



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

**UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCION
PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS.**

Luis Fernando Martínez Quiñónez

Asesorado por el Ing. Jorge Fernando Sierra López

Guatemala, mayo de 2019.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN
PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LUIS FERNANDO MARTÍNEZ QUIÑÓNEZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE FERNANDO SIERRA LÓPEZ

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

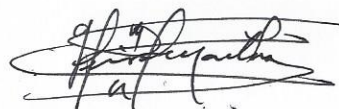
DECANO	Ing. Herbert Rene Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Oscar Rosal Higueros
EXAMINADOR	Ing. Williams Álvarez Mejía
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

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:

UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 29 de mayo de 2017.



Luis Fernando Martínez Quiñónez

Guatemala, 24 de septiembre de 2,018.

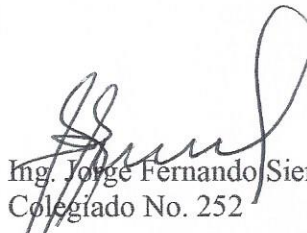
Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
Su despacho.

Estimado Ingeniero Wong.

Reciba un cordial saludo de mi parte. Por este medio hago constar que he revisado y asesorado la ejecución del trabajo de graduación de la carrera de Ingeniería Química, del estudiante Luis Fernando Martínez Quiñónez, con carnet 1989-12072 y Código Único de Identificación -CUI- 2390894720101, titulado "**UTILIZACION DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS**", el cual apruebo para que continúe con el proceso correspondiente.

Sin otro particular,

Atentamente,



Ing. Jorge Fernando Sierra López
Colegiado No. 252

Jorge Fernando Sierra López
Ingeniero Químico
Col. 252

cc. Archivo.



Guatemala, 13 de noviembre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.058.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **087-2010** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Cierre de Pensum-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Fernando Martínez Quiñónez**.
Identificado con el CUI: **2390 89472 0101**.
Identificado con registro académico: **1989-12072**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

**UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN PARA
RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Fernando Sierra López**.

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



[Handwritten Signature]
Ing. Otto Raúl De León De Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.035.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **LUIS FERNANDO MARTÍNEZ QUIÑÓNEZ** titulado: **"UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, mayo 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

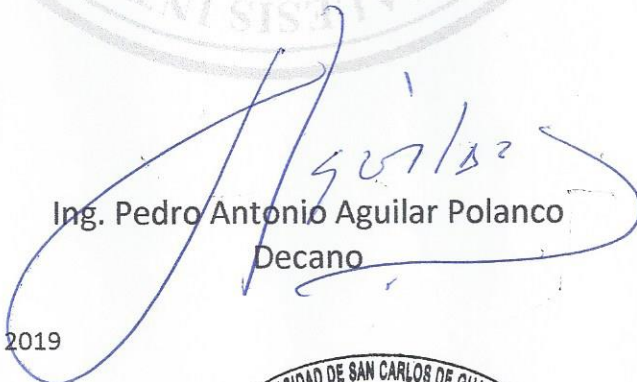


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 265.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN COMO OPCIÓN PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS**, presentado el estudiante universitario: **Luis Fernando Martínez Quiñónez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Fuente inagotable de conocimiento, amor y bondad, quien me guía y conduce en todo momento y me llena en mis momentos de debilidad.

Mis padres

Fernando y Amparito, gracias por la vida, por su amor incondicional y el ejemplo de perseverancia, honestidad y temor de Dios. Infinitamente agradecido.

Muy especialmente a mi mamá, porque, gracias a su empeño y tenacidad, pudimos formarnos intelectualmente y tuvimos la oportunidad de estudiar.

Mi esposa

Nirma, amor de mi vida, quien ha sido mi amiga incondicional, y, sobre todo, la mejor y más grande compañera de viaje que Dios pudo poner en mi camino. Hasta que la muerte nos separe.

Mis hijas

Mariana Lucía, Paula Sofía y Elisa Ximena, regalos de amor e inspiración en mi vida. Estrellas fulgurantes que iluminan mi diario caminar. Mi razón de ser y estar.

Mis hermanos

Evelyn, Francis y Juanjo, gracias por todo el apoyo y los buenos momentos vividos, por ser la mejor familia.

Mis cuñados y sus familias

Gracias por los momentos de alegría y fortaleza en los momentos difíciles.

Mi familia

Por su especial cariño y muestras de apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por permitirme formarme como profesional y abrir las puertas del conocimiento.

Facultad de Ingeniería

Por inspirar el conocimiento técnico y permitir mi formación profesional.

**Escuela de Ingeniería
Química**

Escuela que me enseñó la parte medular de mi carrera y me permite crecer académicamente.

**Ing. Jorge Fernando
Sierra**

Por su incondicional apoyo y especial dedicación a la realización de esta investigación.

**A mis amigos y
compañeros de
carrera**

Por los buenos tiempos, los momentos difíciles y la amistad.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SIMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Características del agua de desecho	3
2.1.1. Aguas industriales de desecho	3
2.1.2. Caracterización del agua de desecho según el proceso	6
2.1.3. Aguas industriales.....	6
2.1.4. Aguas de servicios sanitarios y de alimentación	7
2.1.5. Evaluación de la carga contaminante del agua.....	8
2.2. Tipos de tratamiento de aguas de desecho.....	10
2.3. Filtración como operación unitaria	11
2.3.1. Fundamentos de la filtración.....	14
2.4. Membranas	16
2.4.1. Naturaleza de las membranas	17
2.4.1.1. Membranas biológicas.....	17
2.4.1.2. Membranas sintéticas.....	17
2.5. Filtración por membranas. Descripción de la operación	18

3.	METODOLOGÍA	23
3.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio	23
3.3.	Recursos humanos	24
3.4.	Recursos materiales disponibles	24
3.4.1.	Instrumentos utilizados	24
3.4.2.	Reactivos utilizados	26
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	26
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información ..	29
3.8.	Análisis estadístico	31
4.	RESULTADOS	33
4.1.	Equipos que aportan al proceso de recuperación	37
4.2.	Flujos medidos en los efluentes de los equipos	40
4.3.	Características físicas y químicas de las muestras de agua.....	42
4.4.	Equipos que aportan agua al proceso de recuperación.....	51
4.5.	Análisis de agua antes y después de la planta de ultrafiltración.	52
4.6.	Puntos de recuperación activos.....	57
4.7.	Detalles de operación de la planta	57
4.7.1.	Operación de filtrado.....	57
4.7.2.	Tanques de almacenamiento de no filtrado y filtrado..	59
4.7.3.	Limpieza del sistema	59
4.7.4.	Limpieza de la unidad de filtración (membranas).....	60
4.7.5.	Personal de operación	60
4.7.6.	Electrónica y programas	60
4.7.7.	Muestras de laboratorio	61
4.8.	Cantidad de agua recuperada	61

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	81
APENDICES.....	83
ANEXO.....	85

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comparación de flujo directo vs. flujo cruzado.....	19
2.	Gráfico de corte molecular.....	21
3.	Diagrama del proceso de envasado de bebidas en vidrio	28
4.	Diagrama de flujo de proceso de recuperación de agua	29
5.	Flujo medido de descarga por equipo (metros cúbicos/mes)	40
6.	Esquema de la planta de ultrafiltración y diagrama del sistema de recuperación de agua	53
7.	Detalle de la forma de un capilar de membrana	55
8.	Conformación de las candelas de filtración dentro de la carcasa de PVC	55
9.	Detalle de la planta piloto de ultrafiltración, en planta en estudio	56
10.	Comparación de recuperación de agua vs. agua producida.....	63
11.	Agua ultrafiltrada vs. agua recuperada.....	64
12.	Agua ultrafiltrada producida vs. almacenada	66
13.	Flujo obtenido en la planta durante un mes de estudio.....	67

TABLAS

I.	Características del agua de desecho en las diferentes industrias procesadoras de alimentos	9
II.	Análisis por realizar en los puntos de muestreo.....	30
III.	Asignación de correlativo a puntos de muestreo por línea	39
IV.	Flujos medidos en los puntos de muestreo	41

V.	Características físicas del agua por punto de muestreo	43
VI.	Resultados obtenidos de análisis realizados a los puntos 1 al 4.....	45
VII.	Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 5 al 8	46
VIII.	Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 9 al 12	47
IX.	Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 13 al 16	48
X.	Resultados obtenidos de análisis realizados a los puntos 17 al 20..	49
XI.	Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 20 al 24	50
XII.	Puntos de muestreo seleccionados para recuperación de agua.....	51
XIII.	Análisis del agua antes y después de la ultrafiltración	62
XIV.	Comparación de agua producida vs. agua recuperada	63
XV.	Comparación de agua ultrafiltrada vs. agua recuperada	64
XVI.	Comparación de agua ultrafiltrada producida vs. Almacenada	65
XVII.	Valor del agua ultrafiltrada almacenada en tanques.....	68
XVIII.	Valor del agua suavizada producida en la planta	68
XIX.	Ahorro por uso de agua suave mensual	69
XX.	Efluentes que aportan agua al proceso de recuperación	72
XXI.	Características físicas de los efluentes que aportan agua	73

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de filtración.
c	Concentración del filtrado.
a	Constante característica de cada torta.
S	Constante de compresibilidad del filtrado.
ρ	Densidad del filtrado.
F	Fuerza impulsora del filtrado.
m	Masa del filtrado.
ω	Masa del sólido por unidad de filtrado.
W	Peso del filtrado.
P	Presión.
R	Resistencia del medio filtrante.
θ	Tiempo.
μ	Viscosidad.
V	Volumen de filtrado.

GLOSARIO

Agua cruda	Tipo de agua que no ha recibido ningún tratamiento y que normalmente se encuentra en fuentes y reservas naturales de agua, superficiales o subterráneas.
Agua dura	Agua a la que no se le ha removido el calcio y magnesio.
Agua potable	Agua dulce que tiene la característica que puede ser bebible por un ser humano.
Agua suavizada	Es el tipo de agua a la cual se le remueve el calcio y el magnesio, con el fin de que se pueda usar en procesos para evitar incrustaciones, por lo que los equipos aumentan su tiempo de vida útil.
CIP	Siglas en inglés que significan <i>Clean in Place</i> = limpieza en el lugar, normalmente conocido como la desinfección y limpieza interna de los equipos de proceso, la mayoría de las veces este proceso se aplica en equipos de llenado.
COP	Siglas en inglés que significan <i>Clean Over Place</i> = limpieza sobre el lugar, que se usa para definir la limpieza externa de equipos de proceso.

Despaletizadora	Equipo que se usa en una línea de proceso para retirar los embalajes de una tarima.
Efluente	Líquido residual que fluye de una instalación o un proceso.
Ensuciamiento	Acumulación de materia retenida en la superficie o dentro de las partes de la membrana, que causa la pérdida de rendimiento y un flujo notablemente más reducido.
Floculante	Agente químico que tiene la característica de promover la precipitación de sólidos en suspensión.
Llenadora	Equipo de una línea de proceso que se usa para depositar un producto dentro del embalaje primario.
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez. Se usa para medir la turbidez de agua.
Pasteurizadora	Equipo que se usa para calentar un producto, normalmente alimenticio, para evitar su descomposición microbiológica y aumentar su vida de anaquel.
Permeado	Secuencia de alimentación purificada después

de pasar a través de una membrana. También se conoce como agua producida.

Pet Siglas en inglés con que se define el politereftalato de polietileno, que se usa muchas veces para la elaboración de envases de plástico.

PLC Siglas que significan Programador Lógico Controlable, que es un equipo electrónico que se usa en la automatización de procesos en general.

Rinser Palabra en inglés utilizada para designar un equipo que se usa para enjuagar envases nuevos no retornables en una línea de envasado, normalmente usa agua para este proceso, pero también los hay que usan aire ionizado.

Warmer Palabra en inglés usada para designar un equipo de una línea de proceso de envasado, que se usa para que los productos que se introducen en este modifiquen su temperatura, de tal modo que se enfríen o calienten hasta una temperatura que sea adecuada para que se puedan procesar y empacar, sin dañar el empaque o el producto.

RESUMEN

En una planta de fabricación de bebidas, como en muchas otras fábricas, la materia prima más importante es el agua, razón por la cual se pretende reducir el consumo de agua de las fuentes de abastecimiento, por el costo de esta y sobre todo por la reducción que se ha experimentado en la disponibilidad de esta materia prima en el mundo.

Esta reducción en el consumo se puede lograr a través de ahorrar agua reduciendo consumos, lo cual no siempre es posible, o de recuperar agua de desecho de algunos equipos, y procesarla para luego volver a utilizarla en los procesos auxiliares de la misma planta de fabricación de bebidas.

El objetivo es recuperar agua en una planta de bebidas utilizando una planta de ultrafiltración como tratamiento principal, haciendo una evaluación de la rentabilidad económica del proyecto luego de haberse reutilizado el agua recuperada.

Se evaluarán las características físicas, químicas y biológicas del agua residual de los distintos procesos que se llevan a cabo en una planta de embotellado en la fabricación de bebidas, haciendo los análisis correspondientes. Con base en los resultados obtenidos y según los flujos del agua de desecho se determinará qué equipos contribuyen a la recuperación de agua, además se evalúa el agua después de la planta de ultrafiltración para determinar los procesos en los cuales se puede utilizar el agua que se ha recuperado. Luego se hace un análisis de rentabilidad del

proyecto de recuperación de agua. Se espera que se pueda recuperar agua en cantidades suficientes para reducir el consumo de agua de las fuentes de abastecimiento, de tal modo que haga el proyecto rentable y que el agua cumpla con las características deseadas para poder utilizarse en la planta.

OBJETIVOS

General

Recuperar agua en una planta de bebidas utilizando una planta de ultrafiltración como tratamiento principal, haciendo una evaluación de la rentabilidad económica del proyecto.

Específicos

1. Describir las características fisicoquímicas del agua, mismas que son necesarias como mínimas o máximas para poderla tratar en un sistema de recuperación basado en un sistema de ultrafiltración.
2. Definir los requerimientos que la planta de bebidas debe cumplir para que la ultrafiltración sea un método viable para reprocesar agua, según el tipo de agua de desecho que se produce.
3. Determinar las operaciones del proceso de embotellado donde se pueda utilizar agua reprocesada en la planta de ultrafiltración, tomando en cuenta los diferentes tipos de agua que se utilizan.
4. Estimar la rentabilidad del proyecto de recuperación de agua.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los equipos de proceso que se utilizan en la fabricación de bebidas producen desechos líquidos, algunos de los cuales se pueden procesar para aprovechar nuevamente el agua con el fin de utilizarla en procesos auxiliares del mismo proceso de fabricación de bebidas, reduciendo con esto la cantidad de agua que se necesita extraer de los pozos de la fábrica o del sistema municipal de abastecimiento de agua.

En este estudio se pretende definir los criterios que se pueden utilizar para hacer viable la recuperación de agua en una planta de bebidas, utilizando como base procesos de filtración, siendo la ultrafiltración de agua el componente principal de este sistema. Existen varios tipos de procesos de filtración por membranas, de los cuales se mencionan microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, los cuales difieren básicamente uno de otro por el tamaño de partículas que retienen. En este estudio se trabaja con ultrafiltración, debido a que en estudios preliminares se determinó que la ultrafiltración era el proceso de separación más adecuado a las necesidades de la planta.

Para esto se mencionan algunas características físicas, químicas y biológicas del agua residual según los distintos procesos en una planta de embotellado de bebidas. Se describe la operación de filtración como operación unitaria, además se hace una descripción de algunos tipos de membranas de filtración y su aplicación en el sistema de ultrafiltración. Se pretende mencionar las características del agua que se recupera, así como las principales características de un sistema de recuperación de agua en una planta de bebidas, tomando como base una planta de ultrafiltración. Y al final se tratará

de evaluar la rentabilidad del proyecto de recuperación de agua utilizando la planta de ultrafiltración.

1. ANTECEDENTES

La preocupación mundial sobre el tema del agua toca muchos aspectos que incluyen lo social, ambiental, económico, industrial e incluso la búsqueda de soluciones tecnológicas que provean al agua la calidad requerida para su uso en actividades humanas de acuerdo con las normas existentes.

En el caso de las aguas residuales, estas necesitan para su reutilización un alto grado de tratamiento terciario que les permita satisfacer los estándares de calidad exigidos. Sin embargo, existen en la actualidad tecnologías que ofrecen la posibilidad de una clarificación y desinfección simultánea efectiva para la separación de sólidos y la eliminación de patógenos que, además, tienen como ventaja la no utilización de productos químicos que puedan reaccionar con las impurezas del agua y generar subproductos no deseados, el acoplamiento a otros procesos de separación, la reducción de energía, entre otros.

La aplicación de tecnología de membranas de ultrafiltración en el tratamiento de agua tiene ya alguna historia, sin embargo, aplicaciones fallidas han retrasado su crecimiento en la industria en general. Tal es el caso de aplicaciones contraindicadas para configuración y materiales de fabricación, pretratamientos inadecuados o cambios en la alimentación sin ajustes en la operación. Las principales aplicaciones se han encontrado en plantas para desalinización de agua de mar, también se encuentra como tratamiento de agua para producir agua ultra pura haciendo conjuntos de ultrafiltración-osmosis inversa.

En aplicaciones en recuperación de residuales en plantas de bebidas se tiene una aplicación de un sistema de recuperación de soda cáustica en una planta de embotellado de licores en Colombia, donde se filtra la solución de soda cáustica de la lavadora de envases para recuperar la soda y volver a utilizarla.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Características del agua de desecho

En cualquier proceso industrial se presentan desechos a pesar de lo bien diseñadas y eficientes que sean las operaciones. Tanto los desechos industriales como los producidos por la actividad vital del personal de la planta, se deben tratar y disponer adecuadamente para que las sustancias químicas y tóxicas, así como los organismos contenidos en ellos, no presenten riesgo para la salud del personal del establecimiento, la población de los alrededores, la vida vegetal o animal, el suelo y el agua de la zona.

2.1.1. Aguas industriales de desecho

Las aguas industriales de desecho pueden contener materia mineral suspendida, coloidal y disuelta; sólidos orgánicos; ser excesivamente ácidas o alcalinas; con concentraciones altas y bajas de colorantes; materiales inertes, agentes tóxicos y bacterias patógenas.

Al verter los desechos industriales líquidos en un curso de agua se pueden provocar alteraciones físicas, químicas y biológicas, cuyas consecuencias se reducirán si los desechos líquidos se someten a un tratamiento de depuración previo, cuya magnitud dependerá de varios factores, que pueden incidir en que el curso de agua se pueda o no aprovechar.

Los factores de los que depende la magnitud del tratamiento de un desecho líquido previo a descargarlo al ambiente son:

Las características de dilución y de estabilización del curso de agua receptor:

- Los caudales del curso de agua receptor y del vertimiento (desecho industrial).
- Del estado del agua antes de recibir los desechos.
- De la posibilidad de recibir otros desechos aguas abajo.
- De las características del curso de agua receptor en la trayectoria posterior al vertimiento.
- De la utilización posterior del curso de agua receptor.

Alteraciones físicas que pueden afectar un curso de agua, por un desecho líquido:

- Color
- Olor
- Sabor
- Temperatura
- Materia en suspensión
- Formación de espumas
- Radiactividad.

Alteraciones químicas pueden ser ocasionadas por:

- Compuestos orgánicos
- Compuestos inorgánicos.

Alteraciones biológicas que pueden afectar un curso de agua al agregarle un desecho:

- Por la presencia de organismos patógenos que transmiten enfermedades.

- Por falta de oxígeno disuelto necesario que provoca ausencia de animales y plantas.¹

La industria en general utiliza agua para una amplia gama de actividades, desde el proceso más complejo hasta la limpieza de pisos y equipos. Generalmente el hombre no puede emplear agua sin agregarle algo o modificar sus características. Y este algo que se le agrega, como se menciona anteriormente, puede ser calor, materiales suspendidos o sustancias en disolución, contaminación microbiana, entre otros.

Para poder controlar la emisión de aguas industriales en una planta, cualquiera que sea su proceso, se requiere:

- Conocimiento del volumen de agua por unidad de tiempo, calidad y tipo de agua que se utiliza en el proceso.
- Conocimiento de las normas de calidad o características del agua que recibe la industria, y con la calidad que desecha al medio ambiente.

