *Diseño de un Sistema de ósmosis Inversa Centrífugo Utilizando Diversas Metodologías de Diseño para la Innovación*. Consultado el 16 de mayo de 2022. Recuperado de <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567625>

El equipo de ósmosis inversa del laboratorio farmacéutico en estudio cuenta con dos membranas que operan a altas temperaturas. Previo a que el agua de suministro sea vertida al equipo, ya ha atravesado por los 13 puntos de monitoreo desde la salida del pozo, en donde se muestrea y analiza diariamente los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos:

- Recuento aeróbico total (RAT)
- Coliformes

- Dureza
- Sílice (se analiza dos veces al mes)

- Cloro residual

- pH

- Conductividad

Estos parámetros van a depender del punto de muestreo. Los más frecuentes a lo largo del sistema son el recuento aeróbico total y el pH.

7.3.2.1. Membranas de ósmosis inversa

“Las unidades de ósmosis inversa emplean membranas semipermeables. Los ‘poros’ de las membranas de ósmosis inversa son espacios intersegmentales entre las moléculas del polímero. Estos espacios son lo suficientemente grandes para la permeación de las moléculas de agua” (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p. 19). Y a la vez, tienen la capacidad de impedir el paso a una gran mayoría de iones químicos hidratados, compuestos orgánicos y microorganismos, con lo cual mejoran la calidad química y el contenido microbiano del agua que las atraviesa.

Muchos factores, incluyendo el pH, la temperatura, la dureza del agua fuente, la velocidad del flujo de permeado y rechazo y la presión diferencial a través de la membrana afectan la selectividad y efectividad de esta permeación. Las corrientes del proceso están formadas por agua de suministro, agua producto (permeado) y agua residual (desecho). (U.S. United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p. 19)

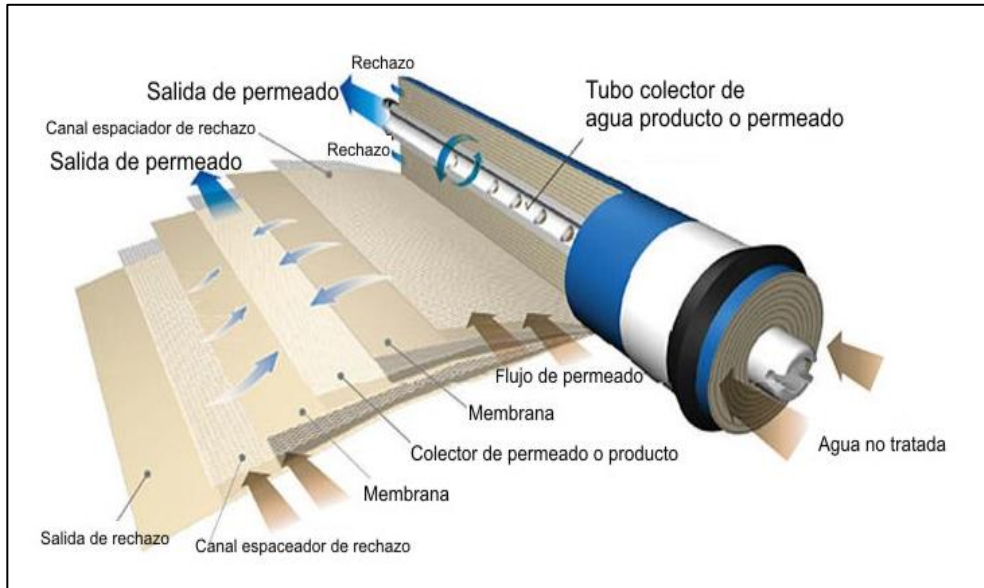
Dependiendo del agua fuente, puede haber variaciones en el pretratamiento y en la configuración del sistema; es por eso que cada diseño de tratamiento y pretratamiento se debe hacer según las características del agua fuente.

Las unidades de ósmosis inversa pueden emplearse solas o en combinación con unidades de desionización, para mejorar la operatividad y la calidad del agua.

El agua de suministro, al atravesar por las membranas con una presión mayor a la presión osmótica, obligará a las moléculas de agua a atravesar dichas membranas y se conducirán así al área de menor presión, en donde no podrán atravesar una gran cantidad de iones que quedarán disueltos en la parte de la solución denominada agua rechazo.

El nivel de esta presión está determinado por la concentración de iones en el flujo de suministro. Una membrana de ósmosis inversa consiste en una serie de capas de membrana y, en el borde de la membrana, las capas se sellan con una tapa. Toda el agua limpia pasa a través de los devanados en espiral y se acumula en un tubo de recolección de permeado. (Puritec, 2019. p. 1)

Figura 4. Interior de una membrana de ósmosis inversa



Fuente: Puritec de México Tratamiento de agua (2019). *Ósmosis inversa*. Consultado el 16 de mayo de 2022. Recuperado de <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/osmosis-inversa/>

7.4. Aguas residuales

Se les conoce así a las aguas que ya han sido destinadas para algún uso o actividad con cierta calidad y, que luego de dicho uso, su calidad se ha visto afectada generalmente de manera negativa. Y no puede ser reutilizada de manera inmediata para el mismo uso.

Es muy importante conocer las características de las aguas residuales, para tomar decisiones acerca de los posibles tratamientos que necesita para lograr la calidad que se desea, o bien para no reutilizarla. De igual manera, es necesario asegurar que las aguas que se descarten cumplan con las

normativas específicas de descarga, para asegurar que no representan un daño al ambiente y a la salud.

