



**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DE
ÓSMOSIS INVERSA QUE PERMITA ESTUDIAR EL TRATAMIENTO DE AGUAS A
NIVEL DE LABORATORIO**

Marhbin Francisco Rodriguez Fontalvo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Asesora

Lina María González Rodríguez, Doctor (PhD) en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita

(Rodríguez Fontalvo, 2022)

Rodríguez Fontalvo, M.F. (2022). *Modelación, simulación y propuesta de diseño de un equipo de ósmosis inversa que permita estudiar el tratamiento de aguas a nivel de laboratorio* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Química



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Esta tesis está dedica a la memoria de mi padre de crianza Nancen Gutiérrez Pertúz quien en vida fue unas de las personas que me animó, un gran guía, la fuerza y la fe de mi padre en sus últimos meses de vida me dieron una nueva apreciación del significado e importancia de una familia unida. También está dedicada a mi madre Luisa Rodríguez quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi abuela Josefa García porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona, a toda mi familia que de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos en especial a mi gran amigo Walder Rodríguez por apoyarme cuando más lo necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por la comprensión brindada cada día, de verdad mil gracias.

Agradecimientos

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de grado y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas palabras son para ustedes. A mi asesora Lina González, por su comprensión, apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me ha tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado, unas buenas, otras malas, otras locas. Gracias por darme la libertad de desenvolverme como ser humano. Y por supuesto a mi querida Universidad, profesores y a todas las autoridades, por permitirme concluir con una etapa de mi vida, gracias por la paciencia, orientación y todo el conocimiento.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
Planteamiento del problema	14
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. Marco teórico	17
2.1. Descripción de la Osmosis Inversa	19
2.1.1. Tratamiento preliminar	21
2.1.1.1. Desbaste	21
2.1.1.2. Desarenador	22
2.1.1.3. Sedimentación.....	23
2.1.1.4. Tanque Imhoff	23
2.1.2. Tratamientos secundarios	24
2.1.2.1. Fangos activados	24
2.1.2.2. Lechos filtrantes (Lechos de oxidación)	24
2.1.2.3. Sedimentación secundaria	24
2.1.3. Tratamientos terciarios	25
2.2. Sustancias en aguas residuales y lixiviadas.....	26
2.3. Industrias con efluentes principalmente orgánicos:	28
2.3.1. Industrias textiles.....	29
2.3.2. Industrias de curtidos	30
2.3.3. Industrias químicas.....	31

2.3.4.	Industrias productoras de explosivos	32
2.3.4.1.	Fabricación de pólvora sin humo	33
2.3.4.2.	Fabricación T.N.T.	33
2.3.4.3.	Fabricación de municiones	33
2.3.5.	Fabricación de pesticidas	34
2.3.6.	Industrias del fósforo.....	34
2.3.7.	Plantas de beneficio o mataderos	35
2.3.8.	Industrias de preparación y conservación de carnes.	36
2.3.9.	Industrias lácteas	36
2.3.10.	Industrias papeleras	37
2.3.11.	Fabricación del papel.....	39
2.3.12.	Industrias de acabado de superficies	39
2.4.	Diseño de un sistema de Osmosis Inversa	48
2.4.1.	Condiciones para cumplir el uso del sistema de osmosis inversa y justificación de la selección de la industria.	48
2.4.2.	Sistemas de membrana	56
2.4.3.	Selección de sistemas de membrana	57
2.4.3.1.	Membranas tubulares	58
2.4.3.2.	Membranas capilares	59
2.4.3.3.	Membranas de fibras huecas	59
2.4.3.4.	Membranas de espiral	60
2.4.3.5.	Membranas almohadiformes.....	61
2.5.	NORMATIVA	61
3.	Metodología	65
3.1.	Flujo patrón de mezcla completa en el módulo de osmosis inversa.	65

3.1.1.	Modelos Analíticos	66
3.1.2.	Modelos de fenómenos de transporte.....	67
3.1.3.	Balances de materia.....	70
3.1.3.1.	Tanque de permeado o producto.....	70
3.1.3.2.	Tanque de alimentación	71
3.1.3.3.	Módulo de osmosis inversa.....	72
3.1.4.	Balances de materia combinados	73
3.1.5.	Modelo de transporte solución-difusión.....	74
3.1.6.	El efecto de la polarización por concentración	76
3.1.7.	Módulo de mezcla completa	79
3.1.8.	Metodología de solución de las ecuaciones diferenciales	81
3.2.	Método con solución practica	82
3.2.1.	Caudal de alimento Q_F (m^3/h)	82
3.2.2.	Caudal de rechazo Q_D (m^3/h)	82
3.2.3.	Caudal de permeado Q_P (m^3/h).	82
3.2.4.	pH.....	82
3.2.5.	Temperatura del agua que ingresa al sistema ($^{\circ}C$).....	82
3.2.6.	Membranas	82
3.2.7.	Tubos de presión	84
3.2.8.	Presión osmótica	84
4.	Resultados	86
5.	Conclusiones	92
6.	Recomendaciones	94
	Referencias	95

Lista de tablas

Tabla 1 Consumos de agua en industrias.....	41
Tabla 2 Caracterización de Aguas residuales industriales	42
Tabla 3 Composición de un lixiviado de vertedero y su variación con el tiempo	44
Tabla 4 Caracterización fisicoquímica del agua industrial	56
Tabla 5 Normativa en la resolución 0631 de 2015 para el sector textil	62
Tabla 6 Información operativa del equipo	87
Tabla 7 Rechazo de elementos por membranas de osmosis inversa	87
Tabla 8 Caudal de entrada, Caudal de rechazo, Caudal de permeado.....	88
Tabla 9 Temperatura, pH.....	88
Tabla 10 Características de membranas	88
Tabla 11 # Membranas y # tubos de presión.....	89
Tabla 12 Concentración en alimento, rechazo, permeado, masa molar de los iones y molalidades del alimento, rechazo, permeado*	89
Tabla 13 Iones, valencia y multiplicación de las valencias por la molalidad del alimento, rechazo y permeado	90
Tabla 14 Cálculos de parámetros	90
Tabla 15 Coeficiente Osmótico y Presión Osmótica.....	90
Tabla 16 Comparación de concentraciones del permeado con la resolución 631 de 2015	91
Tabla 17 Condiciones de entrada y condiciones de operación del equipo.....	91

Lista de figuras

Figura 1 Secuencia de imágenes que explican el proceso de ósmosis inversa	19
Figura 2 Diagrama de flujo operaciones unitarias de una planta de tratamiento de agua.....	21
Figura 3 Rejillas para materiales sólidos gruesos y sólidos finos	22
Figura 4 Esquema de las partes de un tanque desarenador	23
Figura 5 Diagrama explicativo de la ósmosis inversa.....	49
Figura 6 Configuración de una PTAR convencional	51
Figura 7 Membrana tubular.....	58
Figura 8 Membranas capilares	59
Figura 9 Membranas de fibras huecas.....	60
Figura 10 Membrana Espirales	60
Figura 11 Ejemplo de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales.....	64
Figura 12 Esquema del sistema de osmosis inversa que muestra el tanque de alimentación, de permeado y el módulo	69
Figura 13 Esquema que muestra la difusión de soluto y solvente a través de la membrana	75
Figura 14 Esquema de los procesos de difusión en la membrana y la película de líquido. Se muestra la caída de concentración en el lado de solución concentrada.	77
Figura 15 Esquema del módulo de osmosis inversa: Las concentraciones C_{A1} y C_{A2} pueden variar en dirección de flujo y no son iguales a las concentraciones de rechazo y permeado, respectivamente	79
Figura 16 Membrana	83
Figura 17 Presión osmótica.....	84

Siglas, acrónimos y abreviaturas

A_m	Área de membrana, m^2
C_A	Concentración molar del soluto o sal, $kmol/m^3$
C_B	Concentración molar de solvente, $kmol/m^3$
C_{AF}, C_{AD}, C_{AR}	Concentración molar de las corrientes de alimentación, de permeado y rechazo, respectivamente, $kmol/m^3$
C_F, C_D, C_R	Concentración molar de las corrientes de alimentación, de permeado y rechazo, respectivamente, $kmol/m^3$
D	Flujo molar de la corriente de permeado, $kmol/h$
F	Flujo molar de la corriente de alimentación, $kmol/h$
K_L	Coefficiente de transferencia de masa en fase líquida, m/h
N_A, N_B	Flux molares del soluto A, y del solvente B, respectivamente, $kmol/m^2h$
Q_F, Q_D, Q_R	Caudal de las corrientes de alimentación, de permeado y de rechazo, respectivamente, m^3/h
R	Flujo molar de la corriente de rechazo, $kmol/h$
t	Tiempo, h
V_F, V_D	Volumen de solución en el tanque de alimentación y permeado, respectivamente, m^3
δ	Espesor de membrana o de película, m
Π	presión osmótica, bar
ΔP	Caída de presión transmembrana, bar
K_A	Contante de permeabilidad de soluto, m^2/h
K_B	Contante de permeabilidad de solvente, m^2/h
$K=K_B/(K_A C_{B2m})$	Selectividad de la membrana
T	Temperatura, $^{\circ}C$
Z	Valencia de iones
C_a, C_p, C_r	Concentración másica de las corrientes de alimentación, de permeado y rechazo, respectivamente, mg/L
m_a, m_p, m_r	Molalidad de las corrientes de alimentación, de permeado y rechazo respectivamente
STD	Sólido disueltos totales
M	Masa molar

Resumen

El tratamiento de las aguas residuales se hace importante a la hora de minimizar el impacto sobre el medio ambiente ocasionado por el vertido de contaminantes al medio, consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes que afectan tanto la salud humana como al medio ambiente, principalmente reservorios de agua, lagos, lagunas, y estanques naturales causando la eutrofización, que se produce cuando el agua se enriquece de modo artificial con nutrientes. La implementación de los equipos de ósmosis inversa ha sido un gran aporte para el mejoramiento de los procesos donde el recurso principal es el agua, ya que es amigable con el medio ambiente ya que permite a las empresas reciclar el agua y/o disponerla a los sistemas de alcantarillado sin que afecte ni altere la preservación de los demás seres vivos.

Por tal motivo es preciso, que a escala de laboratorio se pueda estudiar este tipo de equipos para el tratamiento de aguas residuales y en este trabajo se ha realizado la modelación, simulación y una propuesta básica de diseño para la implantación de un módulo de osmosis inversa para prácticas de laboratorio. Se utilizó el programa EXCEL, por su versatilidad, como herramienta de cálculo para la estructuración y determinación de datos preliminares del equipo, tomando como base el tratamiento de aguas residuales que cumplan con lo establecido en la resolución 631 de 2015 - Parámetros vertimientos

Palabras clave: Contaminantes, Vertido, Ósmosis inversa, Excel, Aguas residuales.

Abstract

The treatment of wastewater becomes important to minimize the impact on the environment caused by the discharge of pollutants. It consists of a series of physical, chemical and biological processes that aim to eliminate the pollutants that affect both human health as well as the environment, mainly water reservoirs, lakes, lagoons, and natural ponds causing eutrophication, which occurs when water is artificially enriched with nutrients. The implementation of reverse osmosis equipment has been a great contribution to the improvement of processes where the main resource is water. This process is friendly to the environment since it allows companies to recycle water and/or dispose of it at sewage systems without affecting or altering the preservation of other living beings.

For this reason, it is necessary that this type of equipment for wastewater treatment can be studied at a laboratory scale and in this work the modeling, simulation and a basic design proposal for the implementation of a reverse osmosis module have been carried out for laboratory practices. The EXCEL program was used, due to its versatility, as a calculation tool for the structuring and determination of preliminary data of the equipment, based on the treatment of wastewater that complies with the provisions of resolution 631 of 2015 - Vertiment parameters.

Keywords: Pollutants, Discharge, Reverse Osmosis, Excel, Wastewater.

Introducción

La ósmosis inversa es un proceso de separación a través de membranas mediante el cual, aplicando presión, se fuerza al agua de una disolución a pasar a través de una membrana semipermeable. (Fernández-Sempere, Ruiz-Beviá, Salcedo-Díaz, & García-Algado). Con esta técnica se utilizan membranas, las cuales son los elementos que retienen a los solutos, mientras que el fluido las atraviesa. Las membranas son por ello el dispositivo físico capaz de retener al soluto, preferentemente en función del tamaño y de la forma de este.

Es por ello que el dimensionado de una instalación de osmosis inversa requerirá, de la presión osmótica de la disolución en contacto con la membrana, pues dependiendo de ella así podrá asignarse una presión de operación, así como de algunos parámetros característicos de las membranas, entre ellos la relación de corte, el caudal de alimento y permeado (ambos cuantificados generalmente en forma de selectividad, ya que de ellos dependerá, de una parte la calidad del producto, y de otra, la cantidad de membranas requeridas para su obtención. (Pérez-Baez & Susial, 1999)

Los fabricantes de estas membranas en primera medida no detallan los materiales que se encuentran en la membrana, ni el rango en que se pueden variar las condiciones básicas de operación sin que el proceso se vea afectado, esto teniendo en cuenta que desde que se inicia el proceso de osmosis inversa, las membranas deben permanecer húmedas y que los pretratamientos que se realizan antes del alimento pueden ser lentos o presentar alguna variación generando que los flujos de alimento puedan verse afectados, y al no conocer un rango de operación del proceso pueden deteriorar las membranas (Rodríguez, 2019)

Los desafíos actuales en el desarrollo de esta técnica, y por ende su aplicación como sistema complementario en tratamiento de aguas residuales y lixiviados, residen en la fabricación y utilización de membranas inorgánicas, que permitan una limpieza más drástica de las mismas e, incluso, que puedan ser esterilizadas con vapor. Y también, la modificación tanto del diseño de equipos y de procesos como de operación que permitan superar otros inconvenientes como la

concentración de sólidos disueltos (re- polarización). (ALVAREZ, RIUS, ARIERA, ALVAREZ, & COCA, 1996)

Por tanto, en este trabajo se plantea realizar la modelación, simulación y propuesta de diseño de un equipo de ósmosis inversa que pueda ser implementado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química, ya que no fue posible la obtención de información tomando muestras en las afluentes, se requirió indagar en la literatura para poder conocer las características de las aguas residuales.