Las aguas industriales, según el uso que se les da, pueden proceder de distintos puntos de los procesos industriales:

- Plantas de tratamiento de agua (acondicionamiento de esta, según necesidades de la industria).
- Procesos térmicos, como generación de vapor o intercambio de calor.
- Limpieza de los equipos y la planta de proceso.
- Procesos industriales.
- Drenajes de techos y patios.
- Plantas de tratamiento de aguas industriales residuales.

¹ BARRERA, Clara. *Guía de saneamiento básico industrial*. 1987. p.145

2.1.2. Caracterización del agua de desecho según el proceso

En todas las plantas se pueden describir dos tipos de agua de desecho, las cuales son indiferentes del proceso a que se dedique la fábrica, Estas son:

- Aguas industriales (aguas grises)
- Aguas de servicios sanitarios y de alimentación (aguas negras)

Esta diferenciación se hace con el fin de conocer los posibles tipos de contaminantes que afectan el agua según los distintos procesos, ya que existen propiedades de cada tipo de agua de desecho que van a permitir o no incluirlas en un proceso de recuperación y tratamiento de agua. Estas características se definirán más adelante.

2.1.3. Aguas industriales

Algunas industrias necesitan realizar un tratamiento al agua que reciben, con el fin de obtener la calidad de agua requerida para cada uso. A continuación se mencionan varios tipos de aguas residuales según los diferentes procesos utilizados en la industria de bebidas:

- Sedimentación
- Ablandamiento
- Filtración
- Intercambio iónico
- Desmineralización
- Agua de desecho por funcionamiento de calderas
- Purga de calderas
- Agua para remoción de cenizas de la combustión de carbón
- Limpieza de calderas
- Aguas de desecho provenientes de limpieza

- Aguas utilizadas para intercambio de calor
- Torres de enfriamiento
- Intercambiadores de calor
- Aguas de los procesos
- Limpieza de materia prima
- Limpieza de recipientes
- Refinados
- Lavadores de gas
- Aguas de lluvias y de patios²

2.1.4. Aguas de servicios sanitarios y de alimentación

Están compuestas por a) aguas negras que contienen materia fecal y gran cantidad de microorganismos, muchos de ellos patógenos; b) aguas de actividades alimentarias, lavado de ropa de trabajo e higiene personal. Presentan alto contenido de materia orgánica, jabón, grasas, partículas minerales y microorganismos que pueden ser patógenos. Las aguas provenientes de sanitarios, lavamanos, duchas, lavanderías y restaurantes de la industria deben desaguarse al sistema de alcantarillado separado de otros desechos.

El agua de desecho de los servicios es aproximadamente de 0,075 m³ por persona por turno. La que proviene de servicios de alimentación y de la lavandería de la empresa puede ser de 0,11 m³ / persona / turno.³

² BARRERA, Clara. *Guía de Saneamiento Básico Industrial*. 1987. p.148.

³ *Ibíd.* p. 149.

2.1.5. Evaluación de la carga contaminante del agua.

En el caso que se desea reprocesar el agua de desecho de una planta, sin importar el proceso en que se ocupe, se debe conocer o sospechar la contaminación del agua, para esto la fábrica necesita determinar los sitios de origen, las cantidades y las características de cada uno de los desechos que son descargados. Esta evaluación en una industria comprende las siguientes etapas:

- Definición del problema.
- Medición de caudales.
- Toma de muestras.
- Análisis de las muestras e interpretación de resultados.
- Separación de los vertimientos.
- Control.
- Tratamiento y disposición.

Debido a que en la planta en estudio ya se tienen cuantificados los volúmenes de agua de desecho de cada equipo de la planta, así como la carga contaminante de cada uno, se obviarán los primeros pasos hasta llegar al análisis de muestras e interpretación de resultados, que es lo que ocupa primordialmente este análisis, para definir la cantidad de agua a reprocesar, así como las características del agua de desecho que se empleará para poder recuperar. En la siguiente tabla se muestran las características de las aguas de desecho producidas por las industrias fabricantes y procesadoras de alimentos:

Tabla I. Características del agua de desecho en las diferentes industrias procesadoras de alimentos

Tipo de agua de desecho	Caudal m ³ tm.prod DBO ₅	Características de aguas de desecho							Observaciones
		DBO ₅		Sólidos suspendidos		grasa, aceite emulsionado		pH	
		mg/l	mg/l	mg/l	kg/tm	mg/l	tm		
Azúcar	3,32 a 48,5		0,63 a 20,0		0,06 a 94,1			8,5	
Productos Lácteos	0,08 a 20,33		0,02 a 57,2		0,03 a 11,6			4,0 a 12,0	
Pescado y productos del mar	1,06 a 175	84 a 32 700	1,79 a 210	26,2 a 18 300	0,70 a 370	15,1 a 12 000	0,43 a 53	5,8 a 8,5	
Malterías	7,36	700	5	117	0,54			6,7	x = m ³ /tm de cebada
Destilerías	7,44	480	3,39	250	2,41			7,6	x = por tm de grano procesado
Vinos destilados	2	8,990	18	4,470	17,9			3,5 a 4,8	x= por tm de uvas
Vino de mesa	1,93	790	1,55	152	0,3			3,0 a 11,3	x= por tm de uvas
Cítricos	10,12		3,2		1,3				
Manzanas	3,66		5		0,5				
Papas	10,27		18,1		15,9			2,1	
Planta procesadoras de carne	10,54		5,7		2,7			2,1	
De aves de corral	14,17 a 1 832		370 a 620	8,0 a 8,7	120 a 296	5,0 a 6,3	170 a 230		
Aceites comestibles	2,34 a 6,76		1,67 a 24,9		1,81 a 24,6		1,00 a 28,1	9,7	
De molinos	2,5 a 41,7	225 a a14 633	0,11 a 108,4	33 a 14 824	0,07 a 109,8			3,5 a 8,5	
Bebidas no alcohólicas	2,64 a 5,07	380 a 660	1,92 a 2,32	160 a 170	0,57 a 0,88			10,0 a 11,4	
Huevos, procesamiento y ruptura	1,066 a 2,6	3 000 a 3 200	8,4 a 22,8	539 a 803					
Mataderos y frigoríficos		1 500 a 2 500		800				7	
Desechos agrícolas		1 000 a 2 000		1 500 a 3 000				7,5 a 8,5	

Fuente: Barrera, Clara. *Guía de Saneamiento Básico Industrial*. p.181.

2.2. Tipos de tratamiento de aguas de desecho

El término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico, cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales -llamadas, en el caso de las urbanas, aguas negras, y las industriales se conocen como aguas grises-. La finalidad de estas operaciones es obtener aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.⁴

Los tipos de tratamiento de agua varían de acuerdo con las características del agua de alimentación y sobre todo de las características del agua que se desea que esta tenga después del proceso. En el caso de las aguas residuales, el tratamiento consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente de uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente o en los procesos productivos y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido de lodo) convenientes para su disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de agua potable.

Algunos métodos primarios de tratamiento de agua de desecho que consisten en la separación de partículas sólidas son:

- Desmenuzado

⁴ RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales*. 2006. p. 10.

- Separación de arena
- Sedimentación
- Filtración
- Tamizado o cribado

Derivado de la alcalinidad o acidez del agua de desecho, se pueden tener procesos de neutralización. En muchas plantas, después de los procesos primarios de tratamiento de agua, se disponen tratamientos secundarios y terciarios del agua de desecho, pero no es el fin de este estudio abordarlos.

Después de la neutralización, y con excepción de aguas cargadas de sales y de sueros, las aguas de desecho de las industrias fabricantes y procesadoras de alimentos son biodegradables. Una práctica usual es la reutilización del agua cuando es factible económicamente, lo cual reduce considerablemente el volumen del agua de desecho que requiere un tratamiento secundario y terciario. De hecho, la finalidad de este estudio es comprobar que, según la calidad del agua de desecho, con un proceso de filtración se pueda reutilizar el agua.

2.3. Filtración como operación unitaria

La filtración es una de las aplicaciones más conocidas del flujo de fluidos a través de lechos empacados. Como se lleva a cabo industrialmente, es exactamente análoga a las filtraciones efectuadas en el laboratorio químico, usando un embudo y papel filtro. El objetivo continúa siendo separar un sólido del fluido que lo soporta. En cualquiera de los casos, el proceso se lleva a cabo forzando el fluido a través de una membrana porosa. Las partículas sólidas son atrapadas dentro de los poros de la membrana y forman una capa sobre la superficie de esta. El fluido, ya sea gas o líquido, pasa a través del lecho de

sólidos y a través de la membrana de retención, y la corriente valiosa puede ser el fluido, los sólidos o ambos productos.⁵

La filtración industrial difiere de la que se hace en el laboratorio, solamente en las cantidades de materiales que se manejan y la necesidad de que estas sean manejadas a un bajo costo. Las filtraciones industriales van desde un simple colado hasta operaciones más complejas. En la filtración industrial, el contenido de sólido en la corriente de la alimentación que se pretende separar puede contener desde trazas hasta un contenido muy elevado del mismo.

Para obtener un rendimiento razonable con un filtro de tamaño moderado, la caída de presión para el flujo puede aumentarse, o bien la resistencia al flujo disminuirse. La mayor parte de equipo industrial disminuye la resistencia al flujo, permitiendo que el área de filtración sea lo más grande posible, sin aumentar el tamaño total del aparato de filtración.⁶ Actualmente se hacen diseños de sistemas de filtración en los cuales el área de filtración se aumenta a través de utilizar candelas o sistemas similares, que evitan que el equipo sea más grande pero el área de filtración se incrementa.

La selección del equipo de filtración depende considerablemente de factores económicos, pero las ventajas económicas variarán dependiendo de:

- Viscosidad del fluido, densidad y reactividad química.
- Tamaño de las partículas sólidas, distribución de tamaños, forma, tendencias a la floculación y a la deformabilidad.
- Concentración de la pasta alimentada.
- Cantidad de material que va a ser manejada.

⁵ FOUST, Allan. *Operaciones unitarias*. 1979. p. 608

⁶ MCCABE, Warren. *Principios de operaciones unitarias*. 1985. p. 997.

- Valor absoluto y relativo de los productos sólidos y líquidos.
- Qué tan completa se desea la separación.
- Gastos relativos de mano de obra, capital y fuerza motriz.⁷

Debido a la enorme variedad de materiales que se han de filtrar y las diferentes condiciones de operación de los procesos, se han desarrollado numerosos tipos de filtros, los cuales básicamente se dividen en dos grandes grupos: filtros clarificadores y filtros de torta. Los clarificadores retiran pequeñas cantidades de sólidos para producir un gas claro o líquidos transparentes, tales como bebidas. Los filtros de torta separan grandes cantidades de sólidos en forma de una torta de cristales o un lodo. Con frecuencia incluyen dispositivos para el lavado de los sólidos y para eliminar la mayor parte posible del líquido residual antes de su descarga.

El fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión a través del medio. Así, los filtros se clasifican, atendiendo a ese aspecto, en los que operan con una sobrepresión aguas arriba del medio filtrante, los que lo hacen con presión atmosférica aguas arriba del medio filtrante y aquellos que presentan vacío aguas abajo. Presiones superiores a la atmósfera pueden generarse por acción de la fuerza de gravedad actuando sobre una columna de líquido, por medio de una bomba o soplante, o bien por medio de fuerza centrífuga.

En un filtro de gravedad el medio filtrante puede o no ser más fino que un tamiz grueso o un lecho de partículas gruesas tales como arena. El tipo más sencillo de filtros industriales son los filtros de arena, que consisten en capas de piedra, grava y arena, sostenidas por una rejilla.⁸

⁷ FOUST, Allan. *Operaciones unitarias*. 1979. p. 608.

⁸ *Ibíd.* p. 609.

2.3.1. Fundamentos de la filtración

La filtración ha evolucionado como un arte práctico desde aplicaciones primitivas, como la tradicional filtración en lecho de arena, empleada desde la antigüedad para la extracción de agua potable, recibiendo una mayor atención teórica durante el siglo XX a partir de los trabajos de P. Carman en 1937 y B. Ruth en 1946, estudios que fueron progresivamente ampliados en trabajos con medios porosos, por Heertjes y colaboradores en 1949 y 1966 y Tiller entre 1953 y 1964. Anteriormente, varios autores han revisado el estado de los conocimientos en filtración, tanto desde una perspectiva práctica, en los trabajos de Caín en 1984 y Kiefer en 1991, como en sus principios teóricos con las publicaciones de Bear en 1988 y Norden en 1994.⁹

Aunque la teoría de la filtración no se emplea en exclusiva para el diseño de filtros en aplicaciones concretas, es frecuentemente empleada para la interpretación de resultados a escala de laboratorio, la optimización de aplicaciones o la predicción de cambios en las condiciones de trabajo. Su principal limitación reside en el hecho de que las características de la mezcla a tratar de partículas sólidas y fluido, a veces llamada lechada, por su complejidad e interacción, pueden ser muy variables en los diferentes casos reales. El principio teórico de la filtración se fundamenta en la cuantificación de la relación básica de velocidad de un fluido o caudal:

$$velocidad = \frac{F}{R}$$

Ecuación I

⁹ MCCABE, Warren. *Principios de operaciones unitarias*. 1985. p. 997.

Donde la fuerza impulsora (F) puede ser la fuerza de gravedad, el empuje de una bomba de presión o de succión, o la fuerza centrífuga, mientras que la resistencia (R) es la suma de la ofrecida por el medio filtrante y la torta de sólido formada sobre el mismo.

La velocidad del fluido se ve condicionada por el hecho de que tiene que atravesar un medio irregular constituido por los canales pequeños formados en los intersticios de la torta y el medio filtrante, de manera que se puede aplicar la fórmula adaptada de fluido dinámico de la ley de Hagen-Poiseuille:

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{P}{\mu \left[a \frac{W}{A} + r \right]}$$

Ecuación II

Donde la velocidad diferencial o instantánea, es decir, el volumen (V) filtrado por tiempo (θ) y por unidad de superficie (A), se relaciona con la fuerza impulsora o caída total de presión (P) sobre el producto de la viscosidad del filtrado (μ) por la suma de la resistencia de la torta y la del medio de filtración (r). La resistencia de la torta se expresa por la relación entre el peso (W) y el área en función de una constante (α) promedio característica de cada torta.

Por su parte, si se considera la aproximación de que la torta es incompresible o compactada de manera uniforme, la masa de la torta filtrante (W) se relaciona con el volumen de filtrado (V) mediante un sencillo balance de materia:

$$W = \omega V = \frac{\rho c}{1 - mc} V$$

Ecuación III

Donde la masa de sólidos por unidad de volumen filtrado (ω) es función de la densidad del filtrado (ρ), la fracción de sólidos en la corriente de aporte o concentración (c) y la relación de masas entre la torta húmeda y la seca. La constante de resistencia específica de la torta (α) se relaciona con la presión por la fórmula:

$$\alpha = \alpha' P^s$$

Ecuación IV

Donde α' es otra constante que depende del tamaño de las partículas que conforman la torta y s una constante de compresibilidad que varía de 0, para tortas incompresibles como diatomeas y arena fina, a 1, para las muy compresibles.

2.4. Membranas

Aunque muchas veces es difícil percibir las, las membranas están presentes en la mayor parte de las actividades que se realizan a lo largo de la vida, en muchas aplicaciones, a nivel industrial y no industrial y que se extienden en diferentes campos: químico, farmacéutico, biológico, alimenticio, medio ambiente, entre otros. Una definición bastante acorde con el tipo de membrana, como las que en este estudio se consideran, podría ser: “cualquier región que actúa como una barrera entre dos fluidos, restringiendo o favoreciendo el movimiento de uno o más componentes, de uno o ambos fluidos a través de ella.”¹⁰

¹⁰ PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización superficial y estructural de membranas microporosas*. 2006. p. 3.

2.4.1. Naturaleza de las membranas

Con base en su origen, las membranas se pueden clasificar en biológicas y sintéticas.

2.4.1.1. Membranas biológicas

Son aquellas que forman parte de los seres vivos. Se encuentran a muchos niveles, a nivel celular como intercambio o aislamiento de la célula con el exterior, a nivel pluricelular, delimitando órganos funcionales o como recubrimiento que permite la interacción con el exterior. A excepción de las membranas celulares, las membranas biológicas son láminas finas de tejido que cubren los órganos del cuerpo de los seres vivos. El comportamiento y funciones son variados, como consecuencia de la variedad de órganos y niveles en los que están presentes.

2.4.1.2. Membranas sintéticas

En la actualidad, existe una gran variedad de membranas sintéticas que han evolucionado en función de los materiales y las técnicas utilizados en su fabricación, esto con el fin de ir mejorando su comportamiento para una determinada operación de separación.

Las membranas sintéticas se clasifican en varias categorías de acuerdo con su composición, función, estructura y forma.

Con base en su composición se clasifican en inorgánica, orgánica o polimérica y mixta.

Con base en su función se clasifican en separación de gases, destilación de agua, diálisis, ultrafiltración, microfiltración, electrodiálisis, entre otros.

Con base en su estructura (referida a la microestructura en su corte transversal) se clasifican en homogénea, asimétrica o compuesta.

Con base en su forma se clasifican en laminar, fibra hueca, tubular o un revestimiento.¹¹

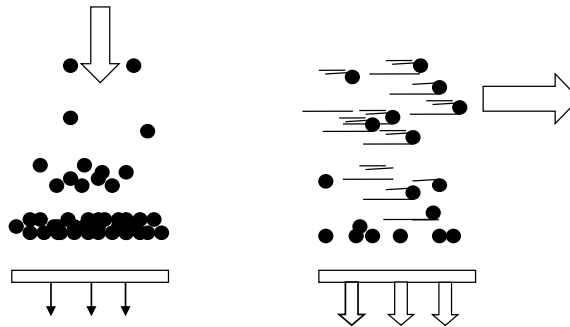
2.5. Filtración por membranas. Descripción de la operación

En este tipo de operación el influente es conducido al sistema por baja presión, donde membranas especiales de alta resistencia lo reciben para liberarlo de materiales de alto peso molecular y sólidos suspendidos. Los fluidos viajan por la superficie de las membranas en forma horizontal a muy alta velocidad, impidiendo la formación de lodos que obstaculicen y resten eficiencia de estas.

Cada membrana es fabricada especialmente para cubrir las necesidades de filtración de cada planta. Una de las ventajas de un proceso de filtración por membranas es esencialmente el flujo cruzado comparado con el flujo directo (ver figura 1).

¹¹ PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización superficial y estructural de membranas microporosas*. 2006. p. 5.

Figura 1. **Comparación de flujo directo vs. flujo cruzado**



Fuente: elaboración propia.

Las limitaciones de un filtrado directo (convencional) provocan que los medios filtrantes se tapen con mucha mayor rapidez que la filtración por flujo cruzado. Al aplicar el flujo cruzado sobre la superficie filtrante se provoca una autolimpieza en la superficie de la membrana, disminuyendo la frecuencia y los costos de limpieza.

Tradicionalmente la tecnología de membranas estaba dividida en 3 categorías: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y ósmosis inversa (O.I.), difiriendo básicamente entre ellas el tamaño de material que separan. Esa diferencia está basada, además de en el tamaño del poro de la membrana, en otros factores complejos.

Actualmente se ha agregado una cuarta categoría, siendo cuatro tecnologías de filtración por membranas: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, las cuales utilizan membranas semipermeables que tienen la capacidad de remover sólidos disueltos o suspendidos de una corriente de agua, en la cual están contenidos éstos contaminantes. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características de acuerdo con los sólidos que pueden remover, según el diámetro de la partícula que retienen como se aprecia en la figura 2.

En todos los casos, la fuerza impulsora es la diferencia de presión, teniendo también en común que el proceso de selección viene determinado solo por el tamaño de poro de la membrana (tamaños de poros diferentes y por tanto rangos de presiones distintas). La ultrafiltración es definida como un método de filtración de flujo transversal, similar a la ósmosis inversa, pero con presiones más bajas, que utiliza una membrana para separar partículas coloidales pequeñas y moléculas grandes del agua y otros líquidos. Se sitúa entre la microfiltración y la nanofiltración. En lo que se refiere al tamaño de partículas que se eliminan, la ultrafiltración típicamente filtra partículas entre 0,002 a 0,1 micras (μm) y rechaza sustancias orgánicas de peso molecular mayor que 1 000, mientras que deja pasar iones y sustancias orgánicas mayores. En el caso de la ultrafiltración se trabaja con diferencias de presión entre 2 y 10 bares, y los materiales que atraviesan la membrana son los disolventes, los iones y las moléculas de bajo peso molecular.