7.4.1. Agua de rechazo de ósmosis inversa

Esta agua está catalogada como agua residual porque ya tuvo un uso dentro del equipo, como la parte receptora de impurezas que no pasan a través de las membranas. Su función ha sido la de contener las impurezas, con lo cual se alteró la calidad que tenía cuando fue suministrada al equipo.

7.4.2. Caudal de descarga

Es importante conocer el caudal de descarga del agua de rechazo para contar con un promedio diario, el cual dependerá del programa de producción, que puede variar en cierta manera y en función de los productos a fabricar. El caudal de descarga va a ser directamente proporcional al caudal de permeado. Es decir, que los días que se genere mayor cantidad de agua purificada, mayor va a ser la cantidad de agua de rechazo. Se debe tomar en consideración un promedio, ya que no es lo mismo un día en el que se fabrique un lote grande de jarabes a un día en el que únicamente se elaboren tabletas y cápsulas, o un día de limpieza extraordinaria.

7.4.3. Calidad fisicoquímica del agua de rechazo

Además del caudal, otro dato clave en el análisis de alternativas de reúso es la calidad fisicoquímica del agua de rechazo, la cual indica datos como pH, turbidez, temperatura, sólidos disueltos, color y conductividad. Con el análisis anterior, se puede categorizar qué tipo de agua es y evaluar algún tratamiento

necesario previo al reúso o bien, determinar si es posible alterar los parámetros de manera efectiva, al realizar únicamente un proceso de dilución.

Villatoro (2018) indica que:

Para efectos de caracterización y evaluación de la calidad de un efluente, es necesario evaluar sus características físicas, químicas y biológicas y dependiendo de su procedencia puede realizarse análisis específicos y más profundos del efluente de interés; así, para una determinada industria, actividad comercial o una comunidad es necesario identificar los elementos de los procesos que forman parte de los desechos líquidos industriales y cuantificar los elementos que influyen directamente en la calidad del agua. (p.21)

La evaluación de la calidad del agua va a depender del proceso propio de cada sistema. También es posible tomar en cuenta ciertos parámetros previamente analizados en diferentes puntos dentro del proceso, los cuales sirven de guía sobre el comportamiento que va teniendo el agua en los diferentes pasos del sistema.

El agua de rechazo de ósmosis inversa es un agua residual en condiciones microbiológicas bastante controladas, debido a los tratamientos previos. Cabe mencionar que los equipos de ósmosis inversa requieren que el agua de suministro cumpla con bastantes especificaciones de calidad, a modo de prolongar la vida útil del mismo y no dañar las membranas ni demás partes que lo componen.

Es necesario implementar una metodología de análisis que represente en su totalidad las características del efluente en consideración, y que

tome en cuenta las actividades que se desarrollen dentro de las instalaciones que generan las aguas, de tal manera que se identifique la necesidad de un muestreo simple o compuesto. (Villatoro, 2018, p. 23)

En el caso de ésta investigación, se realizará un muestreo simple debido a los parámetros ya controlados previamente.

7.4.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua es una medida del flujo de electrones facilitado con iones. Las moléculas de agua se disocian en iones en función del pH y la temperatura, produciéndose una conductividad fácil de predecir. Algunos gases, especialmente el dióxido de carbono, se disuelven fácilmente en el agua e interactúan para formar iones, lo que también afecta la conductividad en forma predecible. (U.S. United States Pharmacopeia Convention, 2022, p.1)

La conductividad del agua es una manera de identificar la presencia de iones en la misma. Debido a que las membranas de ósmosis inversa actúan como medios filtrantes, al producir agua con una conductividad de aproximadamente 1.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el agua de rechazo permanece con una mayor cantidad de iones reflejados en una conductividad mucho más alta.

7.4.5. Dureza

Parámetro que permite identificar la presencia de compuestos minerales en el agua, específicamente los iones de calcio y magnesio; este parámetro va a depender mucho de la ubicación del agua fuente que se está utilizando. Y al igual que la conductividad, es un parámetro que tiende a tener una diferencia

considerable al comparar la dureza del permeado con la dureza del agua de rechazo. Esta última contendrá una gran cantidad de iones que le fueron removidos al agua de suministro.

7.4.6. Potencial de hidrógeno

Va a identificar específicamente los iones de hidrógeno presentes en el agua, y determinará la acidez o basicidad de la misma. Esto también es un indicador de qué tan malas o buenas condiciones presenta el agua para la reproducción de microorganismos, dependiendo qué tan cerca esté el agua de la neutralidad. Previo a que el agua pase por las membranas de ósmosis, esta ya ha pasado por una etapa de regulación del pH en las etapas de tratamiento.

7.4.7. Temperatura

Se debe realizar la medición de la temperatura de las muestras para relacionar esta con el resto de parámetros, debido a que tienen relación directa con el comportamiento que estos pueden presentar, ya que con un cambio de temperatura también puede haber variaciones sustanciales en el resto de resultados. Está sujeta también a la temperatura de operación del equipo de ósmosis inversa.

7.4.8. Sólidos disueltos

El total de sólidos disueltos (*Total Dissolved Solids*) es una medida del total combinado de sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un líquido. Esto incluye cualquier cosa presente en el agua que no sean las moléculas H₂O puras. Estos sólidos son principalmente minerales, sales y

materia orgánica que pueden ser un indicador general de la calidad del agua. (Puritec Tratamiento de agua, 2019, p.1)

7.4.9. Color

El color es uno de los parámetros que a simple vista da una idea general sobre la calidad del agua. Está relacionada tanto con la cantidad de sólidos disueltos como con la turbidez, ya que se evalúa el grado de transparencia del agua, y está contemplado también entre los parámetros de cumplimiento del Acuerdo Gubernativo No, 236-2006. (MARN, 2006)

7.4.10. Turbidez

Es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez. (Villatoro, 2018, p. 18)

7.5. Marco normativo

El manejo de agua de la empresa objeto de este trabajo de investigación se rige bajo tres normativas o parámetros.