Para concluir fue posible obtener un bosquejo de las características que tendría un equipo de osmosis inversa a escala de laboratorio, lo cual permitió comparar las concentraciones del agua vertida con las composiciones dadas en la resolución 631 de 2015, permitiendo realizar evaluaciones y recomendaciones para futuros estudios.

Planteamiento del problema

Las industrias tienen la responsabilidad moral, legal y económica de afrontar el tratamiento de sus aguas residuales y lixiviados como uno de los costos del negocio. Las aguas residuales son las cantidades de agua de desecho resultantes de los diferentes procesos, realizados tanto por la población urbana como por las industrias para su tratamiento existen diferentes métodos, sin embargo, este trabajo se centrará en la osmosis inversa como tratamiento complementario de aguas residuales y lixiviados. Teniendo presente que, en la mayoría de las empresas, se debe buscar la forma más rentable y segura de prevenir la contaminación del agua, dar cumplimiento a la legislación y su política ambiental.

En la actualidad, a pesar de las medidas de control y gestión que cada día se llevan a cabo, además de la concienciación ambiental que se va adquiriendo con el paso de las generaciones, hoy día más del 50 % de los residuos generados en todo el mundo acaban en un vertedero para su eliminación definitiva, esto conlleva un grave problema tanto a nivel ambiental como para la salud humana, ya que en estos vertederos se generan productos no deseados debido a la degradación de los residuos depositados, como son los gases de vertedero y los lixiviados como contaminantes principales, entre otros, como vectores de enfermedades o malos olores.

Uno de los problemas más importantes, en cuanto a la contaminación por residuos sólidos, es que se forman líquidos percolados o escurridos de los depósitos de almacenamiento de residuos. Estos líquidos reciben el nombre genérico de lixiviados y su importancia, en cuanto a contaminación, viene dada por su fuerte carga orgánica, la cual es fruto de su paso, con arrastre disolución, a través de los residuos almacenados.

El Banco Mundial afirma que, para mejorar las condiciones de salud y saneamiento en países en desarrollo de América Latina, es necesario trabajar en conjunto entre instituciones públicas, privadas y centros educativos que promuevan la formación de profesionales competentes. Con el fin de garantizar que los sistemas de tratamiento proyectados sean eficientes en el manejo de recursos.

El agua representa el elemento más importante para la supervivencia de los seres humanos; debido a que se considera como un factor clave para el desarrollo de las actividades cotidianas, domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas.

Para la realización de este trabajo de grado se tiene en cuenta la tecnología de filtración por membranas tales como la ósmosis inversa y la nanofiltración ha mostrados ser una alternativa prometedora para eliminar contaminantes. En comparación, la nanofiltración es menos efectiva que la ósmosis inversa, ya que en esta última se puede tener una remoción casi completa de contaminantes.

Por tanto se propone para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería tener entre los procesos estudiados un equipo de ósmosis inversa que permita su implementación como tratamiento complementario de aguas residuales y lixiviados, el cual se utilizara en la enseñanza de los alumnos de pregrado y posgrado donde se pueda observar el funcionamiento del mismo, e incentivar las investigaciones futuras para disminuir los costos de producción y operación de estos equipos los cuales son en su gran mayoría importados.

Para la modelación, simulación y propuesta de diseño de este equipo de ósmosis inversa se utiliza como base un modelo matemático que permite simular de forma dinámica un sistema de osmosis inversa. A partir del planteamiento anterior, se genera la siguiente pregunta, ¿Cuál sería una opción de diseño para un equipo de osmosis inversa que aumente la eficiencia y eficacia en un proceso de tratamiento de agua?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Determinar las condiciones básicas de diseño de un equipo de ósmosis inversa que permita su implementación como práctica de laboratorio en el curso de Operaciones con transferencia de masa.

1.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones de entrada requeridas para la implementación de la operación de un equipo de osmosis inversa.
- Determinar los requerimientos básicos de operación de las membranas que se pueden utilizar en un equipo de osmosis inversa.

2. Marco teórico

En la actualidad, a pesar de las medidas de control y gestión que cada día se llevan a cabo, además de la concienciación ambiental que se va adquiriendo con el paso de las generaciones, hoy día más del 50 % de los residuos generados en todo el mundo acaban en un vertedero para su eliminación definitiva.

Esta situación conlleva a un grave problema tanto a nivel ambiental como de salud humana, ya que en estos vertederos se generan productos no deseados debido a la degradación de los residuos depositados, como son “los gases de vertedero y los lixiviados como contaminantes principales, entre otros, los cuales son vectores de enfermedades o malos olores”. (Hidalgo, 2016)

La contaminación por residuos sólidos también es importante ya que se forman líquidos percolados o escurridos en los depósitos de almacenamiento (incluidos los rellenos sanitarios). Estos líquidos reciben el nombre genérico de lixiviados y su importancia, en cuanto a contaminación, viene dada por su fuerte carga orgánica, la cual es fruto de su paso, con arrastre disolución, a través de los residuos almacenados. “Se entiende por lixiviados: cualquier líquido que percole a través de los residuos depositados y que sea emitido o este contenido en un vertedero” (Directiva Europea, 1999)

Para impedir la contaminación de suelos y acuíferos, por infiltración en el terreno de los lixiviados, se hace preciso construir el depósito de almacenamiento sobre suelos impermeables. De este modo, el líquido de lixiviación se acumula en el fondo del depósito, de donde es recogido para proceder a su tratamiento y depuración.

El lixiviado generado en un relleno sanitario es producto de múltiples factores, tales como: composición de la basura, edad del relleno, balance de agua, diseño y operación del relleno sanitario, solubilidad de los desechos, procesos de conversión microbiológica y química y la interacción del lixiviado con el ambiente. “El caudal generado varía de acuerdo con el estado de avance y el tipo de operación del relleno, y la composición también varía en el tiempo”. (PINEDA, 1998)

La mejor gestión de residuos conducirá a la no producción de lixiviados, si bien esto es técnicamente imposible, en la mayoría de las ocasiones, se espera la minimización de su producción mediante el control de los residuos dentro del propio depósito. Dentro de los lixiviados existe un caso particular de gran trascendencia, por su extensión, el control de los lixiviados de depósitos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

Los lixiviados de RSU son líquidos muy contaminados, formados como consecuencia de la penetración del agua a través de la masa de residuos y por su propia descomposición. Conllevan, por tanto, una gran complejidad, ya que presentan fuerte carga orgánica, altos contenidos de nitrógeno y presencia de metales pesados. (Mohammad & al-mefleh)

Los lixiviados al tener una carga contaminante alta son sometidos a dos tipos de tratamientos: el primero se basa en la recirculación de los lixiviados al relleno sanitario, en el cual se ha evidenciado disminución de su volumen por efectos de temperatura, pero contribuyen a la generación gases de efecto invernadero. Además, afectan la estructura de los rellenos por sobrecarga de lixiviados. La otra manera ha sido el tratamiento de lixiviados a través de sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, los cuales en muchos casos no pueden llegar a ser eficientes debido a la compleja composición presentada por los lixiviados siendo la osmosis inversa una operación unitaria complementario de las aguas residuales.

El Banco Mundial afirma que, para mejorar las condiciones de salud y saneamiento en países en desarrollo de América Latina, es necesario trabajar en conjunto entre instituciones públicas, privadas y centros educativos que promuevan la formación de profesionales competentes. “Con el fin de garantizar que los sistemas de tratamiento proyectados sean eficientes en el manejo de recursos” (Reynolds, 2002)

El agua representa el elemento más importante para la supervivencia de los seres humanos; “debido a que se considera como un factor clave para el desarrollo de las actividades cotidianas, domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas” (Lopez, 2015). En 2015, la Organización de las Naciones Unidas (O.N.U.) hizo énfasis en el constante crecimiento de la población mundial. La urbanización, la industrialización, la sobreproducción y el consumismo; “son factores que han generado un crecimiento en la demanda y aprovechamiento de los recursos naturales en las últimas décadas”. (CARIDE, 2008)

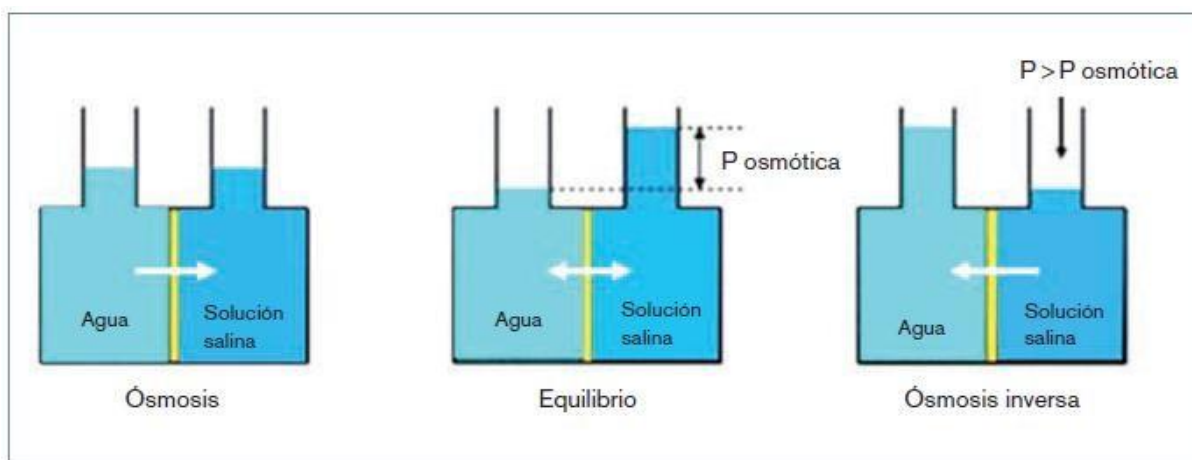
Menos del 5% de las aguas de alcantarillado de las ciudades, reciben algún tipo de tratamiento (Reynolds, 2002), lo que indica, que el volumen de agua residual supera la capacidad de resiliencia de los ecosistemas. De allí, nace la importancia de los sistemas de tratamiento, los cuales ayudan a controlar y minimizar los impactos al medio y a la salud de las personas.

Las tecnologías basadas en el uso de membranas tales como la ósmosis inversa y la nanofiltración ha mostrados ser una alternativa prometedora para la purificación de los efluentes líquidos. En comparación, la nanofiltración es menos efectiva que la ósmosis inversa, ya que en esta última se puede tener una remoción casi completa de contaminantes (al & Gil, 2012)

2.1. Descripción de la Ósmosis Inversa

La osmosis es un proceso físico natural que consiste en el paso de un fluido, agua en este caso, a través de una membrana semipermeable, es decir, deja pasar moléculas de pequeño tamaño y no solutos de mayor tamaño. Es un proceso espontaneo y reversible que se produce a temperatura ambiente. La membrana selectiva permite el paso del solvente en un porcentaje mucho más elevado que los sólidos disueltos. Cuando dos fluidos están separados por una membrana semipermeable, el fluido que contiene menor concentración se mueve a través de la membrana hacia el fluido que contiene mayor concentración. Este movimiento del solvente (agua) a través de la membrana, para buscar el equilibrio, es conocido como osmosis. Pasado un tiempo el nivel de agua es mayor en uno de los lados de la membrana. A esta diferencia de altura se le denomina presión osmótica.

Figura 1 Secuencia de imágenes que explican el proceso de ósmosis inversa



Nota Fuente (García, 2007).

Si se aplica en la columna del fluido más concentrado una presión superior a la osmótica, se obtiene el efecto inverso, es decir, el fluido es presionado de vuelta a través de la membrana, pero los sólidos disueltos permanecen en la columna. “Este fenómeno se aprecia en la Figura 1, y es el principio en el que se basa la osmosis inversa” (López, Forné, & Martínez, 2012).

Una de las principales aplicaciones de la osmosis inversa es la desalación de aguas. La presión osmótica que es necesario aplicar depende de la concentración en sales de la solución. Para la mayoría de los casos de aguas depuradas, en los que la concentración en sales se encuentra entre 1.000 y 10.000 mg/l y la presión se encuentra entre 1 y 15 bares. “En la osmosis inversa el agua se bombea a alta presión hacia la membrana” (López, Forné, & Martínez, 2012).

Este proceso da lugar a una corriente de solvente que se difunde a través de la membrana denominado permeado. Por otro lado, “existe otra corriente concentrada en sales que contiene el soluto y solvente que no ha atravesado dicha membrana y que se denomina salmuera o rechazo” (López, Forné, & Martínez, 2012).

Las membranas de osmosis inversa se componen de una fina capa de material polimérico depositada sobre un soporte. Se ha de considerar la permeabilidad de la membrana al agua y a los iones, teniendo en cuenta que el transporte de agua debe ser muy superior al de los iones. La estabilidad a cambios de pH y temperatura, además de la capacidad de soportar elevadas presiones, son parámetros muy importantes a la hora de escoger una membrana. Existen diferentes tipos de configuraciones para este proceso; los más habituales son los módulos en espiral y los módulos de fibra hueca. Los módulos en espiral poseen una elevada superficie por unidad de volumen. En ocasiones, “es importante llevar a cabo un tratamiento previo para adecuar la solución influente” (López, Forné, & Martínez, 2012).

El tratamiento de aguas residuales es el conjunto de operaciones unitarias (físicas, químicas y biológicas), que permiten la eliminación o disminución de los agentes contaminantes presentes en las mismas. Se ha clasificado el tratamiento de diversas formas; sin embargo, la gran mayoría de autores explican que se pueden clasificar en tres grandes grupos: Tratamiento preliminar, tratamiento secundario, tratamiento terciario.

A continuación, se describe el tratamiento preliminar y todas las operaciones unitarias relevantes en el mismo.

2.1.1. Tratamiento preliminar

El objetivo del tratamiento preliminar es conseguir mediante operaciones físicas y mecánicas separar del agua residual de la mayor cantidad de materias. Que, “debido a su naturaleza y/o tamaño generarían problemas en los tratamientos posteriores” (Metcalf & Eddy, 1995).