En los procesos de microfiltración las diferencias de presión necesarias son mucho más bajas, no llegando a 2 bares. Se utilizan para eliminar materiales en suspensión y para la esterilización de líquidos (bacterias, levaduras, algas, entre otros). En este caso, el tamaño del poro está comprendido entre 0,01 y 10 μm .

Con el término nanofiltración se engloba los procesos que trabajan a presiones altas (entre 10 y 14 bar) y cuya finalidad es la separación de solutos de bajo peso molecular, este proceso se encuentra situado entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración, es por eso por lo que algunas veces se le ha llamado ósmosis inversa de baja presión.¹²

¹² PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización superficial y estructural de membranas microporosas*. 2006. p. 5.

Con el término nanofiltración se engloba los procesos que trabajan a presiones altas (entre 10 y 14 bar) y cuya finalidad es la separación de solutos de bajo peso molecular, este proceso se encuentra situado entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración, es por eso por lo que algunas veces se le ha llamado ósmosis inversa de baja presión.¹³

En el caso de la ósmosis inversa, para tamaños moleculares pequeños se utilizan membranas densas, mientras que para tamaños mayores se usan membranas porosas. La diferencia de presión empleada debe ser lo suficientemente grande como para vencer la presión osmótica de la disolución (10 a 100 bares). En un proceso de ósmosis inversa puro se retienen prácticamente todas las sustancias disueltas en la disolución.¹⁴

Para el proceso en estudio se escoge un sistema de ultrafiltración, que es capaz de producir agua con la calidad apropiada para reutilizarla en los equipos para la producción de bebidas, que incluso puede llegar a tener la calidad de agua potable, sin embargo, el agua será utilizada en procesos secundarios donde no tenga contacto directo con el producto o equipos que tienen relación directa con el producto.

¹³, PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización superficial y estructural de membranas microporosas*. 2006. p. 5.

¹⁴ *Ibíd.* p.6.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

La metodología propuesta para este proyecto es establecer según las características físicas, químicas y biológicas del agua de desecho de los distintos equipos de la fábrica de bebidas, cuáles son los adecuados para el proceso de recuperación del agua.

Los parámetros a medir son alcalinidad [mg/l], dureza total [mg/l], sólidos sedimentables [ml], demanda química de oxígeno (DQO) [mg/l], demanda biológica de oxígeno (DBO₅) [mg/l], pH, temperatura (°C) y turbidez [NTU], se harán paralelamente recuentos microbiológicos del agua antes y después de la unidad de ultrafiltración, siendo además muy importante el flujo con el cual sale de los equipos el agua de desecho en (m³/hora).

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio serán los equipos del proceso de embotellado que participan en la fabricación de bebidas en la planta en estudio, que producen agua de desecho, de los cuales, según las características que se evaluarán de esta, se determinará si es viable su utilización en el sistema de recuperación de agua, así como el agua que se produce al final del proceso de filtración, para determinar sus características y con esto evaluar su reutilización en el proceso de fabricación de bebidas. Esto se hará considerando la rentabilidad del proyecto para validar su utilización en la industria.

3.3. Recursos humanos

- Investigador: Luis Fernando Martínez Quiñónez
- Asesor: Ing. Jorge Fernando Sierra López
- Personal de aseguramiento de calidad de la empresa en que se realiza el estudio, para hacer muestreo y análisis del agua de desecho.

3.4. Recursos materiales disponibles

Se utilizarán las instalaciones y personal de la fábrica de bebidas interesada en el estudio. La empresa proporciona todos los materiales e insumos, así como el lugar para la realización de los diferentes análisis que se necesitan en el laboratorio de la planta.

La planta en estudio está localizada en la Ciudad de Guatemala, en esta planta se producen diversos tipos de bebidas, carbonatadas y no carbonatadas.

3.4.1. Instrumentos utilizados

Se utilizaron los recipientes adecuados para hacer el muestreo del agua, y todo el equipo de laboratorio necesario para la determinación de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos del agua, basado en los procedimientos de los métodos normalizados para el análisis de agua y agua de desecho, que son los que se utilizaron de referencia en el laboratorio de la planta donde se hizo el estudio.

Para los diferentes análisis se utilizó:

- Recipientes para recolección de muestras.
- Pinzas para soportar recipientes para recolección de muestras.
- Bolsa para portar recipientes de recolección de muestras.
- Termómetros.

- Probetas de 25 ml, 50 ml y 100 ml.
- Pipetas de 1ml ,5 ml y 10 ml.
- Erlenmeyer de vidrio Pyrex de 125 ml.
- Pizetas.
- Buretas automáticas.
- pH metro.
- Balones de 500 ml y 1 000 ml.
- Cono de Imhoff.
- Turbidímetro.
- Botellas y horno incubador para determinación de DBO₅.
- Equipo para análisis y determinación de DQO.
- Conductivímetro.
- Balanza analítica.
- Crisol para determinación de sólidos.
- Desecador.
- Estufa eléctrica.
- Espectrofotómetros con rangos de luz UV y visible.
- Cajas de Petri.
- Horno de incubación para muestras microbiológicas.
- Filtros de nitrato de celulosa de 45 micras.
- Equipo para filtración de agua en vacío.
- Recipientes para determinación de flujo en la salida de los equipos.
- Cronómetro.
- Magneto agitador.

3.4.2. Reactivos utilizados

Según los métodos utilizados los reactivos que se utilizaron fueron:

- Ácido clorhídrico 0,1 N.
- EDTA 0,02 N.
- Agar mosto.
- Indicadores fenolftaleína, naranja de metilo, *buffer* amoniacal.
- Juegos de reactivos de determinación de cloruros, amonio, nitritos, aluminio, cobre, manganeso, sílice, hierro, fosfatos, sulfitos.
- Juego de reactivos para determinación de DQO.
- Reactivos para determinación de DBO₅.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica por usar es una técnica cuantitativa, que va a evaluar las cantidades de los distintos parámetros que se van a medir al agua en estudio, y con base en estos resultados se determinará qué equipos pueden tener una contribución dentro del proceso de recuperación de agua. Y se evalúa la contribución económica al proceso por la reutilización de agua, así como la rentabilidad de la planta.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de información se tomarán muestras del agua de desecho de los distintos procesos en la fábrica de bebidas, además se determinará el flujo en la descarga de los distintos equipos. A las muestras capturadas se les practicarán los análisis descritos en la sección 4,1, los que se tabularán adecuadamente para poder determinar variaciones en el proceso, y

también determinar qué equipos contribuyen al programa de recuperación de agua.

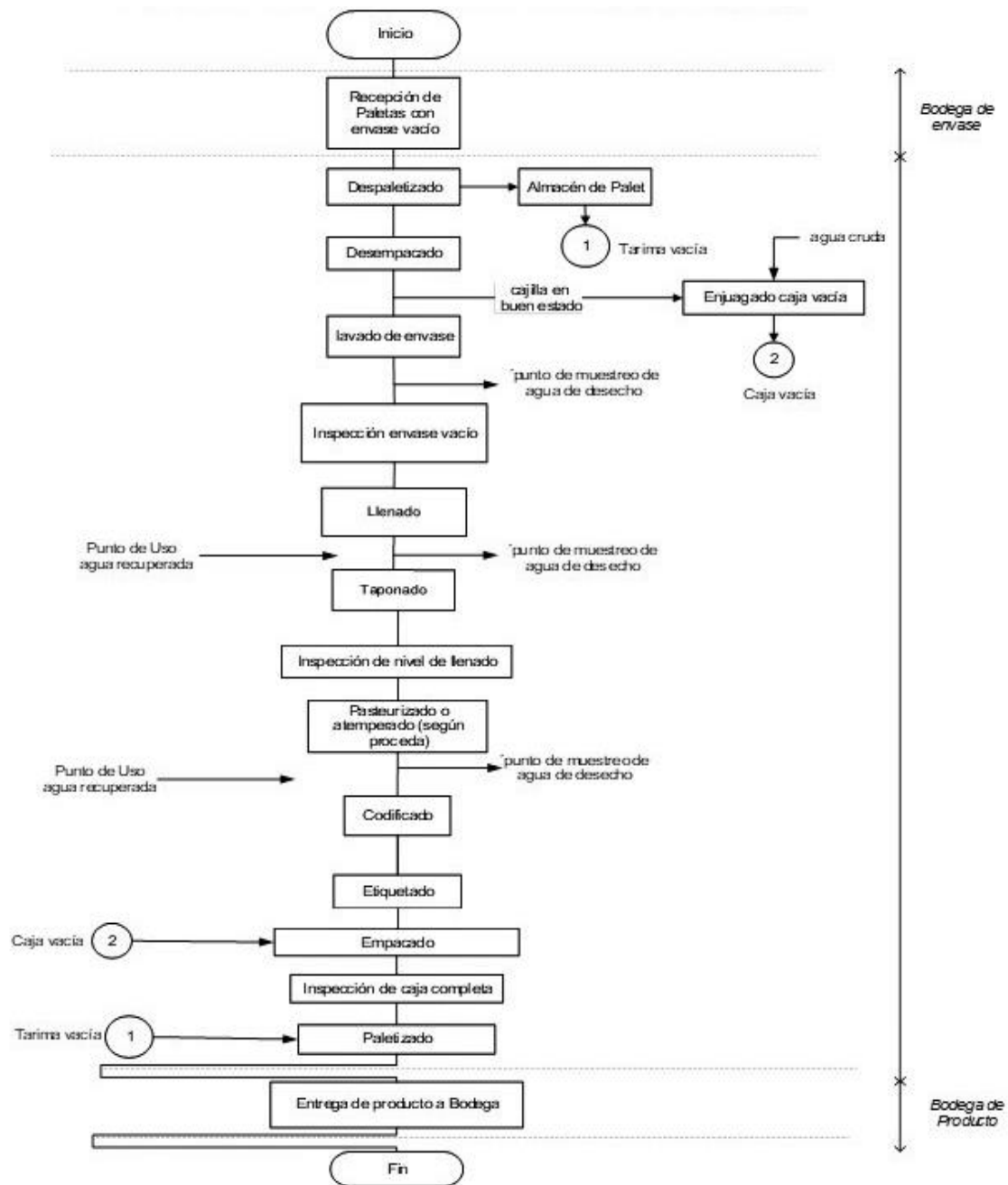
Para la determinación de flujo, en donde sea factible se utilizará el método volumétrico, llenar determinado volumen de un recipiente en un tiempo dado, donde no sea posible se harán estimaciones con base en el diámetro de la tubería y tiempo de descarga. Algunos equipos de la planta tienen indicadores de flujo de descarga.

La secuencia de procesos se llevará como se detalla a continuación:

- Toma de muestras, mediciones de flujos y características fisicoquímicas de los efluentes de los diversos equipos de la planta.
- Análisis de datos y, con base en los resultados, descarte de equipos que no contribuyen al proceso de recuperación de agua.
- Utilización de la planta piloto para la recuperación de agua.
- Análisis de datos obtenidos de la planta de reprocesamiento de agua para validar su funcionamiento.

En la figura 3, que se muestra en la siguiente página, se detallan los puntos de un proceso de embotellado de bebidas en vidrio, en el cual se muestran los puntos de muestreo del agua de desecho.

Figura 3. Diagrama del proceso de envasado de bebidas en vidrio

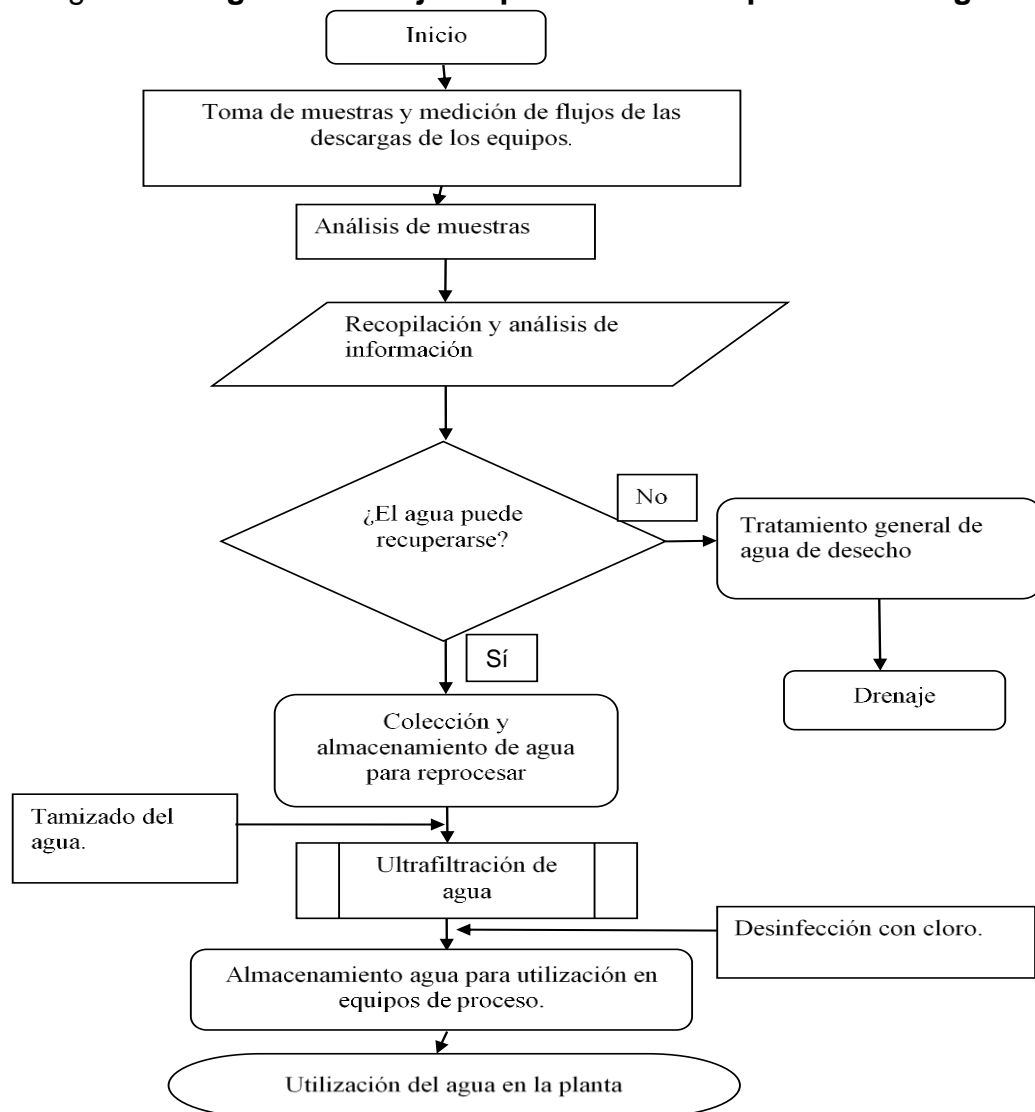


Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestra un diagrama de flujo de los diversos pasos para la elaboración del estudio de recuperación de agua en una planta de bebidas:

Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de recuperación de agua



Fuente: elaboración propia.

Para la tabulación de los datos se harán tablas con los distintos parámetros a medir, de manera que se puedan comprobar tendencias y variaciones en los mismos para cada punto de muestreo según la actividad de la planta en los diferentes días de producción (ver tabla II), donde se muestran los parámetros a analizar en los puntos de muestreo.

Tabla II. Análisis por realizar en los puntos de muestreo

Lugar de Muestreo	Línea 1			
Fecha y día	1	2	3	4
Horas de muestreo				
Análisis				
pH				
DQO (mg/L)				
DBO ₅ (mg/L)				
Sólidos sedimentables				
Sólidos suspendidos				
Sólidos Totales (mg/L)				
Alcalinidad "F"(mg/L)				
Alcalinidad "M"(mg/L)				
Dureza Total (mg/L)				
Dureza de Calcio				
Conductividad				
Cloruros (mg/L)				
Amonio (mg/L)				
Nitritos (mg/L)				
Sílice (mg/L)				
Hierro (mg/L)				
Fosfatos (mg/L)				
Sulfitos (mg/L)				
Turbidez (NTU)				

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para validar los datos obtenidos se tienen datos históricos de la planta, así como datos bibliográficos de referencia, además también se hacen comparaciones y estandarización de las soluciones que se utilizan para que los datos obtenidos sean confiables, además se utilizan soluciones normalizadas de fábrica. De cada equipo se tendrán valores de los cuales se determinarán valores máximos y mínimos, así como su desviación estándar, para determinar los rangos de cada parámetro a medir en el agua de desecho.

4. RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, el campo de estudio para esta investigación es una planta de bebidas, en la cual se desea aprovechar al agua resultante de equipos utilizados en diversas líneas de envasado, para posteriormente volverla a utilizar en algunos equipos, luego de un tratamiento físico de filtración, en este caso se usa una planta de ultrafiltración.

Se establecen algunas premisas, el agua recuperada nunca entrará en contacto con envases limpios previo a ser utilizados en el proceso de envasado, no se usará el agua recuperada para limpieza interna de equipos que están en contacto directo con producto, ni se deberá usar para la formulación de productos. Se usará en procesos en los cuales el contacto es indirecto con producto ya envasado y taponado o equipos auxiliares que usan agua, como bombas de vacío. Esto se define sabiendo que las características del agua que sale de un proceso de ultrafiltración pueden llegar a ser de agua potable, sin embargo, no se desea poner en riesgo la calidad de los productos que se preparan en la fábrica.

El primer punto es definir los equipos que serán considerados, en todas las salas de envasado, de la planta de bebidas en estudio; para analizar el agua de desecho que producen se puede inferir que los equipos que pueden cumplir con esta característica son los mismos equipos que utilizan agua en el desarrollo de su proceso.

El envasado es el procedimiento por el cual una mercancía se envasa o empaqueta para su transporte y venta. Comprende tanto la producción del envase como la envoltura para un producto. El envase es todo recipiente o

soporte que contiene o guarda un producto, protege la mercancía, facilita su transporte, ayuda a distinguirla de otros artículos y presenta el producto para su venta. Es cualquier recipiente, caja o envoltura propia para contener alguna materia o artículo. Una de las principales funciones del envase es la de conservar el producto, en ese sentido, las características de un buen envase son las siguientes:

- Posibilidad de contener el producto.
- Permitir su identificación.
- Capacidad de proteger y preservar el producto.
- Adecuado a las necesidades del consumidor en términos de tamaño, ergonomía y calidad, entre otros.
- Ajuste a las unidades de carga y distribución del producto.
- Fácil adaptación a las líneas de fabricación y envasado del producto, y en particular a las líneas de envasado automático.
- Cumplimiento de las legislaciones vigentes.
- Precio adecuado a la oferta comercial que se quiere hacer del producto.
- Resistente a las manipulaciones, transporte y distribución comercial.

En todas las líneas de envasado, normalmente convergen equipos similares, el proceso es similar de una línea con otra. En general, todas las líneas de envasado empiezan por un proceso de despaletizado, que consiste en sacar los envases ya sea a granel o en un embalaje menor de la forma que viene de la bodega que suministra el envase. Este proceso difiere según el tipo de envase que sea procesado, el cual puede ser de vidrio, lata, pet, acero inoxidable, plástico, entre otros. En el caso de los equipos de despaletizado, no hay consumo de agua durante su proceso de operación, por lo tanto no hay aporte al proceso de recuperación.

El siguiente proceso puede ser un desempacado, si después de despaletizar el envase este aún tiene otro embalaje menor, como el caso de las botellas de vidrio, que vienen contenidas en cajillas plásticas. En este proceso se separan los envases de su embalaje, el cual normalmente será vuelto a utilizar al momento de empacar el producto lleno. En este caso, en la operación de desempacado de envases no hay mayor consumo de agua, lo que significa que tampoco aporta en un proceso de recuperación de esta.

Los embalajes, que como ya se mencionó anteriormente, regularmente son cajillas plásticas, van a un proceso de enjuagado o lavado, el cual sí tiene consumo de agua, por lo que se deberá considerar su análisis para valorar si se puede recuperar esta agua y que contribuya al proceso de recuperación.

En el caso de envases no retornables, como pueden ser envases de vidrio, pet, lata de aluminio o plástico, estos solo pasan por un proceso de enjuague, normalmente con agua, al que se le puede llamar *rinser*, ya que por su condición de que siempre es nuevo no necesita un lavado profundo, más que solo remover partículas de polvo que pudieran haber llegado al interior, previo al proceso de llenado.