7.5.1. Norma COGUANOR NTG 29001

Se debe regir bajo este normativo cuando se trata de obtener, tratar, almacenar, distribuir y usar agua para consumo humano (agua potable). El agua puede provenir de diferentes fuentes naturales como ríos, nacimientos, manantiales o pozos y pueden o no pasar por algún tratamiento previo por parte

de entidades públicas. Sin embargo, cualquier agua destinada para consumo humano debe cumplir con los requisitos establecidos en esta norma. (COGUANOR, 1999)

Para el caso de esta investigación no se considerará la totalidad de las características químicas indicadas en esta norma, ya que para las alternativas de reutilización se buscará únicamente una calidad primaria. Y no específicamente para consumo humano directo, a no ser que la relación de dilución sea tan baja que pueda tomarse como no significativa.

7.5.2. Guía de la Farmacopea de Estados Unidos

La United States Pharmacopeia (USP, en inglés), es una guía que establece un estándar de los métodos, operaciones y requisitos bajo los cuáles debe funcionar y operar un laboratorio farmacéutico. En sus monografías se encuentran estandarizados métodos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos, así como los parámetros principales a monitorear del agua purificada. (Nufio, 2022).

En la Farmacopea de Estados Unidos se encuentra información y parámetros importantes a tomar en cuenta acerca del agua para uso farmacéutico. El capítulo 1231 forma parte de los capítulos generales de la USP y “presenta información sobre los atributos de calidad del agua, así como técnicas de procesamiento que se pueden usar para mejorar la calidad del agua” (United States Pharmacopeial Convention 42, 2022, p. 3). Los requisitos expuestos en este capítulo promueven un estado de control que garantice la estabilidad operativa. Menciona puntos importantes en el mantenimiento de los equipos y áreas; además, explica cómo evitar la pérdida de condiciones del sistema que, de igual forma, se monitorea constantemente.

7.5.3. Reglamento de aguas residuales para Guatemala

En el país, toda descarga de cualquier tipo de aguas residuales debe cumplir con el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. El objeto de este reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Tiene la finalidad de proteger los cuerpos receptores de agua y promover una gestión integrada del recurso hídrico. El normativo aplica a los entes generadores de distintos tipos, personas que descarguen aguas residuales especiales, personas que reúsen aguas residuales y personas responsables del manejo de lodos. (MARN, 2006)

7.6. Impacto ambiental

Luego de describir los normativos y parámetros para el manejo de agua, ahora analizaremos el impacto ambiental. Se refiere al efecto que produce en el medio ambiente una actividad antropogénica y que puede alterar las condiciones naturales de manera significativa. El medio ambiente a nivel mundial ha experimentado un incesante cambio a lo largo de los años. Es por ello que en las últimas décadas se pone énfasis en mitigar las actividades que causan un mayor impacto ambiental. Se realizan cumbres, foros y hay organismos que aportan fondos para estudiar las principales causas y consecuencias, así como propuestas de alternativas y metas en los diferentes ámbitos. Algunos de esos organismos advierten lo siguiente:

Más de 2,300 millones de personas viven en países con escasez de agua, situación que probablemente empeorará en algunas regiones como resultado del cambio climático y el crecimiento de la población. La reutilización de las aguas residuales para recuperar agua, nutrientes o

energía se está convirtiendo en una estrategia importante. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022, p. 1)

Una de las principales razones y fuente de enfermedades es la falta de saneamiento de agua, lo que repercute directamente en la salud general de la población. En consecuencia, al alterar el manto freático con descargas de aguas residuales, el impacto se verá reflejado no solo en la salud, sino que a largo plazo será difícil darle tratamiento al agua para su acondicionamiento, con el propósito de tener la calidad deseada.

7.6.1. Reúso de aguas de rechazo

El agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa, utilizada para la producción de agua purificada, ha pasado por varias etapas de tratamiento previo, en donde se han eliminado o minimizado diversas impurezas contenidas inicialmente en el agua fuente. Previo a que el agua sea suministrada a las membranas, ya ha pasado por un filtro de 5 micras, para asegurar que todas las partículas disueltas sean menores a esta medida, y para darle una vida útil adecuada a las membranas.

El reúso de las aguas de rechazo de la planta farmacéutica en estudio, es un buen punto de partida para propiciar una mayor eficiencia en el balance de masas del proceso global. Esto disminuirá el rechazo generado por medio de una reutilización de una materia prima fundamental, que según los pronósticos será escasa en los próximos años.

“La gestión inadecuada de las aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas conlleva que el agua que beben cientos de millones de personas se vea peligrosamente contaminada biológica o químicamente” (OMS, 2022, p.1).

Por ello, es necesario evaluar alternativas de reutilización, lo cual permite la reducción de extracción de las aguas fuente, y también asegurar que las descargas impliquen una alteración mínima a los cuerpos receptores, para propiciar un desarrollo sostenible. “Cada vez se utilizarán más aguas subterráneas y aguas de fuentes alternativas, como las aguas residuales” (OMS, 2022, p. 1).