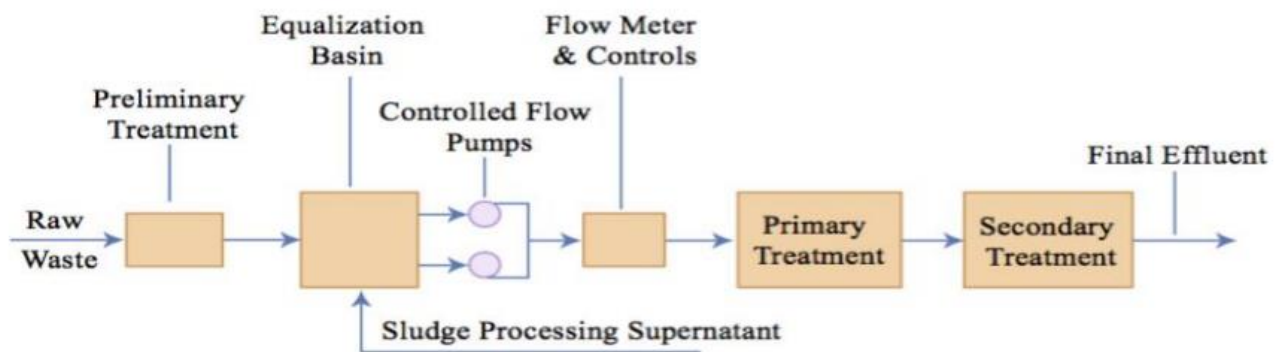
La fase del tratamiento preliminar debe cumplir con dos funciones:

- Medir y regular el caudal de agua que ingresa al sistema de tratamiento
- Extraer los sólidos flotantes grandes y la arena (a veces, también grasa)

Dentro de los sólidos suspendidos pueden distinguir los siguientes:

- Sólidos sedimentables
- Sólidos flotantes
- Sólidos coloidales

Figura 2 Diagrama de flujo operaciones unitarias de una planta de tratamiento de agua



Nota Tomado de (Reynolds & Richards, 1996)

2.1.1.1. Desbaste

El desbaste se utiliza para lograr la reducción de las materias sólidas no disueltas (bolsas, ramas, botellas, basura etc.) mediante la implementación de cribas o rejillas. “Las cuales están diseñadas en función al tamaño de sólidos a remover” (Ramalho, 2003). Su funcionamiento es simple y económico, y el mantenimiento dependerá de la naturaleza del agua residual. De esta manera, se clasifica el desbaste en:

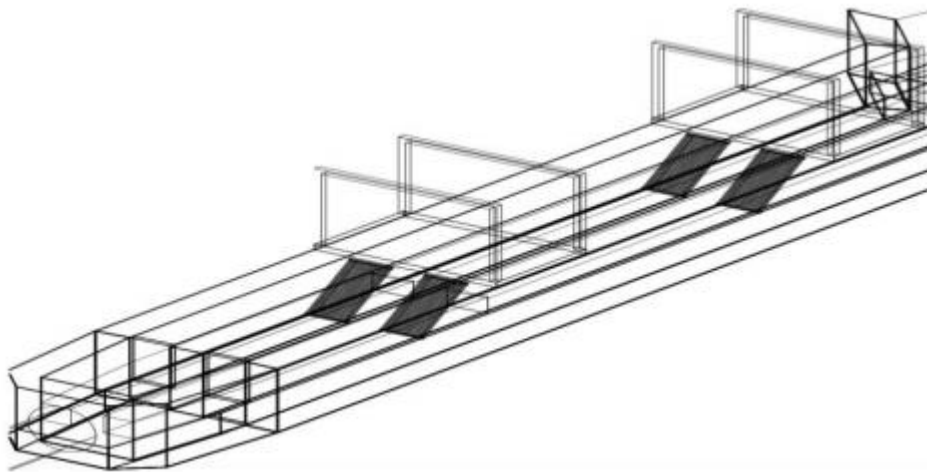
- Desbaste para sólidos finos. -Espaciamiento libre entre 5 y 15 mm

- Desbaste para sólidos medianos. -Espaciamiento libre entre 15 y 25 mm
- Desbaste para sólidos gruesos. -Espaciamiento libre entre 25 y 50 mm

En cuanto a las rejillas, se establece que deben de tener espesores mínimos según sea:

- Reja para sólidos finos: entre 2 y 6 mm
- Reja para sólidos medianos: entre 6 y 12 mm
- Reja para sólidos gruesos: entre 12 y 25 mm

Figura 3 *Rejillas para materiales sólidos gruesos y sólidos finos*

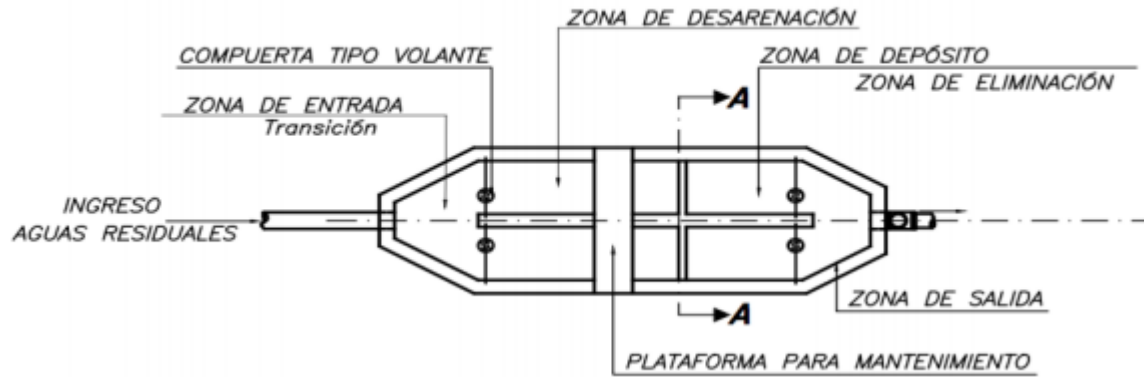


Nota Fuente (Ron & Crites, 2000)

2.1.1.2.Desarenador

Los desarenadores son obras hidráulicas que sirven para reducir la velocidad del agua residual y “permitir la separación o decantación de partículas de arena” (Ortiz Flórez, 2011), “el material solido que se transporta ocasiona perjuicios a las obras” (Sparrow Álamo, 2008), una gran parte del material solido va depositándose en el fondo de los canales disminuyendo su sección. Esto aumenta el costo anual de mantenimiento y produce molestas interrupciones en el servicio de canal. Si los canales sirven a plantas hidroeléctricas, la arena arrastrada por el agua pasa a las turbinas desgastándolas tanto más rápidamente cuanto mayor es la velocidad. Esto significa una disminución del rendimiento y a veces exige reposiciones frecuentes y costosas.

Figura 4 Esquema de las partes de un tanque desarenador



Nota Fuente (Ortiz Flórez, 2011)

2.1.1.3.Sedimentación

La sedimentación es la operación unitaria que consiste en separar, por acción de la gravedad, un sólido finamente dividido de un líquido en el que está suspendido, obteniendo un líquido clarificado y un lodo más o menos espeso con elevado porcentaje de sólidos. Cabe recordar que los sólidos finamente divididos se encuentran habitualmente en disolución formando flóculos. “Esta operación unitaria puede llevarse a cabo de forma continua o intermitente. Los sedimentadores industriales operan normalmente en régimen continuo”. (Martin, Salsedo, & Font, 2011)

2.1.1.4.Tanque Imhoff

Este tipo de tratamiento es ideal cuando no se tiene una gran área para establecer una estación depuradora, además son muy prácticos en comunidades donde la población es de hasta 5000 habitantes. Su diseño es simple y no requiere de partes mecánicas, “solo de tres cámaras para la sedimentación, digestión de lodos y para la ventilación de los gases producidos” (Hernandez & Galán, 2004). Las aguas residuales pasan por medio de la cámara de sedimentación en donde se remueven sólidos sedimentables, “los mismos que resbalan por las paredes inclinadas hasta el fondo de la cámara y luego hacia la cámara de digestión” (Organización Panamericana de la Salud, 2005).” En cuanto a su porcentaje de remoción es del 40% a 50% y del 25% al 35% entiéndase en sólidos suspendidos y DBO respectivamente” (Hernandez & Galán, 2004).

2.1.2. Tratamientos secundarios

Son tratamientos biológicos de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual, transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente, estos son:

2.1.2.1. Fangos activados

Es un proceso biológico empleado en el tratamiento de aguas residuales convencionales, que consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de Flóculo en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua residual, que es capaz de metabolizar como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua. La agitación evita sedimentos y homogeneiza la mezcla de los flóculos bacterianos con el agua residual. La aireación requerida tiene por objeto suministrar el oxígeno necesario tanto para las bacterias como para el resto de los microorganismos aerobios. “El oxígeno puede provenir del aire, de un gas enriquecido en oxígeno o de oxígeno puro”. (Romero Rojas, 2002)

2.1.2.2. Lechos filtrantes (Lechos de oxidación)

Los lechos filtrantes son utilizados donde el licor de las aguas residuales es rociado en la superficie de lecho profundo compuesto de coque (carbón, piedra caliza o fabricada especialmente de medios plásticos). El licor es distribuido mediante unos brazos perforados rotativos que irradian de un pivote central. El licor distribuido gotea en el lecho y es recogido en drenajes en la base. Estos drenajes también proporcionan un recurso de aire que se infiltra hacia arriba del lecho, manteniendo un medio aerobio. “Las películas biológicas de bacterias, protozoarios y hongos se forman en la superficie del medio y se comen o reducen los contenidos orgánicos. Esta biopelícula es alimentada a menudo por insectos y gusanos”. (Romero Rojas, 2002)

2.1.2.3. Sedimentación secundaria

El paso final de la etapa secundaria del tratamiento es retirar los flóculos biológicos del material de filtro, y producir agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida. “En una planta de tratamiento rural, se realiza en el tanque de sedimentación secundaria”. (Romero Rojas, 2002)

2.1.3. *Tratamientos terciarios*

El tratamiento terciario tiene como finalidad higienizar y adecuar el agua ya sea para consumo humano o bien para alguna aplicación industrial que requiera un mayor grado de pureza, este tipo de tratamiento puede ser realizado tanto por medios físicos y/o químicos, es decir, algunos tratamientos terciarios pueden ser considerados tratamientos primarios. En los físicos encontramos en esta etapa los realizados por membranas a través de procesos de filtración, entre los principales están la ultrafiltración, microfiltración, nanofiltración y la ósmosis inversa, algunos de estos son mencionados en los tratamientos primarios. En el caso de los tratamientos químicos terciarios es de gran importancia al momento de escoger alguno tener conocimientos en cinética de reacciones ya que la determinación del orden de una reacción es fundamental en estos procesos. “Entre los procesos químicos más utilizados en el tratamiento de aguas residuales se encuentran: La precipitación química, transferencia de gases, adsorción, desinfección y combustión”. (Valdez & Vazquez, 2003) Algunos de estos procesos se explican a continuación:

- Ósmosis Inversa: Es una tecnología de membranas, en la cual el solvente es transferido a través de una membrana densa, diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular.
- Adsorción con carbon: A algunos contaminantes persistentes a ser removidos se les denomina comúnmente orgánicos refractarios, los cuales pueden ser detectados en el efluente como DQO soluble. Para la remoción de estos orgánicos refractarios, el método más práctico disponible es adsorberlos usando carbono activado. La adsorción es la acumulación de materiales en una interfase. Tratándose de aguas residuales y carbono activado, la interfase es la frontera líquida/sólido. Los materiales orgánicos se acumulan en la interfase debido a las ligaduras físicas de las moléculas a la superficie sólida.

Si el efluente obtenido hasta este punto no cumple con las normativas ambientales para descarga, debe aplicar tratamiento terciario, hasta lograr eliminar los compuestos orgánicos e inorgánicos que afectan la calidad del agua. El tratamiento terciario o avanzado puede tener diversos fines depende el proceso que se requiera.

Se puede perseguir los siguientes fines:

- Disminución de microorganismos fecales y gérmenes patógenos
- Disminución de la demanda de oxígeno, mediante el proceso de nitrificación se elimina la materia orgánica nitrogenada.

- Precipitación de fosforo mediante por insolubilización.
- Eliminación de materia orgánica refractaria aplicando proceso de adsorción con carbón activo (Tejero, 1992)

Tratamientos terciarios que se pueden aplicar:

- Desinfección del efluente generalmente con cloro
- Nitrificación y des nitrificación
- Coagulación, floculación sedimentación y filtración
- Adsorción
- Procesos de membrana

2.2.Sustancias en aguas residuales y lixiviadas

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos.

Dentro de este concepto se incluyen aguas con diversos orígenes: (LÓPEZ, GARCÍA, & PÉREZ, 1985)

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.
- Aguas blancas: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden de evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.
- Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las

diferentes actividades industriales.

- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo.

La gran variedad y cantidad de productos que se vierten obliga a una investigación propia para cada tipo de industria. No existe similitud alguna entre los vertidos de actividades industriales, como son: alimentación, química, petroquímica, agrícola, forestal, minerales y metalúrgicas, etcétera.

De todas formas, si el contenido es muy alto en materia orgánica o sólidos en suspensión, pueden estimarse la elección de índices con el mismo criterio que el analizado para la definición de las aguas residuales de origen doméstico. Pero será necesario analizar las sustancias específicas vertidas, que pudieran dificultar el tratamiento biológico o afectar a los materiales constitutivos de la red de alcantarillado u obras de fábrica en contacto con las aguas. La industria considerada, antes de verter debería efectuar la corrección de los parámetros perturbadores.

Son numerosísimos los índices orgánicos e inorgánicos procedentes de la actividad industrial, decenas de miles, pero de forma resumida, deberán contemplarse índices que definan el contenido en:

- Ácidos que pueden atacar el material o inhibir los procesos.
- Básicos que pueden inhibir los procesos biológicos.
- Productos petrolíferos y grasas poco degradables.
- Detergentes que retardan la sedimentación, forman espumas e impiden la aireación.
- Metales pesados: Cu, Cr, As, Cd, Pb, Hg, B, etcétera, tóxicos para los microorganismos que intervienen en los procesos biológicos.
- Fenoles, cianuros, inhibidores y tóxicos.
- Productos radioactivos.