En el caso de envases de vidrio retornables, la situación es muy distinta, ya que para este tipo de envase el proceso sí necesita un lavado interno y externo, en el cual se retiran la suciedad, la decoración (etiquetas de papel y adhesivo, si se usan), y residuos de producto. Para ello normalmente se usa solución de soda cáustica, y se pueden o no agregar aditivos o detergentes, para ayudar con el proceso de lavado, los cuales deben ser removidos del envase en el mismo proceso de lavado. El lavado del envase se realiza con base en cuatro acciones: mecánica, térmica, química y por el tiempo de residencia. Como consecuencia de este proceso hay una cantidad de agua que

sale como desecho de la lavadora de envases, la cual deberá analizarse para considerar si puede aportar para el proceso de recuperación de agua.

El siguiente paso es que los envases limpios son inspeccionados, para validar que no tienen algún defecto que pueda poner en peligro al producto o al proceso. Este proceso normalmente no utiliza agua durante su ejecución.

Después del lavado e inspección de envases, se inicia el proceso de envasado como tal, en el cual se agregará el producto que se está procesando en la línea de envasado. Este proceso también es conocido como llenado.

Hay muchas formas de llenar bebidas, con gas carbónico (CO₂), con aire, con nitrógeno, en frío, en caliente, a temperatura ambiente, con vacío, sin vacío, entre otros. Todo es en función del tipo de producto y envase que se está usando. En este caso la contribución de agua en el proceso de llenado de producto es mínima, se podría tener una cantidad considerable, en los circuitos de limpieza interna de los equipos, conocidos como CIP, que significa *Cleaning in Place*. En algunos procesos de llenado se utilizan bombas de vacío, las cuales usan agua para hacer el vacío, estos equipos pueden contribuir con agua para el proceso de recuperación.

En la mayoría de los procesos de envasado se usa, después del llenado, equipos que pueden ser pasteurizadores, enfriadores o atemperadores (que también se conocen como *warmers*, del término en inglés *warm*, que significa tibio).

El producto se pasa en estos equipos ya sea con el objetivo de desinfectar el producto de una posible carga microbiológica y alargar su vida de anaquel, como el caso de los pasteurizadores, que se usan como, por ejemplo, en el llenado de cerveza. En el caso de enfriadores, se usan porque el proceso de llenado del producto es a alta temperatura y se pretende reducir la

temperatura del producto para evitar que dañe al empaque, como por ejemplo en el llenado de jugos y néctares, y los atemperadores se usan para subir la temperatura del producto arriba del punto de rocío, con el fin de eliminar la condensación de agua en el envase y que esta pueda dañar al empaque. En todos estos equipos se utiliza la mayoría de las veces agua, la cual puede ser recuperada y aprovechada en un proceso de recuperación de esta.

El siguiente equipo de la línea de envasado puede ser la etiquetadora, que se utiliza en el proceso de envasado, cuando el envase no tiene una identificación desde el origen. Posteriormente, se usan empacadoras, si el envase no necesita otro identificador y ya está listo para ser empacado y distribuido. Para terminar el proceso de envasado se concluye usando paletizadores, que se usan para agrupar los embalajes y tenerlos listos para la distribución y venta. Estos equipos no usan agua en su proceso y, por lo tanto, no contribuyen al proceso de recuperación de agua.

En la figura 3 se presenta un diagrama en el cual se muestra una línea de envasado que usa envase retornable, en el que se detallan los equipos que se describieron anteriormente, y se marcan los equipos que pueden aportar agua para el proceso de recuperación, así como se muestra en dónde se puede reutilizar el agua que se ha recuperado.

4.1. Equipos que aportan al proceso de recuperación

En la tabla III, en la siguiente página, se muestra el listado de equipos de la planta de envasado que se consideraron para la contribución al proceso de recuperación de agua, se incluyen los equipos que utilizan agua suavizada en su proceso y se indica a cuál línea de proceso pertenecen.

En este punto, a estos equipos de la lista se les asigna un número correlativo, del 1 al 24, que los identificará durante todo el estudio. Este número

correlativo es el que se relaciona con los análisis de agua que se realizaron al agua de desecho de cada uno de ellos, con las tablas de medición de flujo y los demás resultados obtenidos en el estudio.

Cabe mencionar que se consideran todos los equipos que participan en los procesos de envasado, de una planta que produce diversidad de bebidas, de tipos carbonatadas y no carbonatadas, fermentadas y no fermentadas, que pueden aportar agua al proceso de recuperación.

Los equipos que por la naturaleza del proceso no aportan agua al sistema de recolección de agua no se muestran en esta lista y tampoco se muestran los equipos que no son del área de envasado de bebidas. Así como equipos que usan agua, pero no usan del tipo de agua suave que es la que se desea aprovechar, como ejemplo en la planta hay equipos como lavadoras de cajas que, para enjuagar las cajillas plásticas usadas para el embalaje del producto, ya sea retornable o no, usan agua cruda, que tiene características físicas y químicas que no están consideradas en este estudio, por lo que no se consideran en el proyecto de recuperación de agua.

Tampoco se espera recuperar agua de los procesos de limpieza externa de todos los equipos de las líneas de envasado (COP), ya que en el proceso de limpieza se usa agua cruda y esta va directamente hacia los colectores de drenajes y estos van hacia la planta de tratamiento de aguas residuales.

Tabla III. Asignación de correlativo a puntos de muestreo por línea

CORRELATIVO	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	LÍNEA DE ENVASADO
1	Bomba de vacío llenadora	1
2	Lavadora de envases descarga	1
3	Lavadora de envases rebalse permanente	1
4	<i>Warmer</i> / Pasteurizadora, descarga	1
5	Lavadora de latas (rinser)	2
6	<i>Rinser</i>	3
7	<i>Warmer</i> / Pasteurizadora, rebalse permanente	3
8	Bomba de vacío llenadora	4
9	Lavadora de envases, descarga media	4
10	Lavadora de envases, rebalse permanente	4
11	<i>Warmer</i> / Pasteurizadora, rebalse permanente	4
12	Bomba de vacío número 1 llenadora	5
13	Bomba de vacío número 2 llenadora	5
14	Lavadora de envases, rebalse permanente	5
15	Lavadora de envases, descarga media	5
16	Lavadora de envases, descarga final	5
17	<i>Warmer</i> / Pasteurizadora, rebalse permanente	5
18	Bomba de vacío número 1 llenadora	6
19	Bomba de vacío número 2 llenadora	6
20	Lavadora de envases rebalse permanente	6
21	Lavadora de envases número 1, descarga	7
22	Lavadora de envases número 2, descarga	7
23	Lavadora línea número 8, descarga final	8
24	Lavadora línea número 8, descarga inicial	8

Fuente: elaboración propia.

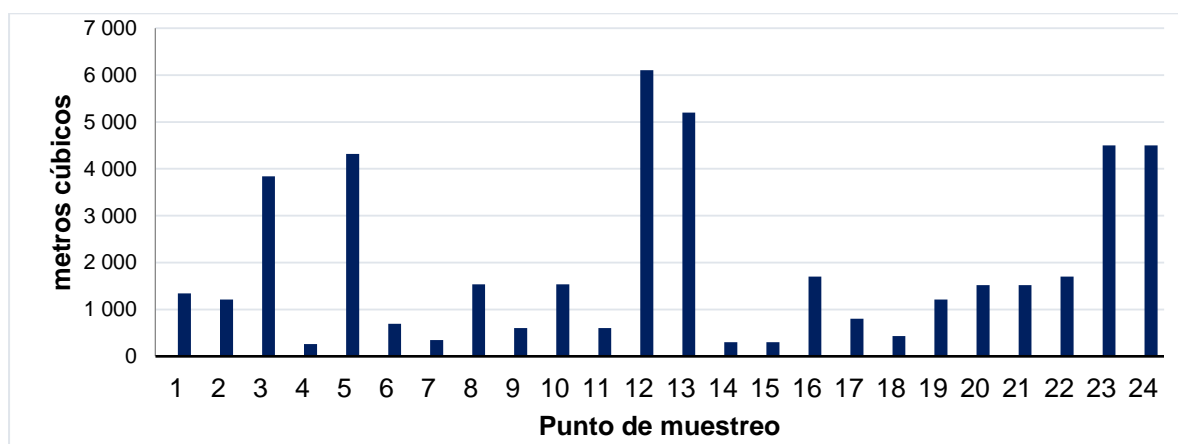
No se recupera el agua de limpieza de pisos, ni tampoco las aguas negras provenientes de servicios sanitarios y duchas. El drenaje de las bandas transportadoras de envases de todas las líneas, cualquiera que sea el tipo de transportador y lubricante utilizado para reducir la fricción de la banda, tampoco se recupera, ya que la mayoría de estos contiene lubricantes y grasas que pueden dañar el desempeño de las membranas de ultrafiltración.

4.2. Flujos medidos en los efluentes de los equipos

En la tabla IV, que se muestra en la siguiente página, se muestran los resultados de las mediciones de flujo de agua obtenidas de los tubos de descarga de cada uno de ellos. De estos valores, algunos se pudieron validar con la referencia de valores teóricos de los fabricantes de los equipos, descritos en los manuales de fabricante.

En la figura 5 se presenta el comparativo de los flujos para cada uno de los 24 puntos que pueden aportar agua al proceso de recuperación.

Figura 5. Flujo medido de descarga por equipo (metros cúbicos/mes)



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Flujos medidos en los puntos de muestreo

CORRELATIVO	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	FLUJO (m³/mes)
	LINEA # 1	
1	Bomba de vacío llenadora	1 344
2	Lavadora de envases descarga	1 210
3	Lavadora de envases rebalse permanente	3 840
4	Warmer / Pasteurizadora, descarga	261
	LINEA # 2	
5	Lavadora de latas (rinser)	4 320
	LINEA # 3	
6	Rinser	693
7	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	346
	LINEA # 4	
8	Bomba de vacío llenadora	1 536
9	Lavadora de envases, descarga media	600
10	Lavadora de envases, rebalse permanente	6 106
11	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	5 203
	LINEA # 5	
12	Bomba de vacío número 1 llenadora	302
13	Bomba de vacío número 2 llenadora	302
14	Lavadora de envases, rebalse permanente	1 699
15	Lavadora de envases, descarga media	800
16	Lavadora de envases, descarga final	432
17	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	1 210
	LINEA # 6	
18	Bomba de vacío número 1 llenadora	1 517
19	Bomba de vacío número 2 llenadora	1 517
20	Lavadora de envases rebalse permanente	1 699
	LINEA # 7	
21	Lavadora de envases número 1, descarga	4 500
22	Lavadora de envases número 2, descarga	4 500
	LINEA # 8	
23	Lavadora línea número 1, descarga final	3 869
24	Lavadora línea número 1, descarga inicial	3 095

Fuente: elaboración propia.

4.3. Características físicas y químicas de las muestras de agua

Otra parte muy importante para definir qué equipos aportarán al proceso de recuperación de agua, son los diversos análisis que se deben realizar a todas y cada una de las muestras obtenidas. Para cada una se deben determinar tanto las características físicas como pH, temperatura, turbiedad, contenido de sólidos, disueltos, totales y en suspensión, entre otros; características químicas, que se harán mediante la realización de análisis químicos, para medir dureza, alcalinidad, y el contenido de algunos elementos como sílice, hierro, cloruros, entre otros.

En la tabla V, en la página 43, se muestran algunas características físicas como sólidos disueltos, sólidos en suspensión y sólidos totales, obtenidos en mg/l, obtenidas con los muestreos de agua en cada punto. También se incluyen, en esta misma tabla, los resultados obtenidos en los análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno, realizados a todas las muestras obtenidas.

En la tabla V también se presentan los resultados de características físicas para todos los puntos de descarga de agua de desecho, de todas las líneas de envasado de la planta, que se estima que pueden aportar agua para el proceso de recuperación.

Tabla V. **Características físicas del agua por punto de muestreo**

#	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	Sólidos suspendidos mg/L	Sólidos disueltos mg/L	Sólidos Totales mg/L	DBO mg/L
LINEA # 1					
1	Bomba de vacío llenadora	6	304	310	69
2	Lavadora de envases descarga	9	461	470	2
3	Lavadora de envases rebalse permanente	12	598	610	50
4	Warmer / Pasteurizadora, descarga	12	440	452	0
LINEA # 2					
5	Lavadora de latas (rinsers)	11	264	275	10
LINEA # 3					
6	Rinsers	19	234	253	10
7	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	7	430	437	0
LINEA # 4					
8	Bomba de vacío llenadora	11	528	539	950
9	Lavadora de envases, descarga media	14	391	405	135
10	Lavadora de envases, rebalse permanente	13	497	510	239
11	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	8	424	432	49
LINEA # 5					
12	Bomba de vacío número 1 llenadora	5	409	414	240
13	Bomba de vacío número 2 llenadora	5	353	358	215
14	Lavadora de envases, rebalse permanente	76	379	455	285
15	Lavadora de envases, descarga media	29	1 735	1 764	64
16	Lavadora de envases, descarga final	14	321	335	8
17	Warmer / Pasteurizadora, rebalse permanente	12	381	393	35
LINEA # 6					
18	Bomba de vacío número 1 llenadora	9	443	452	77
19	Bomba de vacío número 2 llenadora	12	418	430	68
20	Lavadora de envases rebalse permanente	101	1 961	2 062	860
LINEA # 7					
21	Lavadora de envases número 1, descarga	12	498	510	77
22	Lavadora de envases número 2, descarga	13	512	525	68
LINEA # 8					
23	Lavadora línea número 1, descarga final	6	883	889	120
24	Lavadora línea número 1, descarga inicial	166	740	906	520

Fuente: elaboración propia.

Se analizaron algunas características del agua residual y se cuantifican los resultados de los análisis de sólidos disueltos, sólidos sedimentables y sólidos totales; para esto se toman muestras procurando que sean lo más homogéneas posibles y representativas de todo el volumen de agua que se descarta de la operación de los distintos equipos.

Con el fin de determinar las características químicas del agua que se obtiene del muestreo de todos los puntos, se tomaron muestras de agua, procurando que fueran representativas de todo el proceso, y fueron enviadas a un laboratorio de referencia, haciéndose la comparación con los resultados obtenidos en el laboratorio de la planta con los resultados obtenidos haciendo los análisis en el laboratorio de referencia, esto es para la mayoría de análisis de los cuales se dispone el método y el equipo adecuado para su realización.

Para este procedimiento se obtuvieron alícuotas del agua de desecho en diferentes horarios y tiempos para determinar los cambios en el agua, que se dan por el proceso en los distintos equipos en los que se usa agua, y después de homogenizar las muestras se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en las tablas VI a la XI, que se presentan en las siguientes páginas.

En este punto cabe recordar que el número de correlativo que aparece en la tabla corresponde al número asignado para la toma, control de las muestras y organización de los resultados, como se explicó anteriormente.

Tabla VI. Resultados obtenidos de análisis realizados a los puntos 1 al 4

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#1	#2	#3	#4
pH (sin unidades)	7,5	7,9	7,8	7,8
Conductividad, $\mu\text{S/cm}$	252	304	256	322
Sólidos Disueltos Totales	148	182	176	188
Alcalinidad Total como	104	148	108	124
Dureza Total como CaCO_3	10	9	11	10
Calcio	0,88	0,84	0,92	0,76
Magnesio	1,91	1,67	2,1	2
Sodio	41,2	57	46,3	56
Potasio	1,3	1,3	1,5	1,6
Bicarbonato como CaCO_3	104	148	108	124
Carbonatos como CaCO_3	0	0	0	0
Cloruros	4	4	5,1	10,8
Sulfatos	2	1,6	1,6	1,4
Nitratos como NO_3	< 0,5	1,7	< 0,5	< 0,5
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílice disuelta como SiO_2	44	52	40	40
Demanda Química de	8	2	2	6
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	6	2	1	2
Turbidez (NTU)	3	2	1	5
Sólidos Volátiles Totales	6	5	5	5
Carbón Orgánico Total	2	1,1	1,3	1,4
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Amoníaco como N	0,1	0,1	0,1	0,3
Aluminio	<0,1	<0,1	<0,1	<0
Bario	<0,1	<0,1	<0,1	<1
Cobre	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Hierro	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Manganeso	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Plata	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Estroncio	<0,1	<0,1	<0,1	<0

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

Tabla VII. Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 5 al 8

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#5	#6	#7	#8
pH (sin unidades)	7,7	7,9	7,7	7,7
Conductividad, $\mu\text{S/cm}$	256	289	257	353
Sólidos Disueltos Totales	144	150	146	170
Alcalinidad Total como CaCO_3	120	120	98	140
Dureza Total como CaCO_3	13	13	13	13
Calcio	1,14	1,12	1,17	1,2
Magnesio	2,48	2,48	2,44	2,43
Sodio	41	48	40	62
Potasio	1,9	1,6	2,5	2
Bicarbonato como CaCO_3	120	120	98	140
Carbonatos como CaCO_3	0	0	0	0
Cloruros	5,1	3,6	3,6	7,5
Sulfatos	1,4	1,5	1,6	1,3
Nitratos como NO_3	< 0,5	1,7	< 0,5	< 0,5
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílice disuelta como SiO_2	40	40	41	36
Demanda Química de Oxígeno	1	2	1	3
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	1	1	1	4
Turbidez (NTU)	2	1	6	7
Sólidos Volátiles Totales	1	2	2	2
Carbón Orgánico Total	1,2	1	1	1,1
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Amoniaco como N	0,1	0,1	0,2	0,3
Aluminio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bario	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cobre	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Hierro	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Manganeso	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Plata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Estroncio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

Tabla VIII. Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 9 al 12

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#9	#10	#11	#12
pH (sin unidades)	7,6	8,1	7,8	6,4
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	258	302	260	413
Sólidos Disueltos Totales	140	170	126	188
Alcalinidad Total como CaCO_3	108	120	104	160
Dureza Total como CaCO_3	12	11	12	11
Calcio	1,08	1,08	1,16	0,96
Magnesio	2,3	2,02	2,23	2,09
Sodio	45	52	42	70
Potasio	1,4	1,3	1,6	1,8
Bicarbonato como CaCO_3	108	112	104	160
Carbonatos como CaCO_3	0	8	0	0
Cloruros	4,8	4,8	5,7	6,6
Sulfatos	1,3	1,4	1,3	< 0,5
Nitratos como NO_3	< 0,5	2,1	< 0,5	< 0,5
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílice disuelta como SiO_2	34	49	42	45
Demanda Química de Oxígeno	8	3	5	30
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	2	2	1	14
Turbidez (NTU)	2		2	30
Sólidos Volátiles Totales	2	2	2	6
Carbón Orgánico Total	2,3	1,6	1,4	4,8
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Amoníaco como N	0,2	0,2	0,1	0,1
Aluminio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bario	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cobre	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Hierro	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Manganeso	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Plata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Estroncio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

Tabla IX. Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 13 al 16

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#13	#14	#15	#16
pH (sin unidades)	7,1	7,4	5,8	11,8
Conductividad, $\mu\text{S/cm}$	393	412	496	1 870
Sólidos Disueltos Totales	194	195	440	10 550
Alcalinidad Total como CaCO_3	156	166	20	7 600
Dureza Total como CaCO_3	12	10	30	< 1,0
Calcio	1,12	0,9	2,52	< 0,1
Magnesio	2,23	1,89	5,8	< 0,1
Sodio	68	71	72	3100
Potasio	1,9	1,7	1,6	5
Bicarbonato como CaCO_3	156	166	20	6 760
Carbonatos como CaCO_3	0	0	0	840
Cloruros	4,8	6	3,6	15
Sulfatos	1,3	1,3	1,6	< 0,5
Nitratos como NO_3	< 0,5	< 0,5	220	2,8
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	980
Sílice disuelta como SiO_2	44	41	164	70
Demanda Química de Oxígeno	14	6	6	39
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	18	5	4	20
Turbidez (NTU)	26	13	1	14
Sólidos Volátiles Totales	4	3	6	17
Carbón Orgánico Total	3,2	1,6	1,9	6,9
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,6
Amoníaco como N	0,4	0,3	0,3	0,1
Aluminio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bario	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cobre	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Hierro	0,1	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Manganeso	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Plata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Estroncio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