Sin ignorar que la reutilización de las aguas requiere procesos de tratamiento e infraestructura de regeneración, almacenaje y distribución, que encarecen los costes de su obtención, la convicción de no desperdiciar un recurso vital para la vida crea un entorno realista, que permite considerar la reutilización de las aguas como solución óptima para solventar los actuales y futuros problemas de la escasez de agua. (Zarza, 2016, p.1)

7.6.2. Dilución

Es “el proceso que consiste en agregar un volumen de agua con el propósito de disminuir la concentración en un efluente de aguas residuales” (MARN, 2006, p. 3).

Si bien el proceso de ósmosis tiene como finalidad eliminar impurezas químicas y biológicas, el agua de suministro presenta ya una calidad bastante aceptable para ser reutilizada. Sin embargo, sí es necesario eliminar las altas concentraciones de sales que contienen las aguas de rechazo. La reducción de estas concentraciones podría efectuarse con una dilución simple con agua potable, lo cual no está determinado como un tratamiento en sí, y no representa un gasto extra a la empresa, sino que busca redirigir una parte del agua potable a otro punto.

7.6.3. Concentración de sales y porcentaje de dilución

La concentración de sales minerales, que se encuentran en el agua de rechazo, será inversamente proporcional al porcentaje de dilución que se puede usar con determinada clase de agua. Es decir, que mientras más alta sea la concentración de sales, menor sería el porcentaje de dilución del agua de rechazo con agua potable, para tener una adecuada proporción y que los parámetros del agua diluida estén dentro del rango aceptable.

7.6.3.1. Mezcla volumétrica

La siguiente proporción se utilizará para encontrar las relaciones entre concentraciones y volúmenes de las tres soluciones

- V_r = Volumen agua de rechazo (L)
- C_r = Conductividad agua de rechazo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- V_p = Volumen agua potable (L)
- C_p = Conductividad agua potable ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- V_d = Volumen mezcla diluida (L)
- C_d = Conductividad mezcla diluida ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

$$V_r C_r + V_p C_p = V_d C_d$$

Al tener la conductividad del agua de rechazo, el agua potable y el dato de la conductividad deseada de la mezcla, así como el volumen promedio de rechazo y el volumen final de la dilución, se podrá encontrar el volumen de agua potable necesario para poder tener la conductividad dentro de rango deseado.

7.6.4. Alternativas de reúso

Al realizar la evaluación fisicoquímica del agua de rechazo y la evaluación de la mezcla volumétrica del agua de rechazo y agua potable, se obtiene el resultado de la calidad del agua de la solución efectuada. A partir de este resultado, es posible analizar los requisitos de calidad de agua que se requieren en actividades complementarias a los procesos de manufactura y limpieza de equipos y áreas.

La idea de la reutilización convierte el gasto en tratamientos en una inversión productiva, pues en lugar de desechar el agua de rechazo es posible retornar al proceso una parte del agua residual acondicionada para su reutilización. Este hecho tiene un efecto benéfico desde el punto de vista del consumo de agua potable. (Patiño y Campo, 2021, p.20)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calidad del Agua

2.2. Proceso de purificación de agua

2.2.1. Agua purificada en la industria farmacéutica

2.2.2. Circuito de generación de agua purificada

2.2.2.1. Sistema de pretratamiento de agua

2.2.2.2. Sistema de tratamiento de agua

2.2.3. Ósmosis inversa

2.2.3.1. Ósmosis

2.2.3.2. Ósmosis inversa

2.2.3.3. Membranas de ósmosis inversa

2.3. Aguas residuales

- 2.3.1. Aguas de rechazo de ósmosis inversa
- 2.3.2. Caudal de descarga
- 2.3.3. Calidad fisicoquímica del agua de rechazo
 - 2.3.3.1. Conductividad eléctrica
 - 2.3.3.2. Dureza
 - 2.3.3.3. Potencial de Hidrógeno
 - 2.3.3.4. Sólidos disueltos
 - 2.3.3.5. Color
 - 2.3.3.6. Turbidez
- 2.4. Marco Normativo
 - 2.4.1. Norma COGUANOR NGT 290001
 - 2.4.2. Farmacopea de los Estados Unidos de América
 - 2.4.3. Reglamento de aguas residuales para Guatemala
- 2.5. Impacto Ambiental
- 2.6. Reúso de aguas de rechazo
 - 2.6.1. Dilución
 - 2.6.1.1. Concentración de sales y porcentaje de dilución
 - 2.6.1.2. Mezcla Volumétrica
 - 2.6.2. Alternativas de reúso
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.3. Características del estudio
 - 3.3.1. Enfoque
 - 3.3.2. Alcance
 - 3.3.3. Diseño
 - 3.3.4. Unidad de análisis
 - 3.4. Variables
 - 3.5. Fases del desarrollo de la investigación

- 3.5.1. Fase uno
- 3.5.2. Fase dos
- 3.5.3. Fase tres
- 3.5.4. Fase cuatro
- 3.5.5. Fase cinco
- 3.5.6. Organización de la información
 - 3.5.6.1. Datos generales
 - 3.5.6.2. Datos específicos
- 3.6. Técnicas de análisis de la información
- 3.7. Cronograma
- 3.8. Factibilidad del estudio

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.3. Parámetros fisicoquímicos analizados del agua de rechazo
- 4.4. Establecimiento de porcentaje de dilución
- 4.5. Parámetros fisicoquímicos analizados de la mezcla diluida
- 4.6. Comparación de parámetros experimentales
- 4.7. Evaluación de alternativas de aprovechamiento
- 4.8. Establecimiento de alternativa de aprovechamiento
- 4.9. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación será de tipo cuantitativo-descriptivo. A partir de la evaluación de ciertos parámetros fisicoquímicos del efluente de ósmosis inversa se obtendrá la información necesaria para determinar la calidad del agua. Posteriormente, con los datos obtenidos y una relación de proporciones volumétricas, se analizará el porcentaje de dilución más adecuado para que la mezcla volumétrica contenga su calidad dentro de los rangos aceptables para una reutilización. Al haber realizado la dilución, se analizarán nuevamente los mismos parámetros evaluados a la primera muestra de efluente.