Es conveniente resaltar aquí la importancia que la toma de las muestras puede influenciar en el resultado de la muestra analizada en un laboratorio. “La toma de muestra deberá tener en

cuenta la variación en el tiempo del caudal y carga contaminante en el valor absoluto” (Hernandez Lehmann & Galan Martinez, 2004)

Las industrias se pueden clasificar en cinco grupos de acuerdo con los contaminantes específicos que arrastran las aguas residuales (Hernandez J. , 2016)

2.3. Industrias con efluentes principalmente orgánicos:

- Papeleras.
- Azucareras.
- Mataderos.
- Curtidos.
- Conservas (vegetales, carnes, pescado, etcétera).
- Lecherías y subproductos (leche en polvo, mantequilla, queso, etcétera).
- Fermentación (fabricación de alcoholes, levaduras, etcétera).
- Preparación de productos alimenticios (aceites y otros).
- Bebidas.
- Lavanderías.

Industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos:

- Refinerías y Petroquímicas.
- Coquerías.
- Textiles.
- Fabricación de productos químicos, varios.

Industrias con efluentes principalmente inorgánicos:

- Limpieza y recubrimiento de metales.
- Explotaciones mineras y salinas.
- Fabricación de productos químicos, inorgánicos.

Industrias con efluentes con materias en suspensión:

- Lavaderos de mineral y carbón.
- Corte y pulido de mármol y otros minerales.
- Laminación en caliente y colada continua. Industrias con efluentes de refrigeración.
- Centrales térmicas
- Centrales nucleares.

En los siguientes apartados se considerarán distintos tipos de industrias, indicando los contaminantes más importantes de sus vertidos, así como una breve consideración de cuál o cuáles son los tipos de tratamiento más típicos, útiles y económicos para tratar sus vertidos.

Industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos (Sans & Ribas, 1989)

2.3.1. Industrias textiles

Los vertidos de las fábricas textiles dependen del tipo de proceso a los que se sometan los distintos materiales empleados en la empresa textil. En este tipo de empresas es importante resaltar la importancia en la disminución de la contaminación de los vertidos, si se realiza un control más estricto de los procesos, si se sustituyen algunos compuestos químicos utilizados y si se recuperan algunos de éstos. La recuperación del hidróxido sódico es fundamental para poder tratar las aguas residuales por sistemas biológicos, así como la utilización de detergentes de baja demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Los principales métodos para el tratamiento de aguas residuales de empresas textiles, son la coagulación – sedimentación y el tratamiento biológico. Como coagulantes se utilizan, generalmente, sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato o cloruro férricos. Junto con estos coagulantes se puede utilizar un coadyuvante de coagulación para mejorar ésta. Cada coagulante, cuando se utiliza con un residuo específico, tiene su punto isoeléctrico óptimo (pH de máxima coagulación), que se ha de determinar experimentalmente en función del agua residual que se tenga. En la reutilización de las aguas de tintura, así como la recuperación de productos químicos utilizados, se pueden emplear procesos de ósmosis inversa, microfiltración e intercambio iónico. Según las características de las aguas, los procesos mencionados pueden ser posteriores a tratamientos físico – químicos o biológicos (Sans & Ribas, 1989).

2.3.2. Industrias de curtidos

Las operaciones que se realizan en una industria de curtido, y que dan lugar a los vertidos, se pueden dividir en tres grandes bloques: operaciones de adobado, operaciones de curtido y operaciones húmedas. El adobado se realiza los siguientes procesos:

- Curado.
- Descarnado.
- Lavado y remojo.
- Eliminación del pelo.
- Tratamiento con cal (optativo).

Las operaciones de curado y desencarnado no presentan por sí mismas ningún tipo de vertido (excepto en la limpieza de las máquinas).

El lavado y remojo tiene como finalidad eliminar la suciedad, las sales de curado. La sangre, los desperdicios, las proteínas no fibrosas y devolver la humedad perdida durante del curado. La eliminación del pelo se realiza con hidróxido cálcico, con o sin sulfuro sódico.

En el curtido, se realizan las siguientes operaciones.

- Macerado.
- Piclaje.
- Desengrase (sólo para pieles de ovino y cerdo).
- Curtido.

El macerado se realiza generalmente con una mezcla de enzimas preparadas comercialmente y con sales de amonio. El piclaje se realiza con cloruro sódico y ácido, para evitar la precipitación de las sales de cromo en la piel cuando se realice el curtido con cromo.

El desengrase tiene como misión la eliminación de la grasa natural, impidiendo de esta forma la formación de jabones metálicos.

El curtido al cromo se utiliza para pieles ligeras, produciendo pieles resistentes. El curtido con vegetales (tanino), produce pieles más llenas, más hinchadas y que son más fáciles de someter a tratamiento o embutición. Generalmente, después del curtido, se realiza una decoloración con

carbonato sódico y ácido sulfúrico, para proporcionar a la piel un color más claro y más uniforme antes de la tintura.

El problema que puede presentar la depuración de vertidos en una empresa de curtidos es de la existencia de descargas intermitentes, con concentraciones de contaminación diferentes de unos procesos a otros. Se hace necesaria, pues, la homogeneización de caudales para minimizar estas fluctuaciones. Un vertido igualado, incluyendo las aguas de lavado, tiene un gran contenido de sólidos, entre 6,000 y 7,000 ppm, de los cuales alrededor de la mitad son de cloruro sódico. Contiene 900 ppm de DBO, 1,600 ppm de dureza total, 1,000 ppm de proteínas, 120 ppm de sulfato y entre 3 y 70 ppm de cromo. Es necesaria también, además de la igualación una sedimentación por el gran volumen de fangos presentes en los vertidos. Una mejor depuración de estos vertidos involucra la necesidad de procesos de coagulación química y de digestión de fangos.

Además, es recomendable la igualación y sedimentación, por lo menos durante 8 h, seguida de filtros bacterianos y decantación. Según diversos estudios, “otro sistema que permite la obtención de efluentes claros, sin olores y estables, y que se pueden verter directamente en los cursos de agua, es el tratamiento con fangos activados”. (Sans & Ribas, 1989)

2.3.3. Industrias químicas

Las industrias químicas son aquellas en las que se fabrican materias primas a utilizar con posterioridad en otro tipo de empresa. En sus procesos estas pueden producir vertidos, que al ser evacuados en ríos, lagos o alcantarillado, implican cambios importantes en las aguas, problemas especiales en las plantas de tratamiento de aguas urbanas o en efluentes de aguas residuales.

Los tipos de aguas residuales de este tipo de industrias son:

- Fuertemente ácidas.
- Fuertemente básicas.
- Fuertemente coloreadas.
- Presencia de sustancias tóxicas.
- Inflamabilidad.

Aguas residuales fuertemente ácidas o básicas, las podemos encontrar en muchos procesos industriales y especialmente en fábricas de productos químicos, como ácidos, bases, tintes,

explosivos, insecticidas, fungicidas, productos farmacéuticos resinas de silicona, materiales de construcción, etcétera. Los más importantes son los vertidos que contiene ácido clorhídrico, sulfúrico y nítrico diluidos. Todas estas aguas residuales necesitan una neutralización antes de su vertido al sistema de alcantarillados o a los cursos de aguas, puesto que estos se alteran de forma perjudicial por valores extremos de pH.

El tratamiento general de cada industria es en función del caudal de aguas residuales y de su pH, así como por la existencia de un posterior tratamiento o no. Esta se hace en función del método más económico a utilizar, teniendo en cuenta el pH que la legislación permite para los vertidos en los alcantarillados o lechos de agua. Se pueden poner algunos ejemplos para mejorar costos de depuración: Una empresa produce unas aguas residuales ácidas y posteriormente realiza un tratamiento biológico. El pH óptimo para tratamientos biológicos se encuentra alrededor de la neutralidad, no obstante, el rendimiento más interesante es a pH más bajos, la neutralización se puede realizar con una lechada de cal, con el suficiente tiempo para alcanzar el pH previsto para el tratamiento biológico; el ahorro que se obtiene, en lugar de utilizar productos químicos para la neutralización, puede ser superior al menor rendimiento de la depuración biológica.

Si una empresa produce aguas residuales ácidas en un proceso y básicas en otro, indudablemente, deberá realizar una igualación de éstas, pudiendo obviar (dependiendo de la acidez o basicidad final) la neutralización. También puede resultar económicamente rentable igualar las aguas residuales ácidas de una empresa con las aguas residuales básicas de otra empresa que esté relativamente cerca. Empresas con aguas residuales alcalinas, pero con poco volumen de éstas, pueden retener los vertidos durante un cierto tiempo para que el contacto con el anhídrido carbónico del aire sea suficiente para bajar el pH hasta los límites permitidos por la legislación. (Sans & Ribas, 1989)

2.3.4. Industrias productoras de explosivos

Este tipo de empresas producen aguas residuales fuerte ácidas y básicas, así como fuertemente coloreadas. Dependiendo de qué tipo de explosivos fabriquen, también están fuertemente contaminadas con sulfatos, nitrógeno y metales.

Podemos considerar tres tipos de producción. (Sans & Ribas, 1989)

2.3.4.1.Fabricación de pólvora sin humo

En la fabricación de pólvora sin humo las aguas residuales son, principalmente, las que proceden de la nitración y purificación del producto, son fuertemente ácidas, coloreadas y contienen una elevada concentración de sulfato y nitrógeno (éste en forma de nitrito y nitratos). La neutralización seguida de una coagulación y sedimentación son métodos efectivos para depurar estas aguas residuales. El proceso de desnitrificación biológica por fases dependientes es el más adecuado para la eliminación del nitrógeno.

2.3.4.2. Fabricación T.N.T.

En la fabricación de T.N.T. las aguas residuales son, principalmente, las que proceden del lavado después de la nitración, y del lavado de purificación del sulfito. Las primeras son fuertemente ácidas, de color amarillo, con elevada concentración de sulfatos y nitrógenos (éste en forma de amoníaco, nitritos y nitratos). Las segundas son alcalinas, intensamente coloreadas y también con alto contenido en sulfatos y nitrógeno, las aguas residuales de la fabricación de T.N.T. también contienen cantidades variables de dicho producto. La depuración de estas aguas implica una igualación – neutralización, seguida de una filtración con carbón o bien una mezcla de estas aguas con carbón activo y posterior filtración para eliminar el T.N.T., así como parte del color. La eliminación del color con carbón activo es costosa económicamente y, por otra parte, es muy resistente al ataque biológico y químico siendo aconsejable para la eliminación del color y el nitrógeno el tratamiento con cloro al breakpoint. La desnitrificación se puede realizar biológicamente en fases independientes. Tratamientos de ósmosis inversa y microfiltración, nos permitirán la reutilización de las aguas residuales, así como la recuperación del producto (T.N.T., etcétera).

2.3.4.3.Fabricación de municiones

En la fabricación de municiones para armas pequeñas, las aguas residuales más importantes provienen de la fabricación de cartuchos y manguitos, de los procesos de extrusión, decapado, lavado y lubricado. Son aguas turbias, con coloración, ácidas y contienen cantidades importantes de cobre y zinc, así como detergentes y aceites. La depuración de estas aguas implica una eliminación de las grasas por flotación y una precipitación química posterior. Se ha comprobado que una depuración como la mencionada produce una eliminación del 85 % de la DBO, un 95 % de los sólidos en suspensión, eleva el pH hasta la neutralidad y reduce el color en un 90 %.

2.3.5. *Fabricación de pesticidas*

Los compuestos orgánicos, tales como los pesticidas y otros productos químicos utilizados en agricultura, son tóxicos para gran número de formas de vida, en consecuencia, pueden llegar a ser peligrosos contaminantes de las aguas superficiales. La mayoría de los insecticidas pueden ser mortales a pequeñas concentraciones; en consecuencia, podemos encontrar, como resultado de un vertido de estas características, la muerte de peces, contaminación del pescado y el empeoramiento de las aguas de suministro.

En general, la mejor forma de depuración de los pesticidas es hacer pasar el efluente por unos lechos filtrantes de carbón activo, aunque es un procedimiento caro. Otra forma de depuración consiste en una cloración previa de los vertidos, retención en lagunas, neutralización y tratamiento con fangos activados.

2.3.6. *Industrias del fósforo*

Las industrias del fósforo pueden dividirse en relación a sus aguas residuales, en dos tipos: las que, a partir de la extracción de fosfato mineral, mediante procesos de lavado, cribado, flotación y secado, producen fosfatos, y el ácido fosfórico obtenido mediante el procedimiento húmedo. El fosfato puede venderse directamente como abono o para producir fósforo elemental o ácido fosfórico térmico.

El otro tipo de industria es aquel que, a partir de los fosfatos anteriormente mencionados, se dedica a la producción de fósforo elemental o ácido fosfórico térmico. En el primer tipo de industrias cabe distinguir entre los vertidos de extracción y refinado de los fosfatos, que producen aguas residuales en gran cantidad, conteniendo arcillas, fangos coloidales y aceites, y los vertidos de la obtención de ácido fosfórico por vía húmeda, que son fuertemente ácidos, gran contenido de flúor, pentóxido de fósforo, sólidos en suspensión y algún tipo de sustancias reductoras.

En la fabricación de fósforo elemental o ácido fosfórico, por vía térmica, los vertidos más importantes proceden de la salida de agua del condensador y son aguas residuales ácidas, contienen fósforo elemental, sólidos en suspensión, sílice y pentóxido de fósforo.

El fósforo, así como el nitrógeno, es un nutriente importante para las algas y otros organismos biológicos. Por esta causa y debido a los nocivos crecimientos incontrolados de algas en las aguas

superficiales, se debe controlar el contenido de fósforo que se vierte a los lechos, a través de aguas residuales industriales o domésticas.

El fósforo se encuentra en disolución acuosa como ortofosfatos, polifosfato o fósforo orgánico. El fósforo elemental, procede de los vertidos de su obtención, puede inflamarse si se deja secar el vertido en zanjas.

La depuración de estas aguas residuales tendrá como principal objetivo la eliminación del fósforo, por lo que será necesaria una neutralización y posterior precipitación química.

2.3.7. Plantas de beneficio o mataderos

De forma general, consideramos aguas residuales de mataderos aquellas que provienen de los mataderos propiamente dichos y de empresas de procesamiento de cárnicos o derivados. Los vertidos de los mataderos se producen en el suelo, donde se realiza el sacrificio de los animales, el lavado y el descuartizamiento. Los desperdicios que se producen tienen un color pardo – rojizo, una alta DBO y contienen cantidades importantes de sólidos en suspensión.