Tabla X. Resultados obtenidos de análisis realizados a los puntos 17 al 20

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#17	#18	#19	#20
pH (sin unidades)	7,4	8,4	9,2	5,3
Conductividad, $\mu\text{S/cm}$	420	910	503	248
Sólidos Disueltos Totales	300	650	320	127
Alcalinidad Total como CaCO_3	132	600	264	76
Dureza Total como CaCO_3	27	8	7	15
Calcio	2,1	0,96	0,52	1,4
Magnesio	5,3	1,36	1,36	2,77
Sodio	50	360	150	45
Potasio	1,6	2,5	1,7	2,5
Bicarbonato como CaCO_3	132	560	240	76
Carbonatos como CaCO_3	0	40	24	0
Cloruros	3,2	4,5	3,9	9,9
Sulfatos	1,5	1,7	2	< 0,5
Nitratos como NO_3	62	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílice disuelta como SiO_2	79	39	39	45
Demanda Química de Oxígeno	1	5	5	10
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	5	6	8	15
Turbidez (NTU)	4	4	2	21
Sólidos Volátiles Totales	3	17	12	3
Carbón Orgánico Total	0,7	2,2	1,4	2,8
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Amoníaco como N	1,2	0,1	0,1	1,4
Aluminio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bario	< 0,1	< 0,03	< 0,03	< 0,1
Cobre	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Hierro	< 0,03	< 0,05	< 0,05	1,6
Manganeso	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Plata	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,05
Estroncio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

Tabla XI. Resultados obtenidos de análisis realizados a puntos 20 al 24

Análisis	Resultados (mg/L)			
	CORRELATIVO S/LUGAR DE MUESTREO			
	#21	#22	#23	#24
pH (sin unidades)	5,4	8,8	9,2	8,0
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	268	1 820	458	332
Sólidos Disueltos Totales	139	1 136	310	174
Alcalinidad Total como CaCO_3	84	1 020	264	120
Dureza Total como CaCO_3	15	7	5	15
Calcio	1,24	0,72	0,72	0,80
Magnesio	2,91	1,26	1,05	1
Sodio	48	490	118	56
Potasio	2,8	2,6	1,9	1,6
Bicarbonato como CaCO_3	84	820	204	104
Carbonatos como CaCO_3	0	200	60	10
Cloruros	8	7,8	11	10,8
Sulfatos	< 0,5	1,6	< 0,5	<0,5
Nitratos como NO_3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fluoruros	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Fosfatos como PO_4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílice disuelta como SiO_2	46	44	42	40
Demanda Química de Oxígeno	12	3	1	6
Grasas y aceites	< 1	< 1	< 1	< 1
Color (Pt-Co)	15	12	6	2
Turbidez (NTU)	24	8	4	5
Sólidos Volátiles Totales	4	27	12	10
Carbón Orgánico Total	2,7	< 0,5	< 0,5	<0,5
Detergente	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Amoníaco como N	2	0,4	< 0,1	0,3
Aluminio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	<0
Bario	< 0,1	< 0,1	< 0,1	<1
Cobre	< 0,03	< 0,03	< 0,03	<0,03
Hierro	0,12	< 0,03	< 0,03	<0,03
Manganeso	< 0,05	< 0,05	< 0,05	<0,05
Plata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	<0,05
Estroncio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	<0

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de SEL Laboratories, USA.

4.4. Equipos que aportan agua al proceso de recuperación

Tomando en consideración los análisis de los diversos puntos donde se obtiene agua, se determina que los equipos que aportarán agua para el proceso de recuperación son los puntos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Puntos de muestreo seleccionados para recuperación de agua**

#	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	FLUJO MEDIDO m ³ /mes
LINEA # 1		
4	<i>Warmer /</i> Pasteurizadora, descarga	261
LINEA # 2		
5	Lavadora de latas (<i>rinser</i>)	4 320
LINEA # 3		
6	<i>Rinser</i>	693
LINEA # 4		
11	<i>Warmer /</i> Pasteurizadora, rebalse permanente	5 203
LINEA # 5		
17	<i>Warmer /</i> Pasteurizadora, rebalse permanente	1 210
LINEA # 7		
21	Lavadora de envases número 1, descarga	4 500
22	Lavadora de envases número 2, descarga	4 500

Fuente: elaboración propia.

La forma de llevar a cabo el proyecto de recuperación de agua fue que todos los puntos de muestreo y captación de agua se llevaron hacia varios tanques recolectores de agua, ubicados estratégicamente en la planta, donde convergen todos los drenajes y efluentes de los equipos.

Es en estos tanques colectores en donde empieza el proceso de homogenización de las aguas residuales, se bombea el agua para su proceso de filtración y almacenamiento, para su posterior uso, como se describe en el siguiente esquema, que muestra el proceso de recuperación de agua en general. Ver figura 6 en la página siguiente.

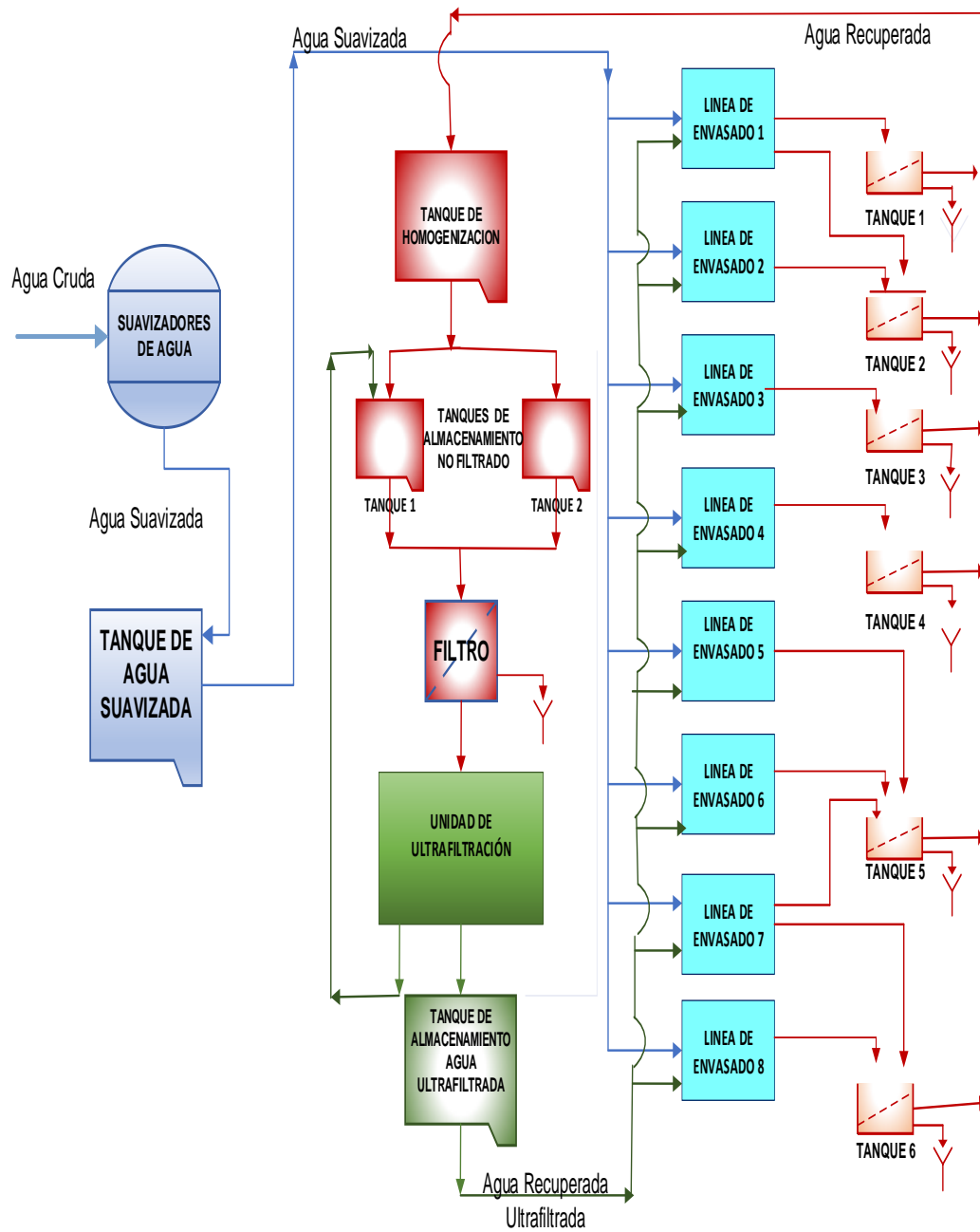
4.5. Análisis de agua antes y después de la planta de ultrafiltración.

Se escoge una planta de marca: Inge, A.G. GmbH, de tecnología alemana, que usa módulos de membranas Dizzer 5 000 MB, que son membranas de polietersulfona con aditivos especiales (PESM), lo que le proporciona a la membrana una alta resistencia a la incrustación orgánica. La capacidad en la planta piloto, en la fase inicial, es de 100 a 150 galones por minuto, luego se agregarán más fases. Trabaja con una presión de alimentación de 10 PSI.

Con su membrana patentada Multibore®, Inge GmbH está ampliamente considerada como una de las empresas tecnológicas pioneras líderes del mundo en el sector de la ultrafiltración, que proporciona los siguientes beneficios:

- Alta fiabilidad de funcionamiento, cero roturas de fibra
- Larga vida útil con costes de mantenimiento bajos
- Nivel elevado y consistente de la calidad del filtrado
- Retención efectiva de sólidos en suspensión y microorganismos
- Alta resistencia a los químicos
- Buenas propiedades contra atascamiento de membranas
- Rango extremadamente amplio de tolerancias de pH (pH 1 hasta pH 13)
- Extraordinariamente fácil de limpiar

Figura 6. Esquema de la planta de ultrafiltración y diagrama del sistema de recuperación de agua



Fuente: elaboración propia.

Con su membrana patentada Multibore®, Inge GmbH está ampliamente considerada como una de las empresas tecnológicas pioneras líderes del mundo en el sector de la ultrafiltración, que proporciona los siguientes beneficios:

- Alta fiabilidad de funcionamiento, cero roturas de fibra.
- Larga vida útil con costes de mantenimiento bajos.
- Nivel elevado y consistente de la calidad del filtrado.
- Retención efectiva de sólidos en suspensión y microorganismos.
- Alta resistencia a los químicos.
- Buenas propiedades contra atascamiento de membranas.
- Rango extremadamente amplio de tolerancias de pH (pH 1 hasta pH 13)
- Extraordinariamente fácil de limpiar.

¿Cómo trabaja? La membrana Multibore® combina siete capilares individuales en una fibra altamente resistente. Los capilares tienen un diámetro interno de 0,9 o 1,5 mm. El agua que se va a tratar es forzada a atravesar los capilares y se dispersa lateralmente a través de los poros de la membrana, que solo tienen 20 nanómetros de diámetro.

Las partículas sólidas en suspensión, los virus, los gérmenes y bacterias quedan retenidas en la pared interior de los capilares. Gracias a la estructura en panel de los capilares, la estabilidad de la membrana es extremadamente alta.

Figura 7. **Detalle de la forma de un capilar de membrana**



Fuente: Inge, A.G. *Manual del equipo de ultrafiltración*. 2007.p.2.

A diferencia de los productos de membrana capilar convencionales de fibra única, que son propensos a romperse súbitamente, la membrana Multibore® es tan estable y resistente que no se ha roto ni una sola fibra desde que han puesto en servicio en las primeras plantas de ultrafiltración. Así pues, esta tecnología es la elección óptima para lograr la máxima fiabilidad de servicio.

- Capilares por fibra 7
- Diámetro interior: 0,9 mm
- Diámetro exterior: 4,0 mm
- Diámetro del poro: aprox. 0,02 μm
- Material: Polietersulfona

La membrana universal con diámetro del capilar de 0,9 mm es adecuada para su uso en un amplio rango de tipos en la composición del agua a tratar.¹⁵

Figura 8. **Conformación de las candelas de filtración dentro de la carcasa de PVC**

¹⁵ INGE, A. G. *Manual de operación del equipo de ultrafiltración*. 2007. p. 10



Fuente: Planta de ultrafiltración.

La figura 9 corresponde a fotografías del arreglo de las candelas de filtración dentro de una carcasa y la figura 10 a la planta piloto de ultrafiltración.

Figura 9. Detalle de la planta piloto de ultrafiltración, en planta en estudio



Fuente: Planta de Ultrafiltración.

4.6. Puntos de recuperación activos

Como se menciona en la tabla XII, actualmente se está recuperando agua desde los tanques 2, 3, 4 y 5 (ver diagrama en figura 7), los que colectan agua así:

- Tanque 2: puntos de muestreo 4, 5 y 6, que corresponden a una pasteurizadora y 2 *rinser* de envase nuevo.
- Tanque 3: punto de muestreo 11, que corresponden a una pasteurizadora de una línea de vidrio.
- Tanque 4: puntos de muestreo 21 y 22, que corresponden a dos lavadoras de envase retornable de agua pura, que tienen baja carga de envase sucio.
- Tanque 5: punto de muestreo 17, que corresponde a una pasteurizadora de una línea de llenado de cerveza.

4.7. Detalles de operación de la planta

A continuación se describen características de la forma de operar de la planta de ultrafiltración.

4.7.1. Operación de filtrado

El agua se traslada desde los tanques de recuperación a los tanques de almacenamiento número 1 y número 2 de no filtrado (ver figura 7) localizados en el área de ultrafiltración. Desde estos tanques es bombeada a la unidad de ultrafiltración (membranas), la cual opera a través de un programa que controla automáticamente la filtración en las secciones superiores e inferiores de las membranas, retrolavados, lavados alternos con soda y ácido (actualmente ácido clorhídrico) que se realizan durante la operación de filtración.

Durante la filtración el sistema inyecta hipoclorito de sodio para mantener un residual de cloro dentro de las membranas, lo que se debe controlar para obtener un residual no mayor de 1 ppm en la salida de filtrado. También el sistema dosifica floculante de forma automática durante los ciclos de filtración.

El programa de operación del equipo de forma automática hace lavados alternos con soda y ácido durante 90 segundos y luego hace retrolavados para retirar los remanentes de químicos hacia el drenaje general. También hace retro lavados por arriba y por debajo de las membranas durante el ciclo de filtración, los cuales envía a los tanques de almacenamiento de no filtrado número 1 y número 2.

El agua filtrada se colecta en el tanque de almacenamiento de agua ultrafiltrada (ver figura 7) y desde este se envía a tanques de agua recuperada y de estos se retorna a los puntos de consumo actuales, que son las máquinas pasteurizadoras y *warmers* de las líneas número 1, 2, 3, 4, 5 y 8.

Químicos para utilizar en el sistema:

- Floculante
- Soda cáustica al 50 %
- Ácido clorhídrico al 32 %
- Hipoclorito de sodio 1-2 mg/l

Los químicos están contenidos en su correspondiente recipiente, el cual está acoplado al sistema y controlado por el programa de operación del sistema, en cuanto a contenido y operación de la correspondiente bomba de dosificación. Cada una de estas tiene su escala y régimen de dosificación para poder mantener las concentraciones de los químicos de limpieza del sistema de ultrafiltración, dentro de los rangos recomendados por el fabricante.

4.7.2. Tanques de almacenamiento de no filtrado y filtrado

El sistema de filtración opera de forma automática de lunes a viernes y lo hace siempre y cuando haya agua disponible en los tanques de almacenamiento, iniciando su operación cuando los tanques están llenos a un 75 % como mínimo y se queda en espera cuando el nivel baja a un 10 % del volumen del tanque, esto se puede visualizar en la computadora de la sala de control de tratamiento de agua, la cual está a cargo del departamento electrónico de elaboración. Los parámetros de llenado y vaciado pueden ser modificados en la pantalla correspondiente según convenga durante la operación.

4.7.3. Limpieza del sistema

Luego de operar durante la semana según disponibilidad de agua, se trata de filtrar el agua recuperada de los *buffers* de no filtrado para vaciarlos y lavarlos con agua cruda, usando el sistema de atomizadores que tienen instalados los tanques.

Para esto se conecta una manguera (disponible en el área) a la tubería de agua cruda y se envía agua al interior del tanque. Durante esta operación se puede observar el sedimento formado durante la semana en el fondo del tanque y a través de la compuerta puede verse como sale y como quedan los tanques sin sedimento. Al momento es la única operación de limpieza que se hace en ellos.

Esta operación debe hacerse el último día de operación previo a un fin de semana o un descanso largo. Debe inspeccionarse el interior de los tanques para observar formación de ligas o contaminaciones más severas provocadas en el agua recuperada de las líneas de envasado. La misma operación se hace en el tanque de filtrado, se lava e inspecciona por lo menos una vez al mes.

4.7.4. Limpieza de la unidad de filtración (membranas)

La unidad de membranas tiene instalado un programa de limpieza que utiliza soda o ácido en ciclos definidos de limpieza. Estos pueden operarse de forma manual, es decir, se puede decidir si se usa soda o ácido para hacer un ciclo de limpieza.

Actualmente, después de una semana de operación (lunes a viernes) se está haciendo limpieza con dos (2) ciclos de soda cáustica y luego dos (2) ciclos de ácido clorhídrico (HCl), y luego en un fin de semana o un descanso largo se deja el sistema inundado con ácido con la finalidad de mantener las membranas en contacto con un desincrustante fuerte como el HCl. Lo anterior se puede realizar escogiendo las opciones en las correspondientes pantallas de limpieza que indican la posibilidad de limpieza cáustica o ácida. Dejar las membranas inundadas con HCl ha dado resultados que hacen ver que las mismas están siendo desincrustadas por efecto del ácido.

4.7.5. Personal de operación

Dadas las circunstancias, localización y operación del sistema, el personal de tratamiento de agua ha tenido mayor contacto e información y capacitación en la operación del sistema. Actualmente se opera el sistema con la ayuda del ayudante de operador de tratamiento de agua y es la persona que posee conocimiento aceptable del sistema para operarlo en forma segura.

4.7.6. Electrónica y programas

El sistema tiene un PLC (Programador Lógico Controlable), en el que reside el programa con los parámetros de filtración, modos de dirección, por arriba o por abajo, retrolavados y tiempos de todos los ciclos. Estos pueden ser leídos y modificados en las correspondientes pantallas de cada una de las operaciones.

4.7.7. Muestras de laboratorio

Durante la filtración se solicita analizar una muestra en la salida del filtro, para lo cual el operador de la planta de ultrafiltración se comunica con el responsable de hacer los análisis de agua de aseguramiento de calidad, para llevar un control del agua filtrada.

En la tabla XIII se presentan los resultados de los análisis realizados al agua, previo a su paso por la unidad de ultrafiltración y posterior a ella. Los análisis son realizados en el Laboratorio de Aseguramiento de Calidad de la planta.

4.8. Cantidad de agua recuperada

En las siguientes tablas y gráficas se muestran las cantidades de agua recuperada de todos los efluentes activos, comparadas con la cantidad de agua que se produce en la planta, para satisfacer la demanda de la producción de bebidas.

En la tabla XIV se puede apreciar la cantidad de agua que se recuperó mensualmente, y se aprecia también la cantidad de agua suavizada que se obtiene al pasar por la unidad de tratamiento donde se produce el agua suave, para atender todas las necesidades de la planta.

El agua suavizada se utiliza en la planta de envasado en los equipos que usan temperatura en el agua, como son pasteurizadores, lavadoras de envase y los *warmers*, también se usa este tipo de agua en los enjuagues de envases nuevos no retornables, como envases de aluminio y envases pet. Esto se puede ver de una forma más clara en la figura 10, que muestra las cantidades de agua producida y las cantidades de agua recuperada mensualmente, y se muestra cómo el porcentaje de agua recuperada va incrementando conforme pasan los meses del estudio.