Todo lo anterior conducirá a trabajar un estudio de tipo lógico deductivo, considerando las variables de calidad del agua de rechazo. El paradigma será positivista a partir del conocimiento de la funcionalidad del sistema de ósmosis inversa y las características generales sobre el agua de suministro, el permeado y agua de rechazo. Se estudiarán variables cuantitativas con la finalidad de evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo y la mezcla diluida, para definir si la mezcla se puede reutilizar en procesos complementarios, al cumplir con la calidad necesaria.

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo y cuantitativo. La parte cuantitativa serán los datos fisicoquímicos de las variables medidas del agua. Estas variables serán continuas porque los datos de medición pueden tomar cualquier valor. La parte cualitativa corresponde a la clasificación del agua según la relación de las variables medidas; también incluye la comparación con

algunos de los parámetros ya establecidos en la Norma COGUANOR NGT 29001 y el análisis cualitativo de las alternativas de aprovechamiento. Estas variables cualitativas serán de tipo nominal, ya que la clasificación del tipo de agua o las alternativas de aprovechamiento no presentan un orden específico.

El alcance del estudio propuesto es descriptivo correlacional, dado que las características fisicoquímicas del agua tendrán relación directa con el porcentaje de dilución que se va a proponer. También tiene relación directa con las características finales de la mezcla diluida y las alternativas de reúso de la mezcla.

El diseño adoptado será experimental, pues la información del análisis de alternativas para el aprovechamiento del agua de rechazo se analizará en su estado original, sin ninguna manipulación. Además, será de tipo transversal, ya que en el momento de la toma de las primeras muestras se harán los análisis de laboratorio respectivos. El siguiente paso, será manipular la muestra por medio de dilución y realizar los análisis de la mezcla.

9.2. Unidades de análisis

El elemento en estudio será el agua de rechazo del equipo de ósmosis inversa del circuito de agua purificada, de donde se extraerán muestras de manera experimental en el punto de descarga, para obtener como resultado las características fisicoquímicas del agua y evaluar alternativas de aprovechamiento a partir de la calidad que tenga.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla I. **Desglose de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Calidad fisicoquímica del agua de rechazo	Es el conjunto de características fisicoquímicas propias del agua de rechazo, que determinan la calidad de esta.	Parámetros físicos y químicos del agua (específicamente dureza, pH, temperatura, sólidos disueltos, conductividad eléctrica, color y turbidez) y caudal de descarga
Porcentaje de Dilución	Porcentaje de solución concentrada que se puede agregar a un solvente para reducir la concentración inicial.	Cantidad de agua de rechazo destinada para reúso. Cantidad de agua potable necesaria para diluir el agua de rechazo.
Calidad fisicoquímica de la mezcla de agua de rechazo diluida.	Es el conjunto de características fisicoquímicas propias de la mezcla diluida, que determinan la calidad de esta.	Parámetros físicos y químicos de la mezcla diluida (específicamente dureza, pH, temperatura, sólidos disueltos, conductividad eléctrica, color y turbidez)
Alternativas de aprovechamiento	Opciones de procesos complementarios dentro de la planta, que sean capaces de utilizar el agua de rechazo diluida.	Análisis de resultados fisicoquímicos de la mezcla diluida y revisión de procesos que puedan utilizar este tipo de agua.
Parámetros fisicoquímicos de control	Parámetros que representarán una mayor variación o efecto en la calidad del agua, al variar las proporciones de la mezcla volumétrica	Parámetros necesarios de controlar o modificar para garantizar la calidad de la mezcla diluida

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Para realizar las mediciones se tomarán datos en condiciones iguales y se llenará la siguiente tabla para documentar los resultados:

Tabla II. **Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo de ósmosis inversa**

No. muestra	Temperatura (°C)	pH (-)	Dureza total (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Color (u)	Turbidez (NTU)

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Para la medición del promedio del caudal de rechazo se utilizará la siguiente tabla:

Tabla III. **Caudal de descarga de agua de rechazo**

Muestra	Caudal (m ³ /h)
1	
2	
3	
Promedio	

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Para calcular el porcentaje de dilución se utilizará la siguiente tabla; se tomará un volumen constante de muestra de mezcla y se calculará

teóricamente la conductividad, ya que es el parámetro que define de manera general la concentración de sales disueltas y es proporcional al porcentaje de dilución. Las variables X y Y se deducirán a partir de los resultados de la Tabla II y de la conductividad teórica de la Tabla IV.