Una condición importante para cumplir en un matadero es que se recoja la sangre en todos los sacrificios de ganado ovino, vacuno y porcino la sangre es recogida y también en la mayoría de los mataderos de aves. El sacrificio, así como el proceso de elaboración de carnes de aves, difiere sustancialmente del otro tipo de animales. En un matadero de porcino, bovino y lanar, los vertidos se realizan de forma discontinua, siendo el más importante la limpieza del suelo de la zona de sacrificio.

Debe tenerse en cuenta que aun cuando haya recogida de sangre, parte de ésta es antieconómica de recoger y, como su contenido en nitrógeno es importante, se descompone con mucha facilidad. Es necesario un tanque homogeneizador, después del tamizado, y previo a cualquier tratamiento. La decantación en el proceso de homogeneizado produce un rendimiento entre el 50 y 60 % en la eliminación de DQO, DBO, nitrógeno y hierro, así como un rendimiento del 30 a 40 % de la turbidez, siendo muy poca la eliminación del fósforo.

Debe tenerse en cuenta la decantación inicial, antes de cualquier tratamiento. De forma general, después de la decantación previa, se utiliza un tratamiento biológico, que puede ser de fangos activados o procesos anaerobios de contacto, con resultados positivos.

2.3.8. Industrias de preparación y conservación de carnes.

En las industrias de preparación y conservas de carnes, si se realiza el sacrificio de animales, en las zonas donde se realice, las aguas residuales serán aproximadamente de la misma composición que la de los mataderos. En el caso que reciban a los animales muertos, las operaciones son:

- Preparación de partes comestibles.
- Preparación de pares no comestibles.
- Deshuesado y cortado.
- Embutidos.

Las aguas residuales de estas operaciones son, básicamente, las procedentes del lavado de las zonas de trabajo, tendrán alto contenido de sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo orgánico, procedentes de los restos de sangre de los animales. El tratamiento para realizar es básicamente, el mismo que en el caso de los mataderos.

Si en el proceso se realiza la limpieza de la panza y los intestinos de los animales, esta operación aumenta enormemente la cantidad de sólidos en suspensión, así como la DBO y DQO de las aguas residuales. “Un proceso que produce una contaminación importante, con grandes concentraciones de materia orgánica, especialmente compuestos nitrogenados es el de fusión de grasas comestibles, así como el de grasas y desperdicios no comestibles” (Sans & Ribas, 1989).

2.3.9. Industrias lácteas

Las industrias lácteas se pueden dividir en:

- Obtención de leche fresca, pasteurizada y descremada.
- Fabricación de quesos.
- Fabricación de mantequillas.
- Fabricación de leche condensada.
- Fabricación de leche en polvo.

Las aguas residuales de este tipo de industrias proceden, en su mayoría del lavado de los tanques de recepción de leche, lavado de conducciones, sistemas de evaporación y lavados en los

procesos de la mantequilla, queso y otros productos. Las aguas residuales de la fabricación de queso son las que más difieren de los otros procesos; son aguas ácidas, a causa de la presencia de suero y del alto contenido de sólidos en suspensión (cuajo), debido al lavado del queso. Las otras industrias presentan unos vertidos neutros y ligeramente alcalinos, con tendencias a convertirse en ácido a causa de la fermentación del azúcar, en su transformación en ácido láctico. Todas las aguas residuales tienen un alto contenido en materia orgánica disuelta, en consecuencia, tienden a fermentar si se retienen. Como los vertidos tienen una amplia variación de caudal y concentración de compuestos contaminantes, es aconsejable una igualación y homogenización de caudales de estas aguas, antes de cualquier tratamiento, por otra parte, una aireación en la igualación puede producir una reducción importante de la contaminación, así como la eliminación de olores procedentes de la transformación de la lactosa en ácidos lácteos.

“Estas aguas responden bien a los tratamientos biológicos, tales como procesos aerobios de fangos activados, filtros bacterianos, digestión anaerobia y lagunaje” (Sans & Ribas, 1989).

2.3.10. Industrias papeleras

La industria del papel se divide en dos grandes secciones: la producción de pasta de papel y la producción de papel a partir de dicha pasta. En este tipo de industria todo el proceso se realiza de una forma mayoritaria en la misma fábrica. Las aguas residuales de la fabricación de pasta de papel proceden principalmente de los siguientes procesos:

- Preparación de la madera.
- Reducción a pulpa, bien mediante métodos mecánicos o químicos.
- Cribado.
- Lavado de la pasta.
- Espesado.
- Blanqueo.

La preparación de la madera implica el astillado y la eliminación del polvo por métodos mecánicos, en consecuencia, las únicas aguas residuales que produce son las de purga del transporte de los troncos, con pocos sólidos en suspensión (un promedio de aproximadamente 320 ppm),

pocos sólidos en disolución y bajo DBO. Representa el 8.5 % de las aguas residuales totales. La reducción a pulpa, por métodos mecánicos, no produce vertidos importantes.

La producción de pasta química se realiza por tres métodos importantes: proceso de la sosa, proceso del sulfato y proceso del sulfito. El proceso de la sosa produce aguas residuales de composición parecida al proceso del sulfato, con la única diferencia de que en el primero se utiliza hidróxido sódico sólo o con un bajo contenido el sulfuro sódico, mientras que en el proceso el sulfato se utiliza hidróxido sódico, sulfuro sódico, sulfato y carbonato sódicos. Las aguas residuales de la reducción de la pulpa por el método del sulfato representan el 14.9 % del total y contienen aproximadamente 350 ppm de sólidos en suspensión, 3,000 ppm de sólidos disueltos y 500 ppm de DBO. Si se emplea el método del sulfito, representan el 33.5 % del total, con una concentración aproximada de 320 ppm de sólidos en suspensión, 4,200 ppm de sólidos en disolución y 2,584 ppm de DBO.

Las aguas residuales del cribado de la pulpa por el método de sulfato representan el 9.1 % del total y contienen aproximadamente 350 ppm de sólidos en suspensión, 1,900 ppm de sólidos disueltos y 450 ppm de DBO. Si se emplea el método de sulfito, representan el 14.1 % del total, con una concentración aproximada de 150 ppm de sólidos en suspensión, 380 ppm de sólidos en disolución y 150 ppm de DBO. Las aguas residuales de lavado y espesado por el método del sulfato representan el 19 % del total y contiene aproximadamente 170 ppm de sólidos en suspensión, 700 ppm de sólidos disueltos y 500 ppm de DBO. Si se emplea el método del sulfito, representan el 16.4 % del total, con una concentración aproximada de 250 ppm de sólidos en suspensión, 220 ppm de sólidos en disolución y 400 ppm de DBO.

Las aguas residuales del blanqueo por el método del sulfato representan el 48.3 % del total y contienen aproximadamente 400 ppm de sólidos en suspensión, 1,100 ppm de sólidos disueltos y 200 ppm de DBO. Si se emplea el método del sulfito, representa el 35.4 % del total, con una concentración aproximada de 250 ppm de sólidos en suspensión, 1,600 ppm de sólidos en disolución y 200 ppm de DBO.

Debido al gran volumen de vertidos que se producen en la fabricación de pasta y gran cantidad de fibras que estos vertidos tienen, se presenta una especial atención a la recuperación de los vertidos; para esta recuperación se utiliza la filtración, la sedimentación y la flotación. En algunos casos se emplean también procesos de precipitación química. Una vez realizada la

recuperación se pueden realizar procesos de recuperación de las aguas residuales, con fangos activados, vertidos en lagunas y procesos de aplicación al terreno.

2.3.11. Fabricación del papel

En la fabricación del papel el principal vertido proviene de la fábrica papelera, y lo que se denomina agua blanca; este vertido contiene alrededor del 3 % de fibras pequeñas, por lo que es imprescindible su recuperación, en consecuencia, en muchos procesos, estas aguas se recirculan, utilizándose posteriormente en el tamizado, lavado y blanqueo de la fabricación de pasta. Generalmente, “antes de la reutilización de las aguas blancas, se realiza un proceso de flotación para la eliminación de las fibras en suspensión y otras partículas sólidas”. (Sans & Ribas, 1989)

2.3.12. Industrias de acabado de superficies

Los vertidos de las industrias de acabado de superficies tienen dos procedencias distintas: los vertidos de las aguas de lavado de cada proceso y los provenientes de la eliminación y cambio de los baños agotados. El lavado de los distintos procesos es, sin duda, el que produce la mayoría de las aguas residuales de este tipo de empresas y, podríamos decir, que lo produce de una forma continuada, aunque las concentraciones de los distintos compuestos no sean excesivamente altas.

Los vertidos de los baños agotados se producen de forma discontinua y comparándolos con la calidad total de aguas residuales producidas son muy poco significativos; no obstante, al producirse de forma discontinua y debido a la elevada concentración de productos que contienen, deben ser tenidos en cuenta. Uno de los problemas principales de las empresas de acabados de superficie es que se producen vertidos de compuestos altamente tóxicos, y son empresas de tamaño relativamente pequeñas y en la mayoría de los casos el coste económico de la depuración de sus vertidos es alto.

El proceso para seguir de una empresa de acabados de superficie depende del acabado final que se realice y del tipo de producto que se acabe. De una forma general este tipo de empresas tienen los siguientes procesos con producción de vertidos.

- Decapado fuerte con ácidos.
- Pre-desengrase o desengrase.

- Desengrase catódico y anódico (optativo).
- Decapado y activado.

Baño cianurado de cobre.

- Activado ácido (optativo).
- Baño ácido de níquel.

Los anteriores procesos enumerados constituyen una cadena automática en este tipo de industrias. Después del baño ácido de níquel se pasa, en general, a baños manuales de acabados finales tales como: cromado, plateado, dorado, latonado, estañado y baño ácido de cobre. Prácticamente, entre cada proceso existe un lavado que, tal como hemos dicho, produce los mayores volúmenes de vertido.

La concentración máxima de productos en este lavado depende de la calidad de enjuague necesaria según sea el siguiente proceso para realizar. Las aguas de lavado proceden del decapado grosero, tienen un pH bajo y concentraciones de sulfatos, fluoruros, cloruros, nitratos o fosfatos (dependiendo del ácido utilizado) de alrededor de 20 ppm. “Los procedentes del desengrasado inicial pueden contener tricloroetileno, percloroetileno y ser fuentes básicas o débiles básicas con agentes tensioactivos (depende del tipo de desengrase utilizado)” (Sans & Ribas, 1989)

Tabla 1 Consumos de agua en industrias

INDUSTRIA	m ³ / día	
	Por empleado	Por m ² de planta
Productos de alimentación	7.9	13.5
Productos lácteos	9.5	29.2
Conservas de frutas	6.8	8.2
Azucareras	36.8	6.3
Tintura y acabados textiles, excepto lana	2.5	11.3
Textiles en general	0.5	3.2
Aserraderos	44.1	7.3
Cartones	17.1	88.5
Industria química orgánica e inorgánica	20.0	9.2
Materiales plásticos, excepto vidrios	5.7	2.4
Drogas	1.2	7.7
Jabón, detergentes, cosméticos	2.0	7.8
Pinturas, barnices, lacados, esmaltes	3.2	11.5
Agricultura química	6.1	3.5
Productos químicos diversos	3.8	2.2
Refinerías de petróleos	14.5	1.8
Productos derivados del petróleo y del carbón	1.5	1.3
Curtido y acabado de pieles	2.8	8.4
Productos de vidrio	1.5	2.1
Cemento hidráulico	7.3	2.6
Ladrillo, rasillas	1.1	-
Alfarería	1.1	3.4
Yesos	7.9	0.1
Canterías	0.9	2.9
Asbestos abrasivos	3.2	5.6
Altos hornos, acero y laminación	2.5	0.1
Hierros y fundición del acero	1.4	5.8
Fundiciones secundarias, refinados	1.9	1.3

Fuente (Hernández, 2000)

La gran variedad y cantidad de productos que se vierten obliga a una investigación propia para cada tipo de industria. No existe similitud alguna entre los vertidos de actividades industriales, como son: alimentación, química, petroquímica, agrícola, forestal, minerales y metalúrgicas, etcétera.

Tabla 2 *Caracterización de Aguas residuales industriales*

Industria	Contaminantes
Textil	Carbonato sódico, detergentes, grasa en emulsión, sales minerales PH (Entre 10 y 11.5), elevado DQO, elevada concentración de sólidos en suspensión y totales. Colorantes, ácido acético – acetato sódico, dicromato sódico, sulfato amónico, sulfato sódico y monoclorobenceno, concentración de sulfatos, hipoclorito sódico, clorito sódico o agua oxigenada.
Curtidos	Hidróxido cálcico, sulfuro sódico, carbonato sódico, ácido sulfúrico, sólidos, entre 6,000 y 7,000 ppm, cloruro sódico, 900 ppm de DBO, 1,600 ppm de dureza total, 1,000 ppm de proteínas, 120 ppm de sulfato y entre 3 y 70 ppm de cromo.
Químicas	Aguas residuales fuertemente ácidas o básicas, en procesos industriales y especialmente en fábricas de productos químicos, como ácidos, bases, tintes, explosivos, insecticidas, fungicidas, productos farmacéuticos resinas de silicona, materiales de construcción, etcétera. Contienen ácido clorhídrico, sulfúrico y nítrico diluidos.
Productoras de explosivos	Producen aguas residuales fuerte ácidas y básicas, así como fuertemente coloreadas, concentración de sulfato y nitrógeno (éste en forma de amoniaco, nitrito y nitratos). Aguas turbias, con coloración, ácidas y contienen cantidades importantes de cobre y zinc, así como detergentes y aceites. Aguas residuales en gran cantidad, conteniendo arcillas, fangos coloidales y aceites, gran contenido de flúor, pentóxido de fósforo, sólidos en suspensión, contienen fósforo elemental, sólidos en suspensión, sílice y pentóxido de fósforo, como ortofosfatos, polifosfato o fósforo orgánico.
Mataderos	Color pardo – rojizo, una alta DBO y contienen cantidades importantes de sólidos en suspensión, nitrógeno, hierro, fosforo.
Preparación y conservas de carnes	Sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo orgánico, sólidos en suspensión, así como la DBO y DQO de las aguas residuales.
Lácteas	Son aguas ácidas, sólidos en suspensión, vertidos neutros y ligeramente alcalinos, alto contenido en materia orgánica disuelta.
Papeleras	Aguas residuales con hidróxido sódico, sulfuro sódico, sulfato y carbonato sódicos, sólidos en suspensión, DBO. aguas blancas con fibras en suspensión y otras partículas sólidas.
Acabado de superficies	Vertidos de compuestos altamente tóxicos, baño ácido de níquel, pH bajo y concentraciones de sulfatos, fluoruros, cloruros, nitratos o fosfatos, tricloroetileno, percloroetileno, ser fuentes básicas o débiles básicas con agentes tensioactivos.