Tabla XIII. **Análisis del agua antes y después de la ultrafiltración**

Análisis Físicoquímico				
Parámetro	Antes	Después	Antes	Después
Cloro, mg/L	6	3	8	5
Alcalinidad F, mg/L	25	25	90	90
Alcalinidad M, mg/L	270	270	295	295
Dureza total, mg/L	45	45	35	35
Dureza de calcio, mg/L	20	20	15	15
pH	8,32	8,2	9,5	9,52
Conductividad, μS/cm	493	492	437	402
Amonio, mg/L	nd	nd	nd	nd
Nitritos, mg/L	0,04	nd	nd	nd
Nitratos, mg/L	nd	nd	0,7	0,5
Aluminio, mg/L	nd	nd	nd	nd
Cobre, mg/L	nd	nd	nd	nd
Manganeso, mg/L	nd	nd	nd	nd
Sílice, mg/L	27,1	24,9	72	68,5
Hierro, mg/L	0,09	nd	0,18	nd
Turbidez, NTU	3,69	0,02	0,77	0,02
Temperatura °C	32	32	30	30
Color	Ok	Ok	Ok	Ok
Olor	Ok	Ok	Ok	Ok
Sólidos sedimentables, ml	0	0	0	0
Sólidos suspendidos, ml	10	4	8	2
Sólidos totales, ml	240	232	325	296
DQO, mg/L	39	11	30	32

n.d = no detectable.

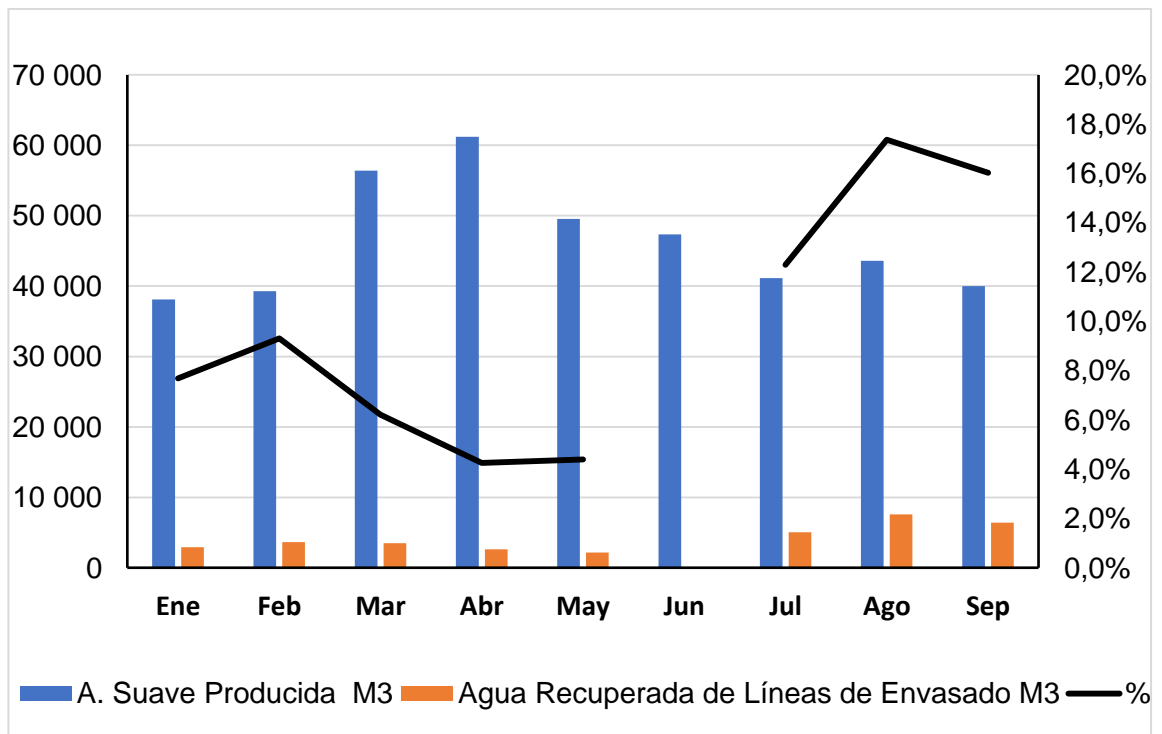
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Comparación de agua producida vs. agua recuperada

MES	Agua Suave Producida [metros cúbicos]	Agua Recuperada "[metros cúbicos]"	%
Enero	38 098	2 929	7,7 %
Febrero	39 266	3 655	9,3 %
Marzo	56 396	3 504	6,2 %
Abril	61 200	2 604	4,3 %
Mayo	49 541	2 177	4,4 %
Junio	47 335	0	0,0 %
Julio	41 134	5 058	12,3 %
Agosto	43 600	7 572	17,4 %
Septiembre	39 982	6 406	16,0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Comparación de recuperación de agua vs. agua producida



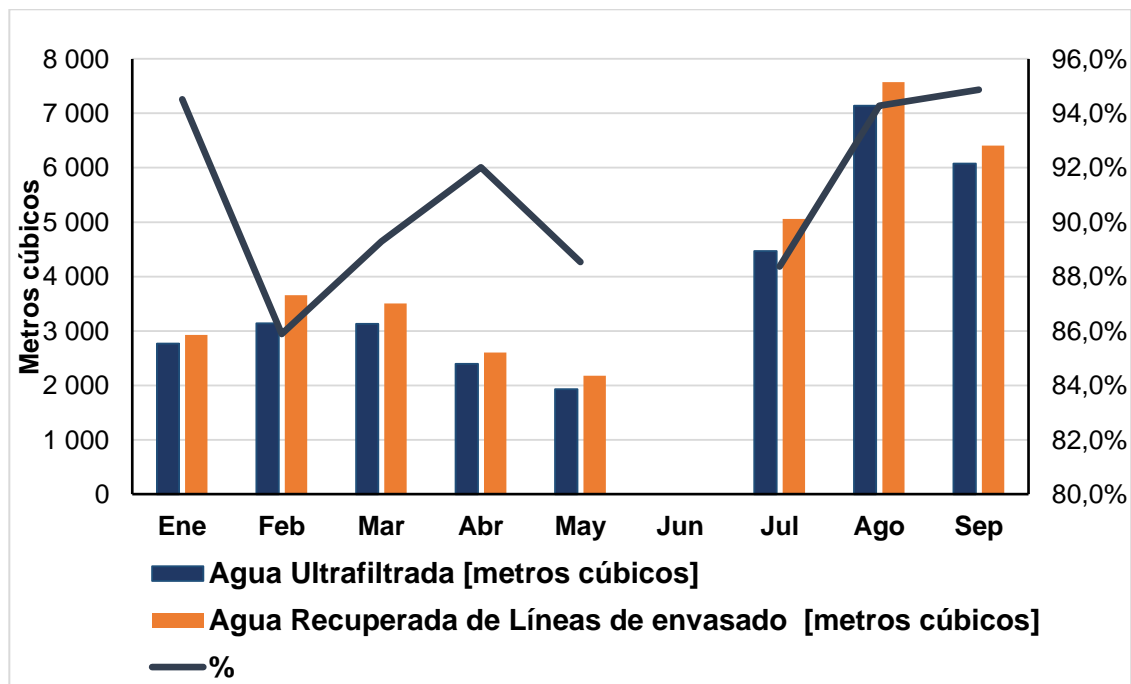
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Comparación de agua ultrafiltrada vs. agua recuperada

MES	Agua Ultrafiltrada [metros cúbicos]	Agua Recuperada de Líneas de envasado [metros cúbicos]	%
Ene	2 768,35	2 929	94,5
Feb	3 139,36	3 655	85,9
Mar	3 128,77	3 504	89,3
Abr	2 396,01	2 604	92,0
May	1 927,47	2 177	88,5
Jun	0.00	0	0,0
Jul	4 469,90	5 058	88,4
Ago	7 139.00	7 572	94,3
Sep	6 077.00	6 406	94,9

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Agua ultrafiltrada vs. agua recuperada



Fuente: elaboración propia.

En la tabla XV se muestran los datos de agua recuperada de las líneas de envasado, en comparación con la cantidad de agua que se entregó después de pasar por el proceso de ultrafiltración, se puede apreciar de mejor manera en la figura 11, que muestra las cantidades de agua producida y recuperada y el porcentaje de agua recuperada, comparado con la cantidad de agua ultrafiltrada que se produce. A partir del mes de febrero se empieza a observar que los valores de recuperación de agua empiezan a reducirse, hasta que en el mes de junio se detiene la planta completamente para hacer una reparación en el sistema de membranas. A partir del mes de julio, la planta empieza su actividad y supera los valores que se habían obtenido en los meses iniciales, obteniendo en el mes de agosto la mayor recuperación de agua: 7 572 metros cúbicos.

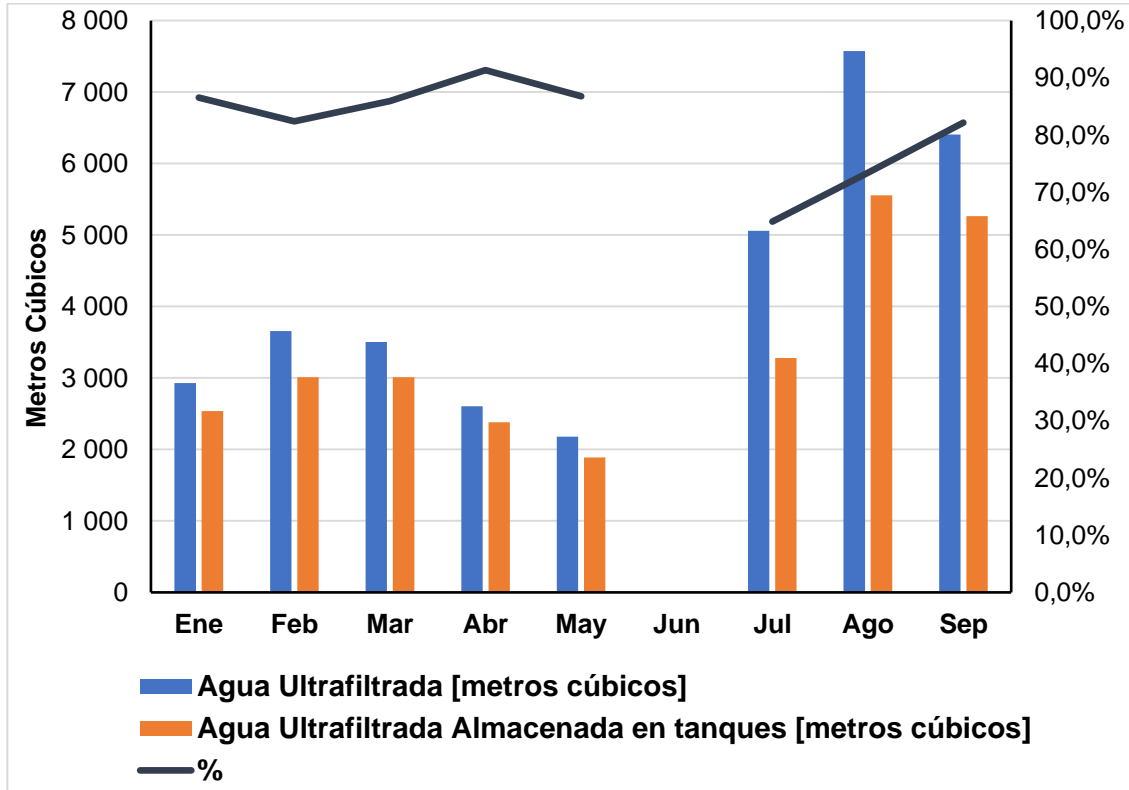
En la tabla XVI se muestra la cantidad mensual de agua recuperada de líneas de envasado, que se envió para recuperación y que circuló a través del sistema de ultrafiltración, y la cantidad de agua ultrafiltrada que se almacenó en tanques de agua recuperada filtrada, lista para ser enviada a los procesos de envasado donde fuere requerida.

Tabla XVI. Comparación de agua ultrafiltrada producida vs. Almacenada

MES	Agua Ultrafiltrada [metros cúbicos]	Agua Ultrafiltrada Almacenada en tanques [metros cúbicos]	%
Ene	2 929	2 534,91	86,5
Feb	3 655	3 009,95	82,4
Mar	3 504	3 010,83	85,9
Abr	2 604	2 378,03	91,3
May	2 177	1 888,40	86,7
Jun	0	0,00	0,0
Jul	5 058	3 278,51	64,8
Ago	7 572	5 554,00	73,3
Sep	6 406	5 262,00	82,1

Fuente elaboración propia.

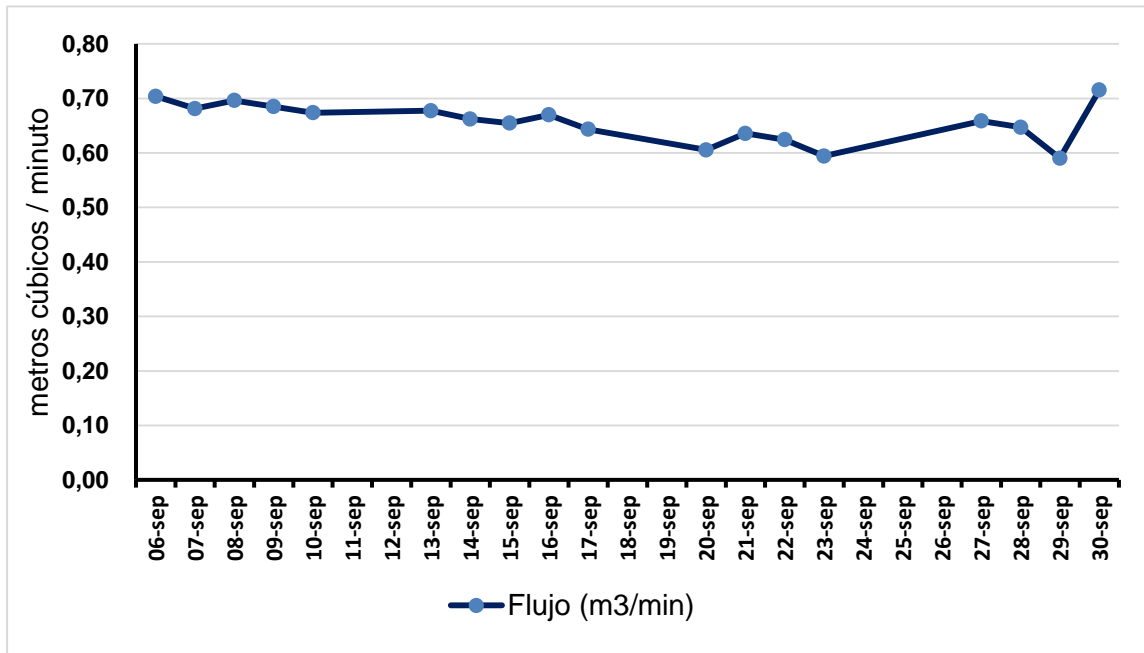
Figura 12. Agua ultrafiltrada producida vs. almacenada



Fuente: elaboración propia.

En la figura 12 se muestra en la barra clara la cantidad de agua que realmente se almacenó después del proceso de ultrafiltración, esto es debido a que, durante la producción de agua ultrafiltrada, hay algunos momentos en los que el agua filtrada se envía a los tanques de almacenamiento de no filtrado, por lo que el agua total que se almacena en los tanques de almacenamiento de filtrado es menor a lo que se produce en la planta de ultrafiltración. Se tiene un promedio de 81 % de agua que se almacena lista para reusar del total de agua que se procesa.

Figura 13. Flujo obtenido en la planta durante un mes de estudio



Fuente: elaboración propia.

En la figura 13 se muestran los resultados de un mes de estudio diario del flujo diario obtenido en la planta de ultrafiltración. Se puede observar que el flujo se mantiene en el rango de 0,6 a 0,7 metros cúbicos por minuto.

El hecho de usar agua suavizada recuperada produce un ahorro en el proceso de producción del agua, ya que esta porción de agua reutilizada que se usa en la planta permite que se deje de usar el agua que se extrae fresca de las fuentes, esto permite dejar de consumir en promedio 3 365 metros cúbicos, se estima el valor del metro cúbico de agua suave como referencia, (Q 10,49 / metro cúbico) se puede ver que se puede llegar a tener un ahorro considerable.

XVII. Valor del agua ultrafiltrada almacenada en tanques

MES	Agua Ultrafiltrada Almacenada en tanques [metros cúbicos]	Costo del agua ultrafiltrada (referencia agua suavizada) (Quetzales)
Ene	2 534,91	26 591,21
Feb	3 009,95	31 574,38
Mar	3 010,83	31 583,61
Abr	2 378,03	24 945,53
May	1 888,40	19 809,32
Jun	0,00	0,00
Jul	3 278,51	34 391,57
Ago	5 554,00	58 261,46
Sep	5 262,00	55 198,38

Fuente: elaboración personal.

En la tabla XVII se muestra el costo del agua ultrafiltrada que se recuperó después de su paso por la planta de ultrafiltración, el costo de operación que se estimó de la planta de ultrafiltración y el ahorro que representa el dejar de consumir agua suave en la planta.

Tabla XVIII. Valor del agua suavizada producida en la planta

MES	Agua suavizada producida (metros cúbicos)	Costo del agua suavizada producida (Quetzales)
Ene	38 098,00	399 648,02
Feb	39 266,00	411 900,34
Mar	56 396,00	591 594,04
Abr	61 200,00	641 988,00
May	49 541,00	519 685,09
Jun	47 335,00	496 544,15
Jul	41 134,00	431 495,66
Ago	43 600,00	457 364,00
Sep	39 982,00	419 411,18

Fuente elaboración propia.

Tabla XIX. **Ahorro por uso de agua suave mensual**

MES	Ahorro por uso de agua ultrafiltrada (Quetzales)	Porcentaje de ahorro (%)
Ene	26 591,21	6,65
Feb	31 574,38	7,67
Mar	31 583,61	5,34
Abr	24 945,53	3,89
May	19 809,32	3,81
Jun	0,00	0,00
Jul	34 391,57	7,97
Ago	58 261,46	12,74
Sep	55 198,38	13,16

Fuente: elaboración propia.

En las tablas XVII a la XIX se muestran los valores del costo del agua ultrafiltrada, tomando como referencia el valor del agua suavizada, el costo de producir agua suavizada para la planta y el valor de ahorro que se tiene si se usa toda el agua ultrafiltrada que se almacena.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este estudio se encontró que hay varios procesos del área de envasado de la planta de bebidas en estudio, que pueden aportar agua suavizada para un proceso de recuperación y reutilización de agua. La primera parte del estudio consistió en definir el área del proyecto, que se decidió en el área de envasado de bebidas de toda la planta, luego se definió que los equipos que usan agua suavizada serían objeto de estudio, para determinar la calidad del agua del efluente de cada uno de los equipos que usan agua como elemento en su proceso de envasado de bebidas. De acá, que se definieron como parte del estudio los lavadores y enjuagadores de envase, nuevo y retornable, los atemperadores y pasteurizadores, bombas de vacío de las llenadoras de bebidas que usan agua para generar vacío, estos equipos se consideraron de todas las líneas de envasado de la planta. En la tabla III se muestran todos los equipos que se consideraron durante el estudio de recuperación de agua y la línea a la cual pertenecen en el proceso de envasado.

El primer paso fue hacer los muestreos en los distintos equipos que usan agua suavizada en su proceso de fabricación y envasado de bebidas, haciendo de manera simultánea una medición del flujo del efluente, obteniéndose con ello un valor de aporte al efluente de la planta, con un valor estimado de flujo mensual de agua, que tiene características definidas, por la clase de proceso que se está descartando, es decir que no es lo mismo medir el caudal de agua de una lavadora de envases retornables, que una que solo se usa como enjuague de envases nuevos, ya que el envase retornable genera mucha suciedad, que está dada por las condiciones generales del manejo del envase, normalmente los envases retornables de vidrio tienden a contribuir con una

carga muy alta de contaminantes, además de contener residuos de producto, lo cual aporta también como carga en la demanda bioquímica de oxígeno del efluente.

En la tabla IV se muestran los flujos que se estimaron para cada uno de los efluentes de los equipos de envasado, y en la figura 6 se observa el aporte que hacen los 24 puntos que se definieron para análisis del agua de desecho. Al momento de determinar los flujos de agua en los efluentes, se tomaron muestras para hacer los análisis químicos, físicos y biológicos del agua, resultando con esto que los puntos a considerar para recuperar agua fueron los puntos con los correlativos 4, 5, 6, 11, 17, 21 y 22. Como se muestra en la tabla XIX, el punto 4 corresponde a una línea de envasado de producto en lata de aluminio, al igual que el punto 5.