Tabla IV. **Porcentajes de dilución de agua de rechazo y agua potable**

% Dilución	Volumen	Conductividad
X		
15%		
Y		

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Para hacer las mediciones de características fisicoquímicas del agua de rechazo diluida a X% se utilizará la siguiente tabla:

Tabla V. **Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo diluida**

No. muestra	Temperatura (°C)	pH (-)	Dureza total (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Color (u)	Turbidez (NTU)

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Para el análisis de alternativas del aprovechamiento de agua de rechazo diluida con agua potable se utilizará lo siguiente:

Tabla VI. **Alternativas de aprovechamiento para el agua de rechazo diluida**

Proceso	Tipo de agua requerida	Viabilidad de uso de mezcla diluida

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

9.4. Fases del estudio

A continuación se describen las fases del presente proyecto de investigación, en las cuales se realizará la toma de muestras, mediciones de caudal, entrevistas al personal de las distintas áreas del laboratorio farmacéutico como mantenimiento, validaciones y laboratorios de fisicoquímica y microbiología.

9.4.1. Fase uno: revisión bibliográfica

En la primera fase se hará una consulta de todas las bibliografías posibles, relacionadas con los temas principales de estudio: purificación de agua por ósmosis inversa, aguas de rechazo, sus características y estudios previos sobre la reutilización de este tipo de agua.

9.4.2. Fase dos: toma de muestras y recolección de información

En la segunda fase se tomarán datos *in situ* al personal operativo: horarios de uso del equipo de ósmosis, horarios de descarga y ubicación del punto de muestreo dentro del sistema. También se efectuará la medición del caudal experimental del rechazo, toma de muestras del agua de rechazo, medición de la temperatura y pH de las mismas, para posteriormente realizar las evaluaciones fisicoquímicas de conductividad eléctrica, color, turbidez, sólidos disueltos y dureza total.

El muestreo se hará de manera aleatoria. Se tomará una muestra puntual en un momento específico, según el horario y operación de descarga. El intervalo de cada muestra puede ser de 10 minutos aproximadamente. Al realizar la medición de campo se debe tomar inmediatamente la temperatura y la inspección visual de material flotante (si/no). Las muestras se van a recolectar en recipientes cerrados.

9.4.3. Fase tres: análisis de información y realización de dilución

En esta fase se tiene proyectado hacer un análisis de los resultados obtenidos, para conocer la relación que tienen entre ellos; determinar qué tan cerca o lejos están los parámetros respecto de lo indicado en la norma COGUANOR NGT 29001 para el agua potable. Y, a partir de esto, evaluar la viabilidad de efectuar una dilución de un porcentaje de agua de rechazo con agua potable, para tener mayores alternativas de reúso o bien destinar la mezcla realizada para un tipo de actividades que no tengan relación directa de consumo.

9.4.4. Fase cuatro: realización de dilución y evaluación de muestras

Luego de establecer el porcentaje de dilución más adecuado, se procederá a tomar nuevamente muestras de agua de rechazo, hacer la dilución respectiva y efectuar los análisis fisicoquímicos correspondientes a las muestras diluidas.

9.4.5. Fase cinco: interpretación de información

Con base en la información investigada, tanto del agua de rechazo como de la mezcla efectuada, se estudiarán las diferencias en las características evaluadas y se hará la comparación de parámetros por medio de gráficos y tablas. También se van a identificar los parámetros más relevantes a controlar en la dilución o que sean necesarios de modificar. Y, por último, identificar los procesos complementarios de la planta en donde se pueda utilizar la mezcla preparada.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para analizar y procesar la información recopilada del presente proyecto de investigación se utilizará la estadística inferencial, debido a que se obtendrá una serie de datos investigados, documental y experimentalmente, para conocer la elección de los parámetros de análisis seleccionados. Se evaluarán e interpretarán.

La información documental será el punto de referencia para interpretar los datos fisicoquímicos obtenidos, basándose en la norma COGUANOR NGT 29001 y en la farmacopea de Estados Unidos, para comprender mejor cuáles son los procesos previos del agua antes de llegar a tener la calidad necesaria para suministrar el equipo de ósmosis. También serán registrados ciertos datos técnicos del equipo y operación, según lo indicado por el personal de mantenimiento.

Los análisis fisicoquímicos del agua se llevarán a cabo en un laboratorio subcontratado, en donde se utilizarán métodos estándar para los análisis respectivos, con excepción de la temperatura y el pH, que se medirán al momento de tomar la muestra. En donde:

- El pH se medirá con un potenciómetro.
- La temperatura se medirá con un termómetro.
- El caudal también se medirá *in situ* con un recipiente de volumen conocido y un cronómetro.