De todas formas, si el contenido es muy alto en materia orgánica o sólidos en suspensión, pueden estimarse la elección de índices con el mismo criterio que el analizado para la definición de las aguas residuales de origen doméstico. Pero será necesario analizar las sustancias específicas vertidas, que pudieran dificultar el tratamiento biológico o afectar a los materiales constitutivos de la red de alcantarillado u obras de fábrica en contacto con las aguas. La industria considerada, antes de verter debería efectuar la corrección de los parámetros perturbadores.

Son numerosísimos los índices orgánicos e inorgánicos procedentes de la actividad industrial, decenas de miles, pero de forma resumida, deberán contemplarse índices que definan el contenido en:

- Ácidos que pueden atacar el material o inhibir los procesos.

- Básicos que pueden inhibir los procesos biológicos.
- Productos petrolíferos y grasas poco degradables.
- Detergentes que retardan la sedimentación, forman espumas e impiden la aireación.
- Metales pesados: Cu, Cr, As, Cd, Pb, Hg, B, etcétera, tóxicos para los microorganismos que intervienen en los procesos biológicos.
- Fenoles, cianuros, inhibidores y tóxicos.
- Productos radioactivos.

Es conveniente resaltar aquí la importancia de la toma de muestras. El análisis reflejará el resultado de la muestra enviada al laboratorio, debiendo ser ésta representativa del agua que se pretende definir. “La toma de muestra deberá tener en cuenta la variación en el tiempo del caudal y carga contaminante en el valor absoluto”. (Hernández, 2000)

En la actualidad el tratamiento de los lixiviados se centra en su depuración para reducir la concentración de los contaminantes existentes por debajo de los límites fijados por la normativa vigente para su vertido. Su tratamiento de depuración se basa en recirculación, evaporación forzada y tratamientos biológicos. En Colombia no existe una normativa específica para el tratamiento de lixiviados. Para el control de estos residuos se emplean los estipulados en los decretos y resoluciones que hacen referencia al vertimiento de residuos líquidos Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Salud, Resolución 1074 de 1997 del DAMA Resolución 3358 de 1990 de la CAR.

Tabla 3 Composición de un lixiviado de vertedero y su variación con el tiempo

Constituyente	Vertedero Nuevo		Vertedero Maduro
	Rango	Típico	
DBO5	2000-3000	10000	100-200
COT (Carbono Orgánico Total)	1500-20000	6000	80-160
DOC (Demanda de Oxígeno Químico)	3000-60000		100-500
Total, de sólidos en suspensión	200-2000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5.-40	25	5.-10
Total fósforo	5-100	30	5.-10
Ortofosfato	4.-80	20	4.-8
Alcalinidad como CaCO3	1000-10000	3000	200-1000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO3	300-10000	3500	200-500
Calcio	200-30000	1000	100-400
Magnesio	50-1500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2500	500	100-200
Cloro	200-3000	500	100-400
Sulfatos	50-1000	300	20-50
Total hierro	50-1200	60	20-200

Fuente: (Geoge, Theisen, & Vigil, 1997)

Dentro de los procedimientos utilizados para el manejo de los lixiviados se encuentran la recirculación, evaporación forzada, tratamientos biológicos, tratamientos fisicoquímicos, con membranas.

La caracterización de los lixiviados física, química y biológica permite visualizar que ver que puedan ser usadas con otro fin diferente del vertido. Alto contenido en carbono, nitrógeno, niveles considerables de potasio, fósforo, calcio, pH cercano a la neutralidad, bajo contenido en metales pesados, buen poder germinativo entre otros podría acercarnos a un aprovechamiento dentro de esquemas de reforestación o cultivos con fines industriales como la yuca para obtención de alcohol carburante. (Betancourt R.A., 2012)

El tratamiento de aguas residuales abarca un escenario muy amplio de problemas porque incluye una gran variedad de afluentes y unos requisitos de efluentes y de métodos de disposición muy diferentes.

El tratamiento de aguas residuales incluye tratamiento de aguas de una sola residencia, de aguas residuales de condominios y urbanizaciones, de aguas residuales de alcantarillados municipales combinados, así como de aguas grises, negras e industriales de procesos de manufactura con calidades muy específicas y variables según el proceso del cual provienen. El tratamiento de aguas residuales también puede ser muy importante en el medio rural, en aguas de uso agrícola y pecuario, para riego y reúso. El determinante más importante en la selección del sistema de tratamiento lo constituyen la naturaleza del agua residual cruda y los requerimientos de uso o disposición del efluente.

Teniendo en cuenta la diversidad industrias y de compuestos presentes en las aguas residuales en las mismas es difícil inferir de manera generalizada como una mezcla única, ya que esto depende de los procesos de producción que cada industria maneje.

Según la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), el sector textil, de confección y moda es de clase mundial, debido a sus grandes potencialidades para crecer y fortalecer su posición en el mercado internacional, ya que cuenta con una fuerte red empresarial alrededor del país, alta calidad en la confección y fabricación, gran capacidad de producción, calidad en el servicio, eficiencia y rapidez en la producción y en la entrega de productos, creatividad en los diseños, alta potencialidad en el desarrollo de nichos como la industria médica, biofibras, militar, textiles ópticos, entre otros; “la posición geográfica que permite llegar a los países de la región con la velocidad que el mercado espera y beneficios de los acuerdos comerciales que permiten acceder a varios de los importantes centros de consumo del mundo”. (Benavides R., 2015)

Desde el punto de vista de la generación de valor, de empleo y de divisas, esta cadena es una de las más importantes de la industria en Colombia, característica que es común en muchos países en desarrollo. Esto se debe a que casi todos los eslabones cuentan con una gran producción nacional y son intensivos en mano de obra.

Colombia, además de ser uno de los países más grandes de América del Sur (el 4to), es reconocida en América Latina y el mundo por ser un mercado en donde la moda tiene un lugar privilegiado. Para nadie es un secreto que grandes ciudades colombianas, como Medellín y Bogotá son verdaderos centros de la industria textil. En el caso de la primera, produce un 50% del total del sector. Y la ciudad capital, provee un 35%. El resto es aportado por diferentes puntos de la geografía nacional. Colombia es un productor para consumo local y un gran exportador de todo tipo de ropa, jeans, sábanas, toallas, ropa interior, camisetas, pantalones, vestidos, ropa para niños,

cuero y calzados, entre otros, con un crecimiento importante. “En la última década, Colombia a logrado hacer crecer su economía en un 4.2%. Este número lo ha convertido en el tercer país con mayor crecimiento en la región, alcanzando industrias consolidadas como la de Brasil”.(linkcompresores, 2020)

Además, Colombia posee una red comercial con más de 500 unidades de producción textil que producen miles de prendas de vestir para millones de consumidores. Por otro lado, nuestro país es un mercado muy atractivo, no solo como abastecedor mundial de textiles, sino también, por su fortaleza institucional.

De ello dan cuenta 13 tratados de libre comercio, 10 acuerdos internacionales de inversión y otros centenares de convenios que han convertido a Colombia en una industria que puede producir y proveer productos con costos hasta más bajos que los enviados desde China, el gigante manufacturero. (linkcompresores, 2020)

Estas condiciones hacen posible que la industria textil colombiana genere cerca de 200 mil puestos de trabajo, al tiempo en que hace posible más de 600 mil empleos indirectos. Aproximadamente un 13% de los empleos de la industria manufacturera, tienen su origen en el sector textil. Por otro lado, “uno de los fuertes de la industria textil colombiana está en su infraestructura tecnológica, además de un eficiente y esmerado control de calidad para así satisfacer al máximo a los clientes”. (linkcompresores, 2020)

El textil líder del sector es el algodón, que aporta un 43% de la producción total. Le acompañan la producción de tejidos e hilos que suman un 21%; al tiempo en que un 19% tienen su origen en los tejidos de punto. Finalmente, un nada despreciable 8 % es aportado por los productos de fibra. La industria textil colombiana produce una impresionante cantidad de metros cuadrados en tejidos de algodón, nylon, viscosa, lana y poliéster. “Se trata de más de 800 millones de metros cuadrados de tejidos (incluyendo también las mezclas de poliéster, el satén y otros tejidos y fibras sintéticas)”.(linkcompresores, 2020)

En las etapas finales de la cadena textil, las exportaciones juegan un papel importante, ya que tienen una alta participación sobre el total de la producción y suelen dar valor agregado a los productos a través de la industria de la moda.

Actualmente las empresas nacionales enfrentan una fuerte competencia debido al crecimiento de las importaciones y la presencia de reconocidas marcas internacionales en el país.

Según un estudio reciente de la Federación Internacional de Fabricantes Textiles (ITMF), más de dos tercios de las empresas que fueron encuestadas en Asia, Europa, África y América, afirmó que han reducido su producción durante la crisis sanitaria. Además, muchas de ellas indicaron que esperan volver a la normalidad entre 2022 y 2023. En el estudio se concluye que solo el 21% de las organizaciones han sido capaces de sostener sus niveles de producción desde inicios de año, y el 9% logró incrementar sus niveles pese a la pandemia.

Frente a las líneas de negocio, los segmentos que más se han visto afectados son estampación y acabados, con una disminución del 30% de la actividad frente a 2019. En cuanto a los tejedores, las reducciones son del 23% y del 22% para los fabricantes de fibras. Por su parte, los fabricantes integrados (-15%), diseñadores (-16%) y los hilanderos (-17%), han sufrido un menor impacto. (inexmoda, sectorial, 2020)

Los segmentos de la moda registran las mayores afectaciones de la actividad industrial. Si bien con la reactivación comercial y el fin de gran parte de las restricciones el consumo de los hogares se ha dinamizado, esto no se ha reflejado en la producción nacional debido a la acumulación de inventarios por parte de los comerciales y a la entrada de productos extranjeros que logró un repunte en el caso de las prendas de vestir.

A nivel comercial, el comportamiento del gasto de los hogares ha afectado la asignación de gasto en moda, que, si bien se ha venido recuperando paulatinamente con la reapertura y el fin de gran parte de las restricciones, “solamente la categoría de joyería mantiene su asignación de gasto, respecto a las demás categorías de moda”. (inexmoda, sectorial, 2020)

En 2020, el sector textil tuvo que transformarse para superar la crisis que causó la pandemia del coronavirus. Con los comercios cerrados, los consumidores en casa, las empresas quebradas y la gente sin empleo, los empresarios dejaron de lado, por un tiempo, “la producción de ropa de temporada y ajustaron su maquinaria para crear elementos y ropa de protección tanto para el sector médico como para el consumidor que necesitaba sentirse seguro y protegido en la calle”. (Carreño R., 2020)

El sector textil en 2021 se seguirá ajustando para responder a los cambios, como lo ha hecho a lo largo de la historia. Ante la posibilidad de nuevos aislamientos, tanto los hogares como los comercios estarán preparados y no serán tan agresivos como en 2020. “Los gremios y expertos hacen un llamado a que las empresas cumplan con los protocolos, a que se siga innovando con

textiles para generar valor y a que los colombianos continúen con el autocuidado y apoyen la industria local”. (Carreño R., 2020)

Teniendo en cuenta la argumentación anterior, de manera puntual se tomará la industria textil como un referente para el tratamiento de las aguas residuales en el laboratorio de osmosis inversa, teniendo de cuenta la caracterización teórica de la composición química del agua residual para esta industria y teniendo en cuenta la cantidad de agua residual agua generada por la misma.

En promedio una compañía textil “genera 5.199 m³ al año de agua residual, teniendo en cuenta que son industrias que llevan a cabo procesos de lavado, teñido, blanqueo, entre otros, donde deben usar gran cantidad de agua”. (Benavides R., 2015)

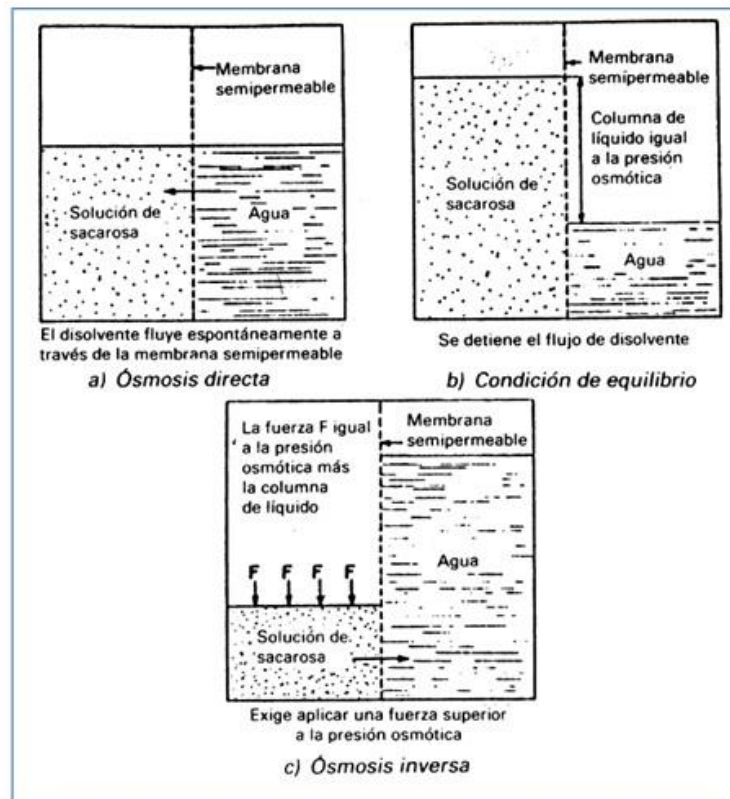
2.4.Diseño de un sistema de Osmosis Inversa

2.4.1. Condiciones para cumplir el uso del sistema de osmosis inversa y justificación de la selección de la industria.

El principio en el que se basa la osmosis inversa se representa en la figura 5. La figura 5 (a) representa la osmosis directa (esto es, las condiciones existentes al comienzo del experimento con la solución de sacarosa de la figura 5 (b). El disolvente huye espontáneamente a través de la membrana semipermeable. En la figura 5 (b) se representa la condición de equilibrio. “En este momento la altura del líquido que se ha desarrollado como consecuencia del flujo de disolvente a través de la membrana es igual a la presión osmótica. El flujo de disolvente se detiene”. (RAMALHO, 2003) En la figura 5 (c) se representa lo que sucede cuando se aplica una fuerza F superior al valor de la presión osmótica a la solución de sacarosa.