Tabla XX. Efluentes que aportan agua al proceso de recuperación

#	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	FLUJO MEDIDO m ³ /mes
LINEA # 1		
4	Warmer / Pasteurizadora, descarga	261
LINEA # 2		
5	Lavadora de latas (<i>rinser</i>)	4 320
LINEA # 3		
6	<i>Rinser</i>	693
LINEA # 4		
11	Pasteurizador, rebalse permanente	5 203
LINEA # 5		
17	Pasteurizadora, rebalse permanente	1 210
LINEA # 7		
21	Lavadora de envases Número 1, descarga	4 500
22	Lavadora de envases Número 2, descarga	4 500

Fuente: elaboración propia.

El punto de muestreo 6 corresponde a una línea de envasado de producto en plástico pet, los puntos 11 y 12 corresponden al efluente de dos pasteurizadores de bebida carbonatada y los puntos 21 y 22 a descargas de lavadoras de envase de plástico retornable.

Entre las características más importantes para la definición de los puntos de recuperación de agua está la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), ya que como se puede ver en la tabla V, de los valores obtenidos son, como se muestra resumido a continuación, todos tienen valores por debajo de 100 mg/l de DBO₅.

Tabla XXI. Características físicas de los efluentes que aportan agua

#	PUNTO DE MUESTREO DE AGUA	Sólidos en suspensión mg/L	Sólidos disueltos mg/L	Sólidos Totales mg/L	DBO mg/L
4	Warmer/Pasteurizadora, descarga	12	440	452	0
5	Lavadora de latas (rinser)	11	264	275	10
6	Rinser	19	234	253	10
11	Warmer/Pasteurizadora, rebalse permanente	8	424	432	49
17	Warmer/Pasteurizadora, rebalse permanente	12	381	393	35
21	Lavadora de envases número 1, descarga	12	498	510	77
22	Lavadora de envases número 2, descarga	13	512	525	68

Fuente: elaboración propia.

La calidad del agua de los efluentes que se decidieron para recuperación de agua también fue otro factor, aparte del flujo de agua que aportan al proceso, ya que con los valores que tienen se espera que la carga para las membranas de ultrafiltración no sea tan grande. En las tablas VI hasta la XI, se muestran los resultados de los análisis realizados a todos los efluentes de los

equipos, que también contribuyeron a caracterizar el agua de alimentación que se espera tener en el proceso de recuperación.

El rendimiento de un sistema de membranas depende en gran medida de la calidad del agua de alimentación, esta influye sobre la vida útil de la membrana, la frecuencia de descarga, la frecuencia de limpieza, el índice de flujo recomendado y la calidad de la filtración en general.

Es casi imposible predecir el rendimiento preciso de un sistema dado que existe una amplia variedad de ensucadores que pueden hallarse en los suministros de agua y porque estos pueden variar, según haya cambios en el proceso productivo; sin embargo, lo mejor es realizar un estudio piloto para determinar el rendimiento a largo plazo del sistema de membranas, siendo muy importante que se trate de tener referencia de hasta donde se quiere llegar, es decir, tener bien definidos los límites esperados en el agua de alimentación con el fin de obtener resultados significativos.

En general, los materiales que ensucian pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Sólidos suspendidos
- Escamas
- Material coloidal
- Óxidos de metal
- Aceite/Grasa
- Materiales biológicos

Debido a que todos los procesos de membrana involucran la separación de contaminantes de una solución, por la acción del bombeo continuo de agua

través de una membrana, la concentración resultante de contaminantes aumenta la probabilidad de que estos cubran la superficie de la membrana.¹⁶

Los flujos medidos de agua en los equipos muestran la cantidad de agua que se puede recuperar, sin embargo, no todos los equipos que se escogieron aportan agua todo el tiempo, debido a que hay muchos factores que afectan para que los equipos estén todo el tiempo disponibles para la producción, factores normales en una planta productiva como son paros por mantenimiento y limpieza, paros por descanso del personal, y paros por decisiones estratégicas de la planeación de la producción.

La cantidad de agua recuperada máxima que se obtuvo durante el tiempo del estudio es un 17 % del total del agua suavizada producida en la planta. En el mes de agosto se recuperaron 7 572 metros cúbicos de agua suavizada recuperada, de un total de 43 600 metros cúbicos de agua suavizada producida en la planta.

Se tiene un acumulado de agua suavizada recuperada en salones de envasado de 26 916 metros cúbicos de agua durante el tiempo del estudio, si se considera que se dejan de usar estos metros cúbicos de agua suavizada para los procesos de envasado, con un costo de Q 10,49 / metro cúbico, se obtiene un valor monetario de ahorro por el total de agua suavizada recuperada de Q 282 355,45.

Por aparte, se estimó que el costo de operación mensual de la planta piloto de ultrafiltración es de Q 8 000,00, por lo que el gasto por operación de la planta de UF en el tiempo de estudio es de Q 64 000,00.

¹⁶ CARTWRIGHT, Peter S. *Causas de y curas para el ensuciamiento de membranas*. 2004. p.10.

Entonces en el tiempo que dura el estudio se obtiene ahorro por un total de Q218 355,45 en producción de agua suave, sin contar que esto implica también que se dejaron de usar 26 916 metros cúbicos de agua de las fuentes de la planta, ya que se reutilizaron del proceso de recuperación de agua.

Considerando que la planta de agua recuperada de ultrafiltración está en funcionamiento con este valor, y que la inversión del equipo está alrededor de Q1 500 000,00 entre costo de la planta piloto, montaje de tuberías y tanques de captación. Se tiene que se recuperará el costo de la planta en un plazo de 68 meses. En el proyecto se aprovechó infraestructura ya existente, por ejemplo, de la planta, se usaron algunos tanques antiguos para almacenar agua filtrada y no filtrada, se usaron algunas tuberías existentes para transportar el agua de las líneas de envasado hasta los tanques de almacenamiento.

Esto es desde el punto de vista de ahorro en la planta, sin embargo, el ahorro promedio mensual de 3 365 metros cúbicos de agua tiene impacto positivo en las fuentes de aprovisionamiento de agua. Otro punto interesante es que se considera que las candelas del sistema de membranas de ultrafiltración tienen un tiempo de vida estimado de por lo menos 7 años, haciendo un uso adecuado del sistema.

CONCLUSIONES

1. Es factible recuperar agua suavizada en la planta de envasado en estudio, ya que esta se logra almacenar adecuadamente en los tanques de agua no filtrada, previo a pasar por el proceso de ultrafiltración.
2. El agua suavizada que se recupera es adecuada para utilizarse en la planta de ultrafiltración, siendo muy importante la caracterización previa de los efluentes de cada uno de los equipos que se definen para aportar agua al proceso, separándolos para evitar ensuciamiento innecesario en las membranas.
3. El agua producida después de pasar por la planta de ultrafiltración cumple con las características adecuadas para su uso posterior en equipos secundarios o de contacto indirecto con producto terminado, como pasteurizadores, *warmers* o bombas de vacío.
4. La cantidad de agua que se produce en la planta de ultrafiltración oscila entre un 10 % y un 20 % del total de agua suavizada usada en la planta, reduciendo en este rango el uso de agua fresca de las fuentes de la planta.
5. El proyecto de recuperación de agua provoca ahorros económicos y de agua, de tal manera que es factible que el proyecto se pague en un tiempo de 68 meses, obteniéndose un ahorro durante el tiempo de estudio de Q 218 355,00.

RECOMENDACIONES

1. Para poder implementar un proceso de recuperación de agua la parte más importante es la caracterización de cada uno de los efluentes, por lo tanto se recomienda hacer un análisis exhaustivo del agua antes de tomar decisiones para definir qué equipo se va a usar en este proceso.
2. Al momento de la implementación del proceso se recomienda usar tuberías de acero inoxidable u otro material que no aporte hierro al agua, que pueda interferir con el desempeño de las membranas.
3. Se deben separar los colectores de las bandejas de lubricante de cadenas transportadoras de envase, porque normalmente contienen silicones o componentes que restan vida útil a los sistemas de membranas.
4. Se debe concientizar al personal del área de envasado sobre que el agua que se está distribuyendo en las tuberías de agua reprocesada cumple adecuadamente para poderse usar en los equipos.

BIBLIOGRAFIA

1. BARRERA, Clara, et.al. *Guía de Saneamiento Básico Industrial*. 1ª ed. México: Instituto Mexicano del Seguro Social. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. 1987. 413 p.
2. CALDERÓN, Felipe. *Análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno*. [en línea]<http://www.drcalderonlabs.com./Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_de_DBO5.htm>[Consulta: 15 de agosto de 2018]
3. CARTWRIGHT, Peter S. *Causas de y curas para el ensuciamiento de membranas*. Estados Unidos: Revista Agua Latinoamérica. 2004. 50 p.
4. CLESCERE, L.; et.al. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 17ª ed. Estados Unidos: Editorial American Public Health Association, 1,989. 1360 p.
5. FOUST, Allan S.; et.al. *Operaciones unitarias*. 10a ed. México: Cecsa, 1979. 704 p.
6. GUILLÉN, Arturo Bolaños. *Tutorial de análisis de agua*. [en línea]. <<http://arturobola.tripod.com/index.html>>[Consulta: 15 de agosto de 2010].
7. INGE, A. G. *Manual de operación del equipo de ultrafiltración*. Alemania: 2007. 10 p.

8. MCCABE, Warren L.; et al. *Principios de operaciones unitarias*. 4a. ed. México: McGraw-Hill, 1,985. 1112 p.
9. MERCK. *Manual de equipo Oxitop*. Alemania: Merck, 1996. 8 p.
10. PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización superficial y estructural de membranas microporosas*. Tesis Doctoral. España: Universidad de Valladolid, 1,999. 329 p.
11. PENTAIR. *Guía de aplicaciones de ultrafiltración freshpoint*. [en línea] <<http://waterpurification.pentair.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/42680-s.pdf>>.[Consulta: 15 de agosto de 2018].
12. PERRY, Robert H.; et al. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw Hill, 1,992. Vol. 1-2. 2577 p.
13. RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Alba; et.al. *Tratamientos avanzados de aguas residuales*. España: Citme, 2006. 137p.

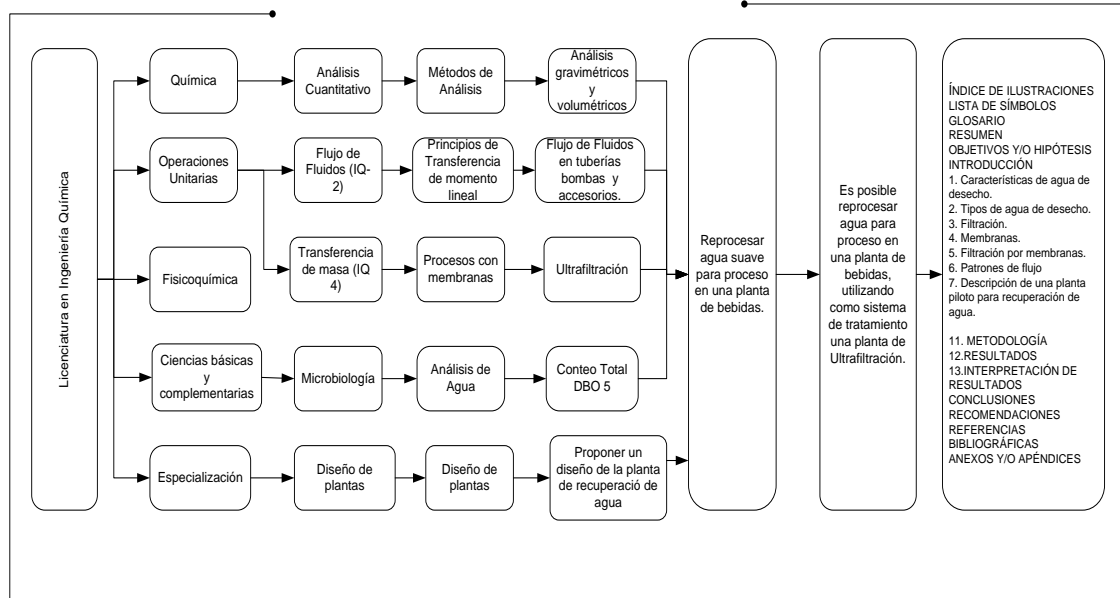
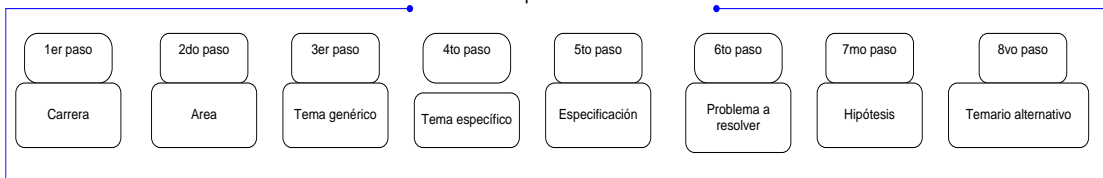
APENDICES

Apéndice I. Tabla de requisitos académicos.

Diagrama de requisitos académicos para iniciar trabajo de graduación.

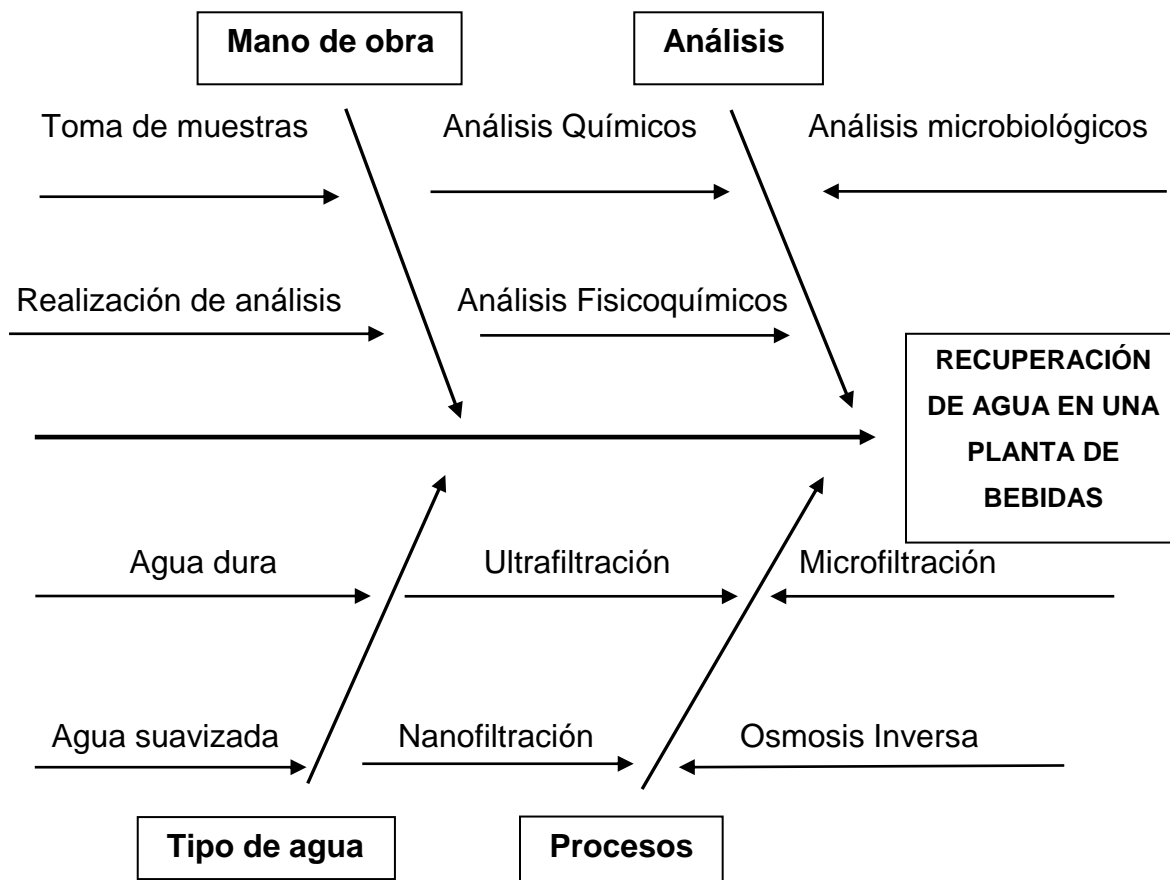
UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN –ULTRAFILTRACIÓN- COMO OPCIÓN PARA RECUPERACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE BEBIDAS.

ANEXO: Requisitos Académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice II. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Anexo 1. Descripción de análisis de aguas

En esta sección se incluye la descripción de métodos de análisis de aguas.

Alcalinidad

Basado en Método 2 320 B (ASTM).

Generalidades

La alcalinidad en el agua tanto natural como tratada, usualmente es causada por la presencia de iones carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) y bicarbonatos (HCO_3^-), asociados con los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} . La alcalinidad se determina por titulación de la muestra con una solución valorada de un ácido fuerte como el HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados ya sea por medios potenciométricos o por medio del cambio de color utilizando dos indicadores ácido-base adecuados.

Almacenaje de la muestra

La muestra de deberá analizar de inmediato. Los resultados de muestras almacenadas no son representativos.

Campo de aplicación

Este método es aplicable para la determinación de la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, en aguas naturales, domésticas, industriales y residuales. La medición de la alcalinidad sirve para fijar los parámetros del tratamiento químico del agua, así como ayudar al control de la corrosión y la

Continuación anexo 1.

incrustación en los sistemas que utilizan agua como materia prima o en su proceso.

Principios

En este método la alcalinidad se determina por titulación de la muestra con una solución valorada de un ácido fuerte como el HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados por medio del cambio de color de dos indicadores ácido-base adecuados, como son fenolftaleína y naranja de metilo. Se muestra la reacción:

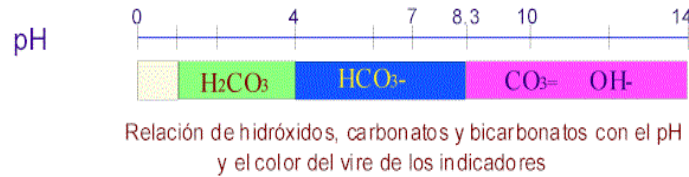


Cuando se le agrega a la muestra de agua el indicador de fenolftaleína y aparece un color rosa, esto indica que la muestra tiene un pH mayor que 8,3 y es indicativo de la presencia de carbonatos. Se procede a titular con HCl valorado, hasta que el color rosa vire a incoloro, con esto se titula la mitad del $\text{CO}_3^{=}$.

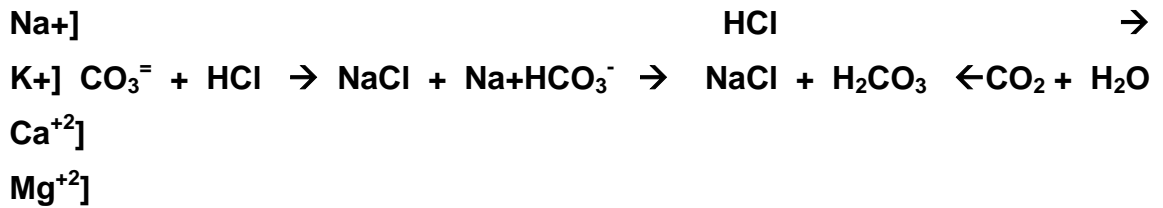
En seguida se agregan unas gotas de indicador de naranja de metilo, apareciendo una coloración naranja y se continúa titulado con HCl hasta la aparición de una coloración rojiza. Con esto se titula los bicarbonatos (HCO_3^-) y la mitad restante de los carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$). Si las muestras de agua tienen un pH menor que 8,3 la titulación se lleva a cabo en una sola etapa. Se agregan unas gotas de indicador de naranja de metilo, apareciendo una coloración naranja y se procede a titular con solución de HCl hasta la aparición de un color roja, con eso se titula los HCO_3^- .

Continuación anexo 1.

Relación de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos con el pH y el color del vire de los indicadores



Fuente: Dr. Calderon Labs. Consulta: 2018.



Dureza

Basado en Método 2 340 C (ASTM)

Generalidades

Originalmente la dureza de agua fue entendida como la medida de la capacidad del agua para precipitar jabón, el cual es precipitado principalmente por los iones de calcio y magnesio presentes. Otros cationes polivalentes también pueden precipitar jabón, pero estos a menudo están en formas complejas, frecuentemente con constituyentes orgánicos, cuyo rol en la dureza del agua puede ser mínimo y muy difícil de definir.

Continuación anexo 1.

La dureza es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio. La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón, al producirse sales insolubles.