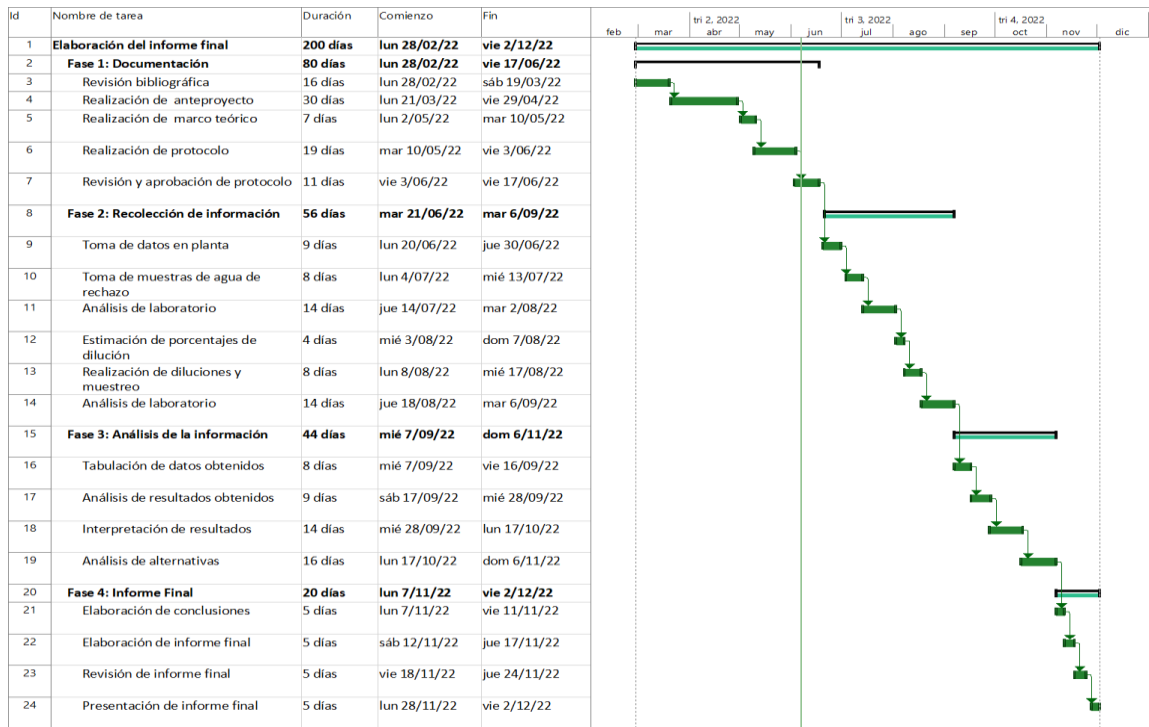
El propósito de utilizar la herramienta de la estadística inferencial es porque se hará la toma de las muestras de manera aleatoria. Al obtener los datos de los parámetros evaluados, se presentarán los resultados por medio de tablas y gráficas que permitan visualizar el comportamiento total. Se efectuarán gráficos comparativos entre algunas de las variables y entre las variables y las normativas.

Para el procesamiento de los datos obtenidos se utilizarán las medidas de tendencia central y dispersión. Se tomará el promedio y la desviación estándar para medir el grado de variabilidad de los datos obtenidos, y se estudiará la diferencia entre el agua de rechazo sin manipulación y la mezcla diluida.

El análisis de alternativas de reúso del agua de rechazo diluida se realizará de manera descriptiva, con base en los resultados de las fases anteriores de la investigación y con la consulta de datos generales de uso, así como la operación de las actividades complementarias que se llevan a cabo en la planta.

11. CRONOGRAMA

Figura 5. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Project 2019.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se ejecutará con recursos propios del estudiante. Se contará con recursos humanos, financieros, tecnológicos y acceso a información. A continuación, el detalle de los recursos.

Tabla VII. **Recursos necesarios para la investigación**

No.	Descripción	Costo (Q.)
1	Exploración bibliográfica	
1.1	Energía eléctrica	80.00
1.2	Internet	600.00
1.3	Impresiones y hojas	50.00
1.4	Recurso Humano (tesista)	4,300.00
	Subtotal	5,030.00
2	Evaluación de aguas de rechazo y dilución	
2.1	Termómetro	350.00
2.2	Toma de muestras	100.00
2.3	Análisis de laboratorio	2,600.00
2.4	Recurso humano (tesista)	2,200.00
	Subtotal	5,250.00
3	Informe final	
3.1	Energía eléctrica	120.00
3.2	Internet	600.00
3.3	Curso PAG2	2,000.00
3.4	Impresiones, hojas y encuadernado	1,000.00
3.5	Recurso Humano (tesista)	4,300.00
3.6	Trámites administrativos y lingüística	1,000.00
	Subtotal	9,020.00
	Total	19,300.00

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word 365.

Se considera que los recursos aportados son suficientes para la investigación, por lo cual es factible la ejecución del estudio.

REFERENCIAS

1. Aragón Monasterio, A. L. (2016) *Diseño preliminar de una planta para el acondicionamiento de agua por ósmosis inversa, para la disminución de incrustaciones en calderas generadas por el alto contenido de sólidos disueltos* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
2. Área de Validaciones. (29 de Junio de 2020). *Procedimiento de validación del sistema de agua para uso farmacéutico*. Villa Nueva, Guatemala: Autor.
3. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) (1999). *Norma COGUANOR NGT 29001:2010 Agua para consumo humano (Agua potable)*. Guatemala: Autor.
4. Gobierno de la República de Guatemala y Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (2006). *Estrategia para la Gestión Integrada de Los Recursos Hídricos de Guatemala. Diagnóstico*. Guatemala, Guatemala: Autor.
5. Herrera Montenegro, G. M. (2007) *Optimización de parámetros operacionales en unidad de ósmosis inversa* (tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