El flujo de disolvente se invierte, o sea, desde el compartimento conteniendo la solución de sacarosa al compartimento de agua. Este fenómeno se denomina osmosis inversa.

Figura 5 Diagrama explicativo de la ósmosis inversa



Nota Fuente (Ramalho, 2003)

En el tratamiento de aguas residuales mediante ósmosis inversa, el afluente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión osmótica de la solución (situación análoga a la de la figura 5 (c), excepto en lo que se refiere a que el compartimento de la izquierda contiene agua residual en lugar de solución de sacarosa).

Bajo estas circunstancias, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. “Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimento del agua residual. Este concentrado, que posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga. Se obtiene agua purificada en el otro compartimento”. (Ramalho, 2003)

Es el corazón del sistema, su función es la de producir agua de muy bajas sales. Su purificación permite remover el 90% - 98 % de Contaminación microbiana y sales presentes. El

agua producto es de excelente calidad fisicoquímica y microbiológica capaz de ser usado para consumo humano con la necesidad solamente de la adición de cloro. Es el equipo más importante del sistema, debido a que es donde se remueven altos porcentajes de sales y microorganismos remanentes.

Este Equipo de Osmosis debe de ingresar agua pre-tratada, libre de partículas (sólidos en suspensión), libre de cloro y libre de dureza, es por esto por lo que se tienen equipos previos a este paso. La filtración bajo presión se da a través de una membrana cuyos poros son pequeños. Los poros de la membrana están concebidos de manera que la mayoría de las sales, de los inorgánicos y de los iones son eliminadas 90-98%).

Las moléculas de agua atraviesan fácilmente la membrana. Finalmente, las partículas en suspensión, bacterias y pirógenos son prácticamente eliminados por completo mediante la ósmosis inversa. Se compone principalmente de una electrobomba de alta presión y membranas de poliamida. “Las porta-membranas son de acero inoxidable y lleva accesorios de control de parámetros como rotámetros para medir el caudal y manómetros para medir la presión de operación”. (Fariñas Iglesias, 1999)

El pretratamiento en las plantas de Osmosis Inversa es adecuar las características físico-químicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos.

En estos procesos, la misión del pretratamiento consiste en eliminar o reducir al máximo posible el riesgo de atascamiento de las membranas por acumulación de sustancias, materiales y microorganismos sobre su superficie. Este tipo de atascamiento reduce la vida y la eficiencia de las membranas, ya que empeora la calidad del agua tratada y produce un incremento de la presión necesaria para su funcionamiento. La procedencia del agua de entrada es muy importante a la hora de diseñar el pretratamiento de una planta de membranas.

En general, para los procesos de membranas los objetivos del pretratamiento son los siguientes: “Eliminar los sólidos en suspensión, evitar la precipitación de óxidos metálicos, evitar la precipitación de sales minerales, reducir el contenido de materia orgánica del agua, eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada”. (García Olmos, 2004)

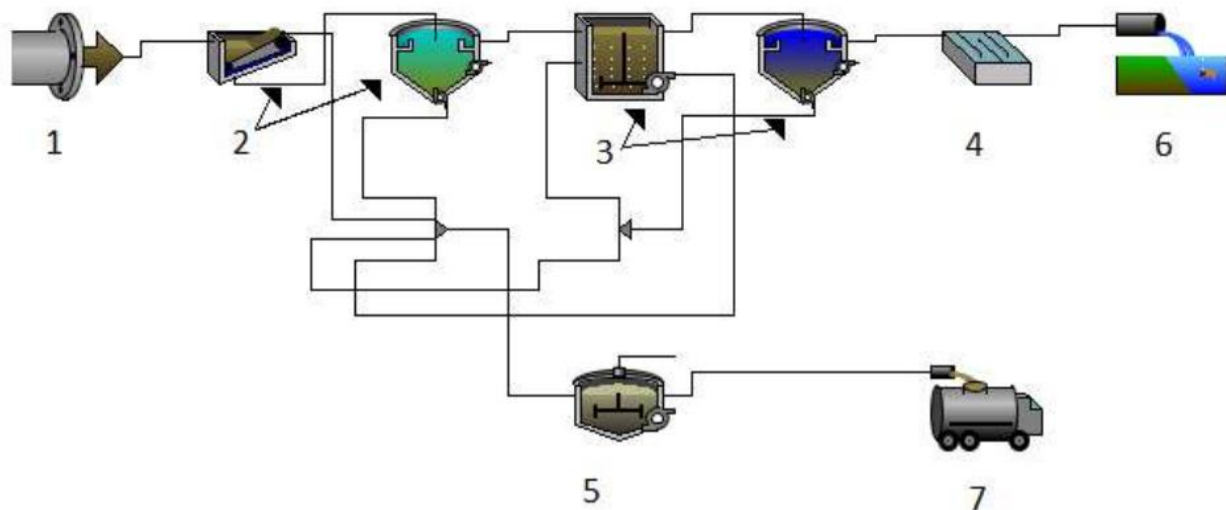
Después de describir los distintos procesos unitarios de tratamiento, es necesario describir de manera general una “PTAR (Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales) convencional y las

etapas de tratamiento por la que pasa el agua residual antes de regresarla a algún cuerpo de agua o de ser aprovechada en los procesos industriales”. (González Martínez, 2017)

En la Figura 6 se muestra la configuración de una PTAR convencional la cual suele constar de 7 etapas principales. En la primera etapa (1) el afluente o agua cruda, la cual es un agua que llega directamente del drenaje sanitario llega a la PTAR; la segunda etapa (2) es el pretratamiento, tratamiento preliminar o tratamiento primario, proceso por el cual el agua residual pasa a través de un sistema de rejillas, desarenadores, tanque de homogenización y sedimentador primario.

La tercera etapa (3) es en la que se encuentra el tratamiento biológico que puede ser: anaerobio, aerobio, reactores biológicos de membrana, o bien sistemas lagunares, entre otros, seguido de esto se encuentra una etapa cuatro (4) que puede ser un tratamiento terciario ya sea de ósmosis inversa, adsorción física o química o bien un sistema de desinfección por cloro, radiación UV o un sistema de ozonificación, la quinta etapa (5) es la digestión de los lodos, aunque muchas veces solo es deshidratado y llevado a su disposición final (6), la etapa seis (6) es efluente o agua tratada con la calidad deseada.

Figura 6 Configuración de una PTAR convencional



Nota Fuente (González Martínez, 2017)

Para la Modelación, simulación y propuesta de diseño de este equipo de ósmosis inversa en este trabajo se planteará un modelo convencional matemático para simular de forma dinámica un sistema de osmosis inversa. El modelo se conforma a partir de balances macroscópicos de materia en estado no estacionario combinados con el modelo de transporte en la membrana: difusión-solución.

En esta primera parte, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales suponiendo un flujo patrón de mezcla completa en el módulo de osmosis inversa (módulo de polarización=1). “Con este sistema se podrá determinar los efectos de concentración, presión y el área en el comportamiento del proceso de osmosis inversa”. (Condorhuaman, 2012). De igual manera se propondrá un método que nos permita brindar una solución practico al diseño.

Finalmente, se hará una propuesta de un sistema de Osmosis Inversa para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, que permita comprender su implementación como tratamiento complementario de aguas residuales y lixiviados, como referente se tendrá la industria textil con el propósito de “usarlo como mecanismo de enseñanza empleado por instituciones educativas como colegios y universidades son los modelos o prototipos experimentales” (Guillermo., 1997) que, a lo largo de la historia, “se han empleado como una forma de representar de manera clara e inmediata las cualidades y características de un proyecto complejo, de tal manera, que sea fácilmente comprensible para quien o quienes lo estudian” (Hechinger, 2005).

Según la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), el sector textil, de confección y moda es de clase mundial, debido a sus grandes potencialidades para crecer y fortalecer su posición en el mercado internacional, ya que cuenta con una fuerte red empresarial alrededor del país, alta calidad en la confección y fabricación, gran capacidad de producción, calidad en el servicio, eficiencia y rapidez en la producción y en la entrega de productos, creatividad en los diseños, alta potencialidad en el desarrollo de nichos como la industria médica, biofibras, militar, textiles ópticos, entre otros; “la posición geográfica que permite llegar a los países de la región con la velocidad que el mercado espera y beneficios de los acuerdos comerciales que permiten acceder a varios de los importantes centros de consumo del mundo”. (Benavides R., 2015)

Desde el punto de vista de la generación de valor, de empleo y de divisas, esta cadena es una de las más importantes de la industria en Colombia, característica que es común en muchos

países en desarrollo. Esto se debe a que casi todos los eslabones cuentan con una gran producción nacional y son intensivos en mano de obra

Colombia, además de ser uno de los países más grandes de América del Sur (el 4to), es reconocida en América Latina y el mundo por ser un mercado en donde la moda tiene un lugar privilegiado. Las grandes ciudades colombianas, como Medellín y Bogotá son verdaderos centros de la industria textil. En el caso de la primera, produce un 50% del total del sector. Y la ciudad capital, provee un 35%.

El resto es aportado por diferentes puntos de la geografía nacional. Colombia es un productor para consumo local y un gran exportador de todo tipo de ropa, jeans, sábanas, toallas, ropa interior, camisetas, pantalones, vestidos, ropa para niños, cuero y calzados, entre otros, con un crecimiento importante. En la última década, “Colombia a logrado hacer crecer su economía en un 4.2%. Este número lo ha convertido en el tercer país con mayor crecimiento en la región, alcanzando industrias consolidadas como la de Brasil”. (linkcompresores, 2020)

Además, Colombia posee una red comercial con más de 500 unidades de producción textil que producen miles de prendas de vestir para millones de consumidores. Por otro lado, nuestro país es un mercado muy atractivo, no solo como abastecedor mundial de textiles, sino también, por su fortaleza institucional. De ello dan cuenta 13 tratados de libre comercio, 10 acuerdos internacionales de inversión y otros centenares de convenios que han “convertido a Colombia en una industria que puede producir y proveer productos con costos hasta más bajos que los enviados desde China, el gigante manufacturero”. (linkcompresores, 2020)

Estas condiciones hacen posible que la industria textil colombiana genere cerca de 200 mil puestos de trabajo, al tiempo en que hace posible más de 600 mil empleos indirectos. Aproximadamente un 13% de los empleos de la industria manufacturera, tienen su origen en el sector textil. Por otro lado, “uno de los fuertes de la industria textil colombiana está en su infraestructura tecnológica, además de un eficiente y esmerado control de calidad para así satisfacer al máximo a los clientes”. (linkcompresores, 2020)

El textil líder del sector es “el algodón, aporta un 43% de la producción total. Le acompañan la producción de tejidos e hilos que suman un 21%; el 19% tienen su origen en los tejidos de punto. Finalmente, un 8% es aportado por productos de fibra”. (linkcompresores, 2020) La industria textil colombiana produce una impresionante cantidad de metros cuadrados en tejidos de algodón, nylon,

viscosa, lana y poliéster. Se trata de más de 800 millones de metros cuadrados de tejidos (incluyendo también las mezclas de poliéster, el satén y otros tejidos y fibras sintéticas).

En las etapas finales de la cadena textil, las exportaciones juegan un papel importante, ya que tienen una alta participación sobre el total de la producción y suelen dar valor agregado a los productos a través de la industria de la moda.

Actualmente las empresas nacionales enfrentan una fuerte competencia debido al crecimiento de las importaciones y la presencia de reconocidas marcas internacionales en el país.

Según un estudio reciente de la Federación Internacional de Fabricantes Textiles (ITMF), más de dos tercios de las empresas que fueron encuestadas en Asia, Europa, África y América, afirmó que han reducido su producción durante la crisis sanitaria. Además, muchas de ellas indicaron que esperan volver a la normalidad entre 2022 y 2023. En el estudio se concluye que solo el 21% de las organizaciones han sido capaces de sostener sus niveles de producción desde inicios de año, y el 9% logró incrementar sus niveles pese a la pandemia.

Frente a las líneas de negocio, los segmentos que más se han visto afectados son estampación y acabados, con una disminución del 30% de la actividad frente a 2019. En cuanto a los tejedores, las reducciones son del 23% y del 22% para los fabricantes de fibras. Por su parte, “los fabricantes integrados (-15%), diseñadores (-16%) y los hilanderos (-17%), han sufrido un menor impacto”. (inexmoda, sectorial, 2020)

Los segmentos de la moda registran las mayores afectaciones de la actividad industrial. Si bien con la reactivación comercial y el fin de gran parte de las restricciones el consumo de los hogares se ha dinamizado, esto no se ha reflejado en la producción nacional debido a la acumulación de inventarios por parte de los comerciales y a la entrada de productos extranjeros que logró un repunte en el caso de las prendas de vestir.

A nivel comercial, el comportamiento del gasto de los hogares ha afectado la asignación de recursos en moda, que, si bien se ha venido recuperando paulatinamente con la reapertura y el fin de gran parte de las restricciones, “solamente la categoría de joyería mantiene su asignación de gasto, respecto a las demás categorías de moda”. (inexmoda, sectorial, 2020)

En 2020, el sector textil tuvo que transformarse para superar la crisis que causó la pandemia del coronavirus. Con los comercios cerrados, los consumidores en casa, las empresas quebradas y la gente sin empleo, los empresarios dejaron de lado, por un tiempo, la producción de ropa de temporada y ajustaron su maquinaria para crear elementos y ropa de protección tanto para el sector

médico como para el consumidor que necesitaba sentirse seguro y protegido en la calle. (Carreño R., 2020)

El sector textil en 2022 se seguirá ajustando para responder a los cambios, como lo ha hecho a lo largo de la historia. Ante la posibilidad de nuevos aislamientos, tanto los hogares como los comercios estarán preparados y no serán tan agresivos como en 2020. “Los gremios y expertos hacen un llamado a que las empresas cumplan con los protocolos, a que se siga innovando con textiles para generar valor y a que los colombianos continúen con el autocuidado y apoyen la industria local”. (Carreño R., 2020)

A modo de recopilación de información se consultó en un trabajo de grado previo para una industria textil y de acuerdo con los consumos de agua reportados durante el año 2014, resultó un consumo promedio de 429 m³ de agua al mes, donde el consumo máximo se presentó durante el mes de octubre con 615 y el mínimo durante el mes de enero con 310.

Las variaciones entre “el volumen de agua consumido en cada uno de los meses se debe a las temporadas de producción de la empresa, la cual va aumentando desde el mes de agosto hasta noviembre y disminuye a partir del mes de Enero”. (Benavides R., 2015) Lo cual corresponde a un consumo anual de 5.148 m³ de agua teniendo en cuenta que son industrias que llevan a cabo procesos de lavado, teñido, blanqueo, entre otros, donde deben usar gran cantidad de agua.

Para realizar el diseño del prototipo de ósmosis inversa fue necesario desarrollarlo a través de información recolectada de la literatura. Teniendo en cuenta que para los procesos industriales de confección textil en la ciudad de Medellín no se cuenta con análisis detallado del tipo de agua que se genera luego del proceso de lavado y tinturado, se tomó como referencia una “caracterización fisicoquímica del agua industrial” (Nemerrow, 1998).

Tabla 4 Caracterización fisicoquímica del agua industrial

Caracterización Agua sin tratar		
Parámetros	Valores (Concentración Alimentación)	Unidad
pH	8	-
T	21	°C
NH ₄ ⁺ NH ₃	0	mg/L
K	364,34	mg/L
Na	8696,99	mg/L
Mg	1156,61	mg/L
Ca	358,4	mg/L
Sr	0	mg/L
Ba	0	ppb
CO ₃	21,26	mg/L
HCO ₃	195,73	mg/L
NO ₃	11,83	mg/L
Cl	16142,17	mg/L
F	0	mg/L
SO ₄	1976,29	mg/L
SiO ₂	6,22	mg/L
B	4,52	mg/L
CO ₂	0,97	mg/L
Total, Sumatoria (Solidos totales disueltos STD)		28935,33

Nota Tomado y modificado de (Nemerrow, 1998)

2.4.2. Sistemas de membrana

La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas. “La tecnología de la membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación diferentes y muy característicos. Estos procesos son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana”. (Soriano & Zaragoza, 1994)

Las membranas se utilizan cada vez más a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas son

competitivas para las técnicas convencionales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi- permeables.

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella. La filtración de membrana se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción (filtros de arena y filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos), extracción y destilación.

La filtración de membrana tiene bastantes ventajas frente a las técnicas existentes de purificación del agua:

- a. Es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura. Esto es principalmente importante porque permite el tratamiento de los materiales sensible al calor. Es por esto por lo que se aplican ampliamente para la producción de alimento.
- b. Es un proceso de bajo coste energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación.
- c. El proceso puede ser fácilmente ampliado.

2.4.3. Selección de sistemas de membrana

La elección de un determinado tipo de sistema de membrana está determinada por un gran número de aspectos, tales como costes, riesgos de adaptación de las membranas, densidad de embalaje y oportunidades de limpieza. Las membranas nunca son aplicadas como una única placa plana, porque una gran superficie a menudo da lugar a altos costes de inversión. Es por esto por lo que los sistemas son construidos de forma muy compacta, de manera que se consigue una gran superficie de membrana en el mínimo volumen posible.

Las membranas se aplican en varios tipos de módulos. Hay dos tipos principales, llamados sistema tubular de membrana y sistema placa y marco de membrana. Los sistemas tubulares de

membrana se dividen en membranas tubulares, capilares y de fibras huecas. Las membranas de placa y marco se dividen en membranas espirales y membranas almohadiformes.

2.4.3.1. Membranas tubulares

Las membranas tubulares no son membranas autosuficientes. Están situadas dentro de un tubo, hechas de un tipo especial de material. Este material es la capa que sostiene a la membrana. Debido a que las membranas tubulares se localizan dentro de un tubo, el flujo en una membrana tubular es generalmente del revés. La causa principal de esto es que la unión de la membrana a la capa que la sostiene es muy débil.

Las membranas tubulares tienen un diámetro de 5 a 15 mm. Debido al tamaño de la superficie de la membrana, no es probable que las membranas tubulares se obstruyan. Un inconveniente de las membranas tubulares es que la densidad del empaquetamiento es baja, lo que resulta en un mayor precio por módulo.

Figura 7 *Membrana tubular*

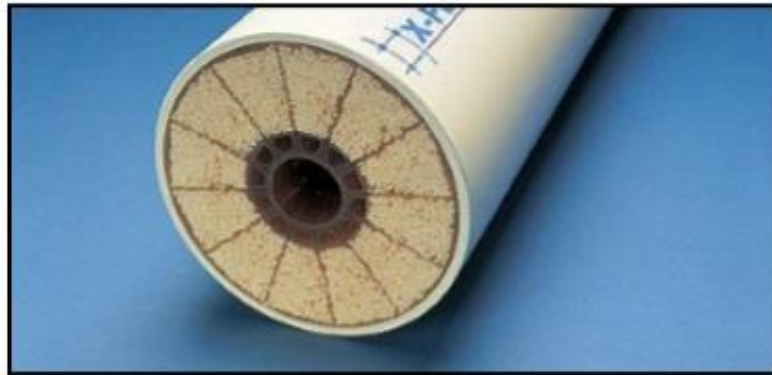


Nota Fuente (gea, 2021)

2.4.3.2. Membranas capilares

Con las membranas capilares la membrana sirve de barrera selectiva, que es suficientemente grande para resistir las presiones de filtración. Debido a esto, el flujo a través de las membranas capilares puede ser tanto de dentro hacia afuera como de afuera hacia adentro, el diámetro de las membranas capilares es mucho más pequeño que el de las membranas tubulares, concretamente de 0.5 a 5 mm. Debido al menor diámetro, las probabilidades de obstrucción con una membrana capilar son mucho mayores. Una ventaja es que la densidad de empaquetamiento es mucho mayor.

Figura 8 Membranas capilares



Nota. Fuente (norit, 2020)

2.4.3.3. Membranas de fibras huecas

Las membranas de fibras huecas tienen un diámetro inferior a $0.1 \mu\text{m}$. En consecuencia, las posibilidades de obstrucción de una membrana de fibras huecas son muy elevadas. Las membranas solo pueden ser usadas para el tratamiento de agua con un bajo contenido de sólidos suspendidos. La densidad de empaquetamiento de una membrana de fibras huecas es muy alta. Las membranas de fibras huecas son casi siempre usadas solamente para nanofiltración y ósmosis inversa.

Figura 9 Membranas de fibras huecas



Nota. Fuente (emalsa, 2021)

2.4.3.4. Membranas de espiral

Las membranas de espiral consisten en dos capas de membrana, situadas en un tejido colector de perneados, esta funda de membrana envuelve a un desagüe de perneados situado en posición central (ver figura de abajo). Esto hace que la densidad de embalaje de las membranas sea mayor, el canal de entrada del agua se sitúa a una altura moderada, para prevenir la obstrucción de la unidad de membrana.

Las membranas de espiral son usadas en procesos de nanofiltración y ósmosis inversa.

Figura 10 Membrana Espirales



Nota. Fuente (emalsa, 2021)

2.4.3.5. Membranas almohadiformes

Las membranas que constan de placas planas se llaman membranas almohadiformes. El nombre de almohadiforme viene de la forma de almohada que tienen dos membranas cuando son empaquetadas juntas en una unidad de membrana. Dentro de la “almohada” hay una placa de apoyo, que se ocupa de la solidez. Dentro del módulo se encuentran muchas almohadas con un cierto espacio de separación entre ellas que depende del contenido en sólidos disueltos del agua residual. El agua fluye de dentro afuera a través de las membranas. Cuando el tratamiento ha sido realizado, el permeado se recoge en el espacio entre las membranas, desde donde es sacado a través de cañerías.

2.5. NORMATIVA

En el caso de Colombia los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben implementar el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000 en su título E que plantea los criterios básicos y requisitos mínimos con los cuales se plantea la complejidad de los sistemas, el alcance del proyecto, marco legal, aspectos ambientales, el aval por parte de los planes de ordenamiento territorial, la factibilidad, el diseño, construcción, revisión técnica, operación y mantenimiento, todo esto con el fin de asegurar la calidad, eficiencia, durabilidad, funcionalidad sostenibilidad de todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se desarrollen en el país y asegurar que todos los cuerpos receptores tengan una calidad de agua que ayude a sustentar sus usos, en Colombia “La Resolución 0631 de 2015 establece los parámetros obligatorios que deben cumplir las aguas residuales para ser vertidas a los cuerpos de agua, esta resolución se acopla a la realidad urbana, industrial y ambiental del país”(Hidalgo Santana & Mejia Alvarez, 2010)

Este proyecto tomo base la normatividad descrita en la Resolución 0631 de 2015, que entró en vigor el 01 de enero de 2016, donde se muestran los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales industriales y los cuales serían el objetivo de eliminación con las membranas.

Tabla 5 Normativa en la resolución 0631 de 2015 para el sector textil

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Generales		
pH	Unidades	6.00 a 9.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	225,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	75,000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	75,000
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1,500
Grasas y Aceites	mg/L	15,000
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L	0,200
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,000
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	0,100
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,000
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	5,000
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,000
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1,000
Metales y Metaloides		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Antimonio (Sb)	mg/L	0,300
Arsénico (As)	mg/L	0,100
Bario (Ba)	mg/L	1,000
Berilio (Be)	mg/L	Análisis y Reporte
Boro (Bo)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,010

Cinc (Zn)	mg/L	3,000
Cobalto (Co)	mg/L	0,100
Cobre (Cu)	mg/L	1,000
Cromo (Cr)	mg/L	0,100
Estaño (Sn)	mg/L	2,000
Hierro (Fe)	mg/L	1,000
Litio (Li)	mg/L	Análisis y Reporte
Manganeso (Mn)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002
Molibdeno (Mo)	mg/L	Análisis y Reporte
Níquel (Ni)	mg/L	0,100
Plata (Ag)	mg/L	0,200
Plomo (Pb)	mg/L	0,100
Selenio (Se)	mg/L	0,200
Titanio (Ti)	mg/L	Análisis y Reporte
Vanadio (V)	mg/L	1,000
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Acidez Total	mg/L	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L	Análisis y Reporte
Color Real	1m	Análisis y Reporte
Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm.		

Nota. Adaptado de (Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015)

Los tratamientos de aguas residuales cuentan en general con cuatro tipos de tratamientos (preliminar, primario, secundario y terciario) que se realizan integrando un conjunto de operaciones unitarias, donde cada uno cumple una función específica ligada al tipo de contaminante que se llega a clasificar como materia en suspensión, materia coloidal o disuelta, “a continuación se describen los tipos de tratamientos y en la Figura 11., se da un ejemplo de la integración de trenes de tratamiento” (Izarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013) (Noyola, Morgan, & Guereca)

Figura 11 Ejemplo de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales



Nota Fuente (Noyola, Morgan, & Guereca)

Para los procesos de membranas los objetivos del pretratamiento son los siguientes:

- Eliminar los sólidos en suspensión.
- Evitar la precipitación de óxidos metálicos.
- Evitar la precipitación de sales minerales.
- Reducir el contenido de materia orgánica del agua.
- Eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada.

3. Metodología

La metodología de la “Modelación, simulación y propuesta de diseño de un equipo de ósmosis inversa que permita estudiar el tratamiento de aguas a nivel de laboratorio”, se ha basado en primero buscar estudios realizados para sistemas de osmosis inversa, información sobre los tipos de membranas y reacciones, en los que hubiesen datos experimentales con los que contrastar, y en la adaptación de textos académicos para aplicarlo a este trabajo, se llevó a cabo una ardua investigación en la literatura como el material impreso de la biblioteca de la Universidad de Antioquia, las bases de datos Dialnet, Google Scholar, Google Books, Scielo, Base Search, biblioteca virtual miguel de cervantes, Redalyc, Biblioteca Digital mundial, biblioteca nacional de Colombia, E-Revistas, El EZB, Latindex, Pubindex, Wiley Open Access, Chemweb, Dane, LegalApp, Suin-juriscol, Scitech Connect, WorldWide Science, Publicaciones DYNA SL, ScienceDirect, Open Libra, páginas web de empresas.

En lo referente a la selección de modelos matemáticos se utilizó información publicada en artículos, principalmente del Journal of Membrane Science, informes y tesis, entre otros.

3.1. Flujo patrón de mezcla completa en el módulo de osmosis inversa.

La propiedad “más importante de las membranas es su capacidad para controlar la velocidad de permeado de diferentes especies químicas”. (baker, 2004). Para describir el mecanismo de permeado se utiliza de forma extensiva el modelo de solución-difusión. En este modelo las especies químicas se disuelven en el material de la membrana y seguidamente se difunden a través de ella a consecuencia de una gradiente de concentración. Las especies químicas se separan debido a diferencias en las solubilidades y las velocidades de difusión.

Una de las principales limitaciones de los procesos de separación mediante membranas es la acumulación del soluto o iones de la sal sobre su superficie. Este fenómeno se denomina polarización por concentración y se produce debido a que la membrana rechaza el soluto dejando pasar preferentemente el solvente a través de ella.

Como resultado de la polarización por concentración el volumen o flujo del producto permeado disminuye reduciendo el rendimiento del proceso. “El fenómeno de polarización por concentración está controlado por las propiedades del soluto y de las membranas, así como por la

hidrodinámica de flujo” (Lyster & Cohen, 2007). Para reducir los efectos de la polarización por concentración se recurre a diferentes técnicas como, por ejemplo: aumentar el flujo, colocar promotores de turbulencia en el canal de la alimentación, flujo en reversa, agitación, modificación de la estructura polimérica de la membrana.

Cuando se diseñan y operan módulos de osmosis inversa “es necesario conocer los efectos de la polarización por concentración para determinar las condiciones óptimas de operación, ayudar en el diseño de módulos con membranas de alto rendimiento, así como la interpretación de los estudios del comportamiento de las membranas” (Lyster & Cohen, 2007). Diferentes