En calderas y sistemas enfriados por agua se producen incrustaciones en las tuberías y una pérdida en la eficiencia de la transferencia de calor. Además le da un sabor indeseable al agua potable. Grandes cantidades de dureza son indeseables por las razones antes expuestas y debe ser removida antes de que el agua tenga el uso apropiado para las industrias de bebidas, lavanderías, acabados metálicos, teñido de telas y textiles. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/l de dureza. Niveles superiores a 500 mg/l son indeseables para uso doméstico. La dureza es caracterizada comúnmente por el contenido de calcio y magnesio y expresada como carbonato de calcio equivalente.

Existen dos tipos de dureza de agua:

- Dureza temporal: está determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como dureza de carbonatos.
- Dureza permanente: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como dureza de no carbonatos.

Continuación anexo 1.

Interpretación de la dureza del agua

<u>Dureza como CaCO₃</u>	<u>Interpretación</u>
0-75	agua suave
75-150	agua poco dura
150-300	agua dura
> 300	agua muy dura

Fuente: elaboración propia.

En agua potable el límite máximo permisible es de 300 mg/l de dureza.
En agua para calderas el límite es de 0 mg/l.

Almacenaje de la muestra

La muestra puede ser recolectada y almacenada en un recipiente de plástico bien tapado.

Campo de aplicación

El análisis de la dureza total en muestras de aguas es utilizado en la industria de bebidas, lavandería, fabricación de detergentes, acabados metálicos, teñido y textiles. Además, en el agua potable, agua para calderas, entre otros.

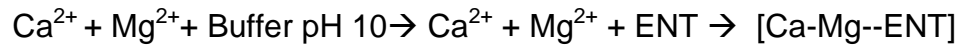
Principios

Este método está basado en la cuantificación de los iones calcio y magnesio por titulación con el EDTA y su posterior conversión a dureza total expresada como CaCO₃. La muestra de agua que contiene los iones calcio y magnesio se le añade al buffer amoniacal de pH 10, posteriormente se agrega el indicador negro eriocromo T (ENT), que hace que se forme un complejo de

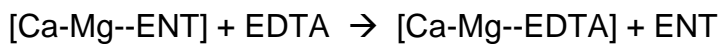
Continuación anexo 1.

color púrpura, enseguida se procede a titular con EDTA (sal disódica) hasta la aparición de un color azul.

Reacciones:



complejo púrpura



color azul

pH

Basado en Método 4 500-H⁺ B (ASTM)

Generalidades

En 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:

$$\text{pH} = - \log [\text{H}^+]$$

Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. Por ejemplo, una concentración de $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-8} \text{ M}$ (0,00000001), es simplemente un pH de 8 ya que: $\text{pH} = - \log [10^{-8}] = 8$ La relación entre pH y concentración de iones H se puede ver en la figura 18, en la que se incluyen valores típicos de algunas sustancias conocidas:

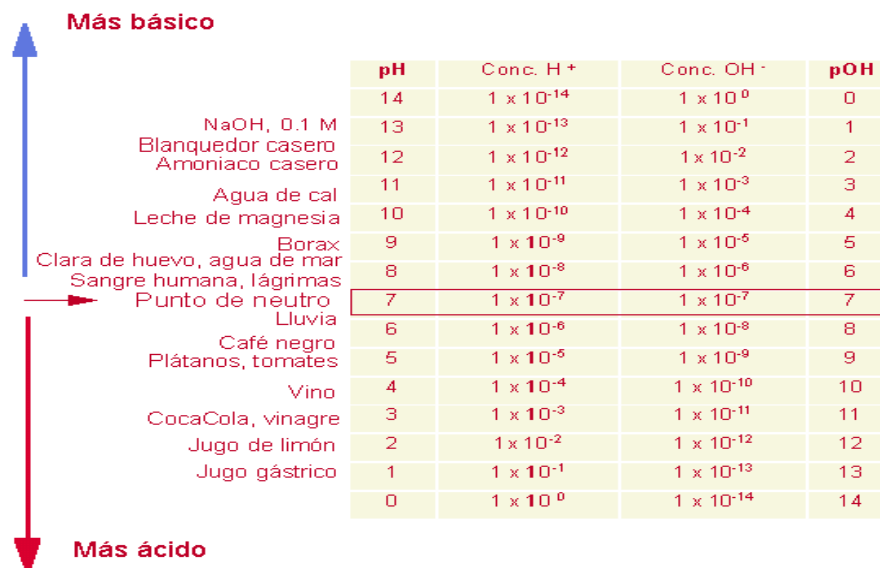
Continuación anexo 1.
Almacenaje de la muestra

Las muestras para determinar pH deberán ser tomadas en recipientes de polipropileno y asegurándose que estén bien tapadas, se recomienda analizar el pH lo más pronto posible y evitar la exposición al aire, en especial las muestras de aguas alcalinas, ya que el CO₂ del aire tiende a reaccionar con la alcalinidad de la muestra y variar su pH.

Campo de aplicación

Este método de prueba se utiliza para la determinación rutinaria del pH en agua, a condiciones controladas de laboratorio.

Relación de acidez para distintas soluciones y materiales



RELACIÓN DE pH, pOH y Concentración de H⁺ y OH⁻

Fuente: BOLAÑOS, Arturo. *Tutorial de análisis de agua*. Consulta: 2018.

Continuación anexo 1.

Principios

La determinación del pH en el agua es una medida de la tendencia de su acidez o de su alcalinidad. No mide el valor de la acidez o alcalinidad (vea el método de determinación de alcalinidad). Un pH menor de 7,0 indica una tendencia hacia la acidez, mientras que un valor mayor de 7,0 muestra una tendencia hacia lo alcalino.

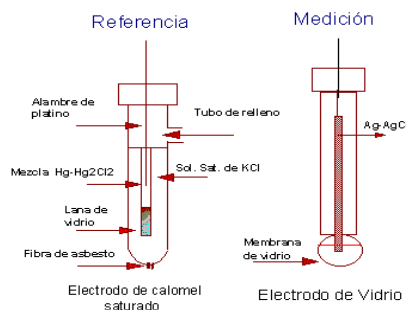
La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Un pH muy ácido o muy alcalino puede ser indicio de una contaminación industrial. El valor del pH en el agua es utilizado también cuando interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante en las plantas de tratamiento de agua.

Este método determina el pH midiendo el potencial generado (en milivolts) por un electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ion H^+ , este potencial es comparado contra un electrodo de referencia que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los milivolts generados hacia al circuito de medición. La cadena electroquímica de este sistema de medición es:

Esquema que muestra los electrodos utilizados

$Hg / Hg_2Cl_2\text{-Sol Sat KCl // Vidrio/HCl 0.1N/Ag-AgCl}$

Continuación anexo 1.



Fuente: BOLAÑOS, Arturo. *Tutorial de análisis de agua*. Consulta: 2018.

Interferencias

El electrodo de vidrio es relativamente inmune a las interferencias del color, turbidez, material coloidal, cloro libre, oxidantes y reductores. La medición se afecta cuando la superficie de la membrana de vidrio está sucia con grasa o material orgánico insoluble en agua, que le impide hacer contacto con la muestra, por lo anterior se recomienda la limpieza escrupulosa de los electrodos. En muestras de un pH mayor a 10 se presenta el error del sodio, el cual puede ser reducido utilizando electrodos especiales de bajo error de sodio y haciendo las correcciones indicadas en el instructivo del electrodo.

La temperatura tiene dos efectos de interferencia, el potencial de los electrodos y la ionización de la muestra varían. El primer efecto puede compensarse haciendo un ajuste en el botón de la temperatura que tienen todos los aparatos. El segundo efecto es inherente de la muestra y solo se toma en consideración, anotando la temperatura de la muestra y su pH; para más exactitud, se recomienda que la muestra esté a 25 °C, que es la temperatura de referencia para la medición del pH.

Continuación anexo 1.

Aparatos

Medidor de pH de laboratorio

La tabla siguiente muestra las características típicas más importantes de cuatro tipos de aparatos. Cualquier aparato, junto con sus electrodos asociados (vidrio y referencia), puede ser usado, la elección será de acuerdo con la precisión deseada en la medición.

Corrección de aparatos para medición de pH

	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV
Escala normal	0 a 14	0 a 14	0 a 14	0 a 14,000
Escala expandida		2 unidades de pH	1,4 unidades de pH	
División de la escala	0,1	0,01	0,01	0,001
Exactitud	+/- 0,05	+/- 0,01	+/- 0,007	+/- 0,002
Respetabilidad	+/- 0,02	+/- 0,005	+/- 0,002	+/- 0,002
Corrección por Tempo				
Manual o Automática	si	si	si	si
Intervalo en ° C	0 a 100	0 a 100	0 a 100	0 a 100
División menor ° C	2	2	2	2
Corrección - pendiente	-	si	si	si

Fuente: BOLAÑOS, Arturo. *Tutorial de análisis de agua*. Consulta: 2018.

Turbidez

Generalidades

La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de

Continuación anexo 1.

gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. En lagos la turbiedad se debe a dispersiones extremadamente finas y coloidales, en los ríos se debe a dispersiones normales. La eliminación de la turbiedad se lleva a cabo mediante procesos de coagulación, asentamiento y filtración. La medición de la turbiedad es una manera rápida que sirve para saber cuándo, cómo y hasta qué punto se debe tratar el agua para que cumpla con la especificación requerida. La turbiedad es de importante consideración en las aguas para abastecimiento público por tres razones:

- Estética: cualquier turbiedad en el agua para beber produce en el consumidor un rechazo inmediato y pocos deseos de ingerirla y utilizarla en sus alimentos.
- Filtrabilidad: la filtración del agua se vuelve más difícil y aumenta su costo al aumentar la turbiedad.
- Desinfección: un valor alto de la turbidez, es una indicación de la probable presencia de materia orgánica y microorganismos que van a aumentar la cantidad de cloro u ozono que se utiliza para la desinfección de las aguas para abastecimiento de agua potable.

El límite máximo permisible en el agua potable es de 10 NTU (unidades de turbidez nefelométricas).

Almacenaje de la muestra

Se determina la turbidez del agua el mismo día que fue muestreada. Si esto no es posible, las muestras se pueden conservar en la obscuridad hasta por 24 horas, refrigeradas a 4 °C. Para tiempos de almacenamientos más prolongados la muestra se puede preservar con la adición de 1 g de cloruro mercúrico por litro, pero no es recomendable.

Continuación anexo 1.

Campo de aplicación

Este método de prueba es aplicable para la medición de turbidez en muestras de agua de uso doméstico, industrial y residual. El intervalo de medición es de 0,05 a 40 NTU. Valores de turbidez mayores a 40 se pueden determinar, diluyendo la muestra proporcionalmente con agua destilada.

Principios

Este método está basado en una comparación de la intensidad de luz dispersa por la muestra bajo condiciones definidas con la intensidad de luz dispersa por una referencia estandarizada bajo las mismas condiciones. A mayor dispersión de luz, mayor turbidez. Se utiliza un polímero de formazina como referencia de una suspensión estándar de turbidez, debido a que es una solución sencilla de preparar y sus propiedades de dispersión de luz son más reproducibles.

Algunos de estos instrumentos dependen de comparaciones visuales, otros utilizan una celda fotoeléctrica que mide la luz dispersada a 90° a la trayectoria del rayo de luz en la muestra (nefelometría). Dichos aparatos son los que actualmente se están usando, por su mayor precisión.

El turbidímetro de Hellige, que es el utilizado en este método, es del tipo nefelométrico, se basa en el efecto de Tyndall. Se compara un rayo de luz que se hace pasar hacia arriba por la muestra, con la luz dispersada hacia arriba por las partículas suspendidas de la solución turbia, la cual es iluminada lateralmente a 90 °. La unidad de turbiedad fue definida "como la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada", como se muestra a continuación:

1 unidad nefelométrico de turbiedad (NTU) = 7,5 ppm de SiO₂

Continuación anexo 1.

Actualmente la unidad utilizada es la NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez) que equivale a 1 ppm de formazina estándar.

Los valores de turbiedad pueden variar desde cero hasta varios miles de unidades en aguas altamente turbias, consecuentemente no hay un método de determinaciones que abarque tan amplio intervalo. Existen tres métodos comúnmente empleados.

- Método del Turbidímetro Hellige
- Método del Nefelómetro Fotoeléctrico
- Método Turbidimétrico de Bujía de Jackson

La unidad utilizada normalmente es la NTU (unidades nefelométricas de turbidez), otras unidades que aún se usan se pueden transformar utilizando la siguiente tabla:

Comparación de Unidades Nefelométricas de Turbidez y unidades Jackson de turbidez

Unidad	JTU	NTU	SiO ₂ mg/l
JTU	1,0	19	2,5
NTU	0,053	1	0,3
SiO ₂ mg/l	0,4	7,5	1

Fuente: elaboración propia.

Interferencias

La determinación de turbidez es aplicable a cualquier muestra de agua que esté libre de basuras y partículas gruesas que puedan asentarse con rapidez. Se obtienen resultados falsos por material de vidrio sucio, por la

Continuación anexo 1.

presencia de burbujas y por los efectos de vibración que puedan alterar la visibilidad en la superficie de la muestra de agua.

Aparato

Se utiliza turbidímetro para hacer esta medición, que arroja valores en NTU. Consiste en un nefelómetro con una fuente de luz para irradiar la muestra y uno o más detectores fotoeléctricos con indicador de lectura para indicar la intensidad de la luz dispersa a 90° de la luz incidente.

DBO₅ (Demanda bioquímica de Oxígeno)

Generalidades

La determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es un método empírico, en el cual se usan procedimientos estandarizados para la determinación de los requerimientos relativos de oxígeno de aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas.

Los datos de la prueba de la DBO₅ se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales. La prueba de la DBO₅ es un procedimiento experimental, tipo bioensayo, que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20 °C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento del agua, luz solar y la concentración de oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos deben tomar en cuenta los factores anteriores para lograr una adecuada interpretación.

Continuación anexo 1.

Las muestras de agua residual o una dilución conveniente de las mismas se incuban por cinco días a 20 °C en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método Winkler o una modificación de este, durante el período de incubación produce una medida de la DBO₅.

En la práctica lo que se mide es el oxígeno consumido durante el proceso de biodegradación. Esta prueba, que normalmente se informa sobre un período de cinco días con incubación de la muestra a 20 °C, permite determinar la eficiencia de una planta de tratamiento y estimar los procedimientos adecuados para evitar la contaminación de las aguas naturales por causa de efluentes nocivos que contienen materia orgánica.

Almacenaje de la muestra

Las muestras para determinación de la DBO₅ se deben analizar con prontitud; si no es posible, es útil refrigerarlas a una temperatura cercana al punto de congelación, ya que se pueden degradar durante el almacenamiento, dando como resultado valores bajos. Sin embargo, es necesario mantenerlas el mínimo tiempo posible en almacenamiento, incluso si se llevan a bajas temperaturas. Antes del análisis calentarlas a 20 °C.

Muestras simples

Si el análisis se emprende en el intervalo de 2 horas después de la recolección no es necesario refrigerar la muestra; de lo contrario, es útil guardarla a 4 °C o menos y reportar junto con los resultados el tiempo y la temperatura de almacenamiento. Bajo ningún concepto se debe iniciar el análisis después de 24 h de haber tomado la muestra. Las muestras empleadas en la evaluación de las tasas retributivas o en otros instrumentos normativos

Continuación anexo 1.

deben ser analizadas antes de que transcurran 6 h a partir del momento de la toma.

Muestras compuestas

Es importante mantener las muestras a 4 °C o menos durante el proceso de composición, que se debe limitar a 24 horas y aplicar los mismos criterios que para las muestras sencillas, contando el tiempo transcurrido desde el final del período de composición. Es necesario especificar el tiempo y las condiciones de almacenamiento como parte de los resultados. También es importante, antes de realizar el análisis, tener en cuenta aspectos generales acerca de la muestra, la dilución, los controles y la siembra de acuerdo con las consideraciones de los Métodos Estandarizados (ASTME)

Campo de aplicación

La determinación de DBO_5 es una simulación empírica del proceso de degradación de la materia orgánica presente en un medio líquido (acuoso), por medio de microorganismos, tal como ocurre en las corrientes de agua, ríos, lagos y lagunas naturales y artificiales.

Principio

Este estudio se llevó a cabo utilizando el método manométrico, el cual se explicará a continuación. El método manométrico es, de los existentes, el que mejor simula las condiciones reales bajo las cuales ocurre un proceso de biodegradación, ya que en este la manipulación de la muestra es mínima y el oxígeno consumido por los microorganismos proviene del intercambio gaseoso entre la muestra líquida y el aire en contacto con ella.

En este método la muestra se ubica dentro de una botella y, por medio de agitación, el oxígeno presente en la cámara de aire se disuelve en el líquido. Los microorganismos consumen el oxígeno durante el proceso de degradación

Continuación anexo 1.

de la materia orgánica, produciendo dióxido de carbono (CO_2) y agua. El CO_2 es absorbido por lentejas de hidróxido de sodio (o litio) que se colocan en la parte superior de la botella dentro de un vaso de caucho, que a su vez permite el cierre hermético de la misma. Dicha eliminación de CO_2 produce un vacío dentro de la botella que es medido directamente por el sensor electrónico de presión ubicado dentro del sistema OXITOP.

En este método no se requiere la oxigenación previa de la muestra ni del agua de dilución. No es necesario titular ni diluir la muestra (a menos que la carga orgánica sea excesivamente alta). El método se asemeja en un mayor grado a la realidad. No es necesario esperar cinco días para detectar problemas en la preparación o desarrollo del análisis. Dado que el sistema puede ser monitoreado constantemente, sin perturbación de este, se pueden detectar fácilmente desviaciones producidas por errores de método.

En este caso se utiliza hidróxido de litio para absorber la producción de CO_2 , el cual se remueve constantemente para evitar el crecimiento de algas que puedan afectar el resultado de la prueba.

DQO (Demanda Química de Oxígeno)

Generalidades

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ($\text{mg O}_2/\text{l}$). Aunque este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros, entre otros), que también se reflejan en la medida.

Continuación anexo 1.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. Este ensayo es muy útil para la apreciación del funcionamiento de las estaciones depuradoras. No es aplicable, sin embargo, a las aguas potables, ya que al tener un contenido tan bajo de materia oxidable la precisión del método no sería adecuada. En este caso se utiliza el método de oxidación con permanganato potásico.

La DQO varía en función de las características de las materias presentes, de sus proporciones respectivas, de sus posibilidades de oxidación y de otras variables. Es por esto por lo que la reproductividad de los resultados y su interpretación no pueden ser satisfechos más que en condiciones de metodología de ensayo bien definidas y estrictamente respetadas.

Definición

El análisis DQO indica la cantidad de oxígeno procedente de dicromato potásico que, bajo las condiciones de trabajo del procedimiento indicado, reacciona con las sustancias oxidables contenidas en un litro de agua:

1 mol de $K_2Cr_2O_7$ corresponde a 1,5 mol de O_2 . La Indicación en mg/l de DQO es aproximadamente un mg/l de O_2 .

Almacenaje de la muestra

Es preferible obtener la muestra en recipientes de vidrio, debido a que los componentes plásticos pueden contaminar la muestra con componentes orgánicos. La muestra se debe analizar inmediatamente. Si esto es inevitable, es útil conservar la muestra acidificando a un $pH \leq 2$ usando ácido sulfúrico concentrado. La muestra debe estar homogenizada para que sea representativa.

Continuación anexo 1.

Método

La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación se determina fotométricamente la concentración de los iones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ amarillos no consumidos.

Se utiliza el método Spectroquant de Merck para determinación de DQO en varios rangos. Este método es análogo al método estándar 5 220 D de los métodos estandarizados para el análisis de agua y aguas residuales.

Campo de aplicaciones

El *test* determina las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables con dicromato, con algunas excepciones. El material de las muestras son aguas subterráneas y superficiales y es necesario un control de producción y aguas residuales.

Comparación con DBO₅.

El valor obtenido es siempre superior a la demanda biológica de oxígeno (aproximadamente el doble), ya que se oxidan por este método también las sustancias no biodegradables. La relación entre los dos parámetros es indicativa de la calidad del agua. En las aguas industriales puede haber una mayor concentración de compuestos no biodegradables.

Fuente:

CLESCERE, L.; et.al. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 17^a ed. Estados Unidos: Editorial American Public Health Association, 1,989. 1360 p.