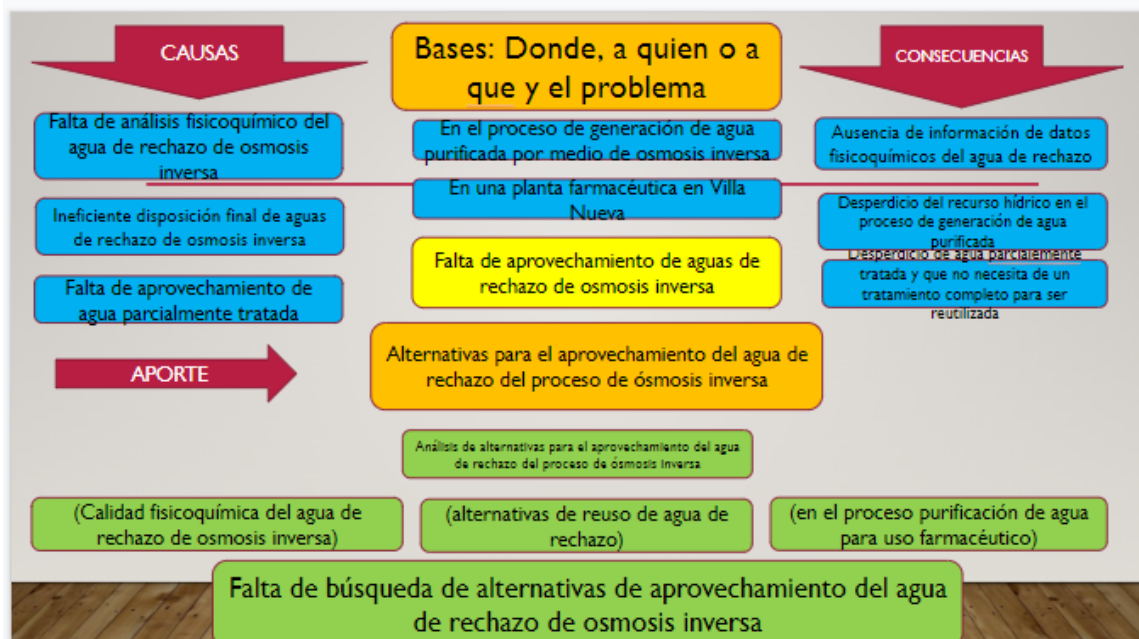
6. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Guatemala. 5 de mayo de 2006.
7. Nufio, N. L. (Mayo 2022). Validación de Sistemas Críticos Farmacéuticos. *Mantenimiento del Estado Validado en Laboratorios Farmacéuticos*. Conferencia llevada a cabo en Villa Nueva, Guatemala.
8. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2021). *Seguridad hídrica; respuestas a los desafíos locales, regionales, y mundiales*. México: Autor. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000218061_spa
9. Organización Mundial de la Salud (2022). *Agua para consumo humano*. Suiza: Autor. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
10. Patiño, A., & Campo, E. (2021) *Propuesta para la reutilización de aguas de rechazo del sistema de purificación empleado en la empresa Casa del agua en Santa Marta*. (tesis de licenciatura). Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia. Recuperado de http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/4798/3/2021_pati%c3%b1oandyermincampo.
11. Puritec Tratamiento de agua. (29 de Octubre de 2019). Ósmosis inversa. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/osmosis-inversa/>

12. Rivera Salguero, G. E. (2013). *Implementación de un sistema de aprovechamiento de las aguas residuales del proceso de ósmosis inversa y plan de contingencia sísmico en Industrias Licoreras de Guatemala, Planta de agua pura Bepresa*. (tesis de licenciatura E.P.S.). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
13. Silva Sierra, D. A. (2006). *Diseño de un sistema de osmosis inversa centrífugo utilizando diversas metodologías de diseño para la innovación. Tecnológico de Monterrey*. (tesis de licenciatura). Monterrey. Recuperado de <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567625>
14. United States Pharmacopeia Convention. (2022). *Farmacopea de los Estados Unidos, compendio de normas oficiales USP-NF 645*. Rockville, Estados Unidos de América: Autor
15. United States Pharmacopeial Convention 42. (2022). *Capítulo 1231 Agua Para Uso Farmacéutico. En Farmacopea de Los Estados Unidos de América Formulario Nacional*. Rockville, Estados Unidos de América: Autor
16. Villatoro Valladares, G. A. (2018). *Formulación de un plan de realización de estudios técnicos de aguas residuales en municipalidades urbanas* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de www.repositorio.usac.edu.gt/9576/1/Gustavo%20Adolfo%20Villatoro%20Valladares.pdf

17. Zarza, L. F. (26 de septiembre, 2016). La reutilización del agua y el modelo sostenible de gestión. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/laura-f-zarza/reutilizacion-agua-y-modelo-sostenible-gestion>

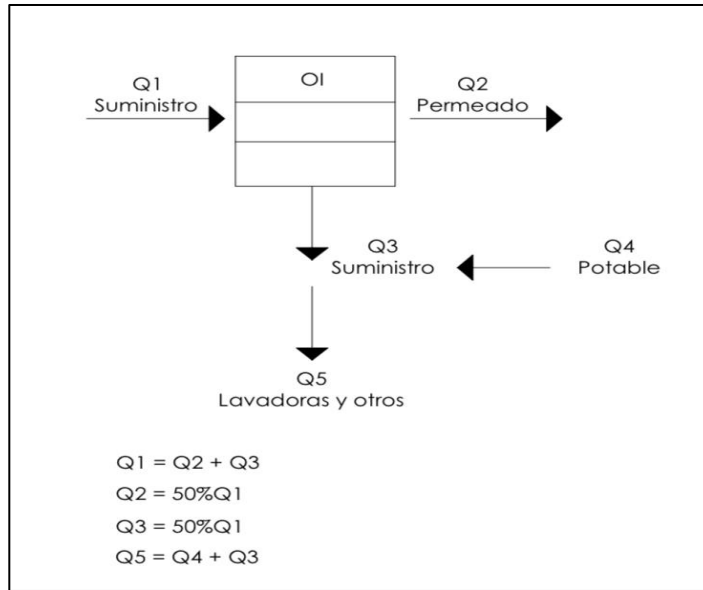
APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Power Point 365.

Apéndice 2. **Representación gráfica de caudales de agua de rechazo y agua de rechazo diluida en el proceso de ósmosis inversa**



Fuente: elaboración propia, hecho con AutoCAD 2020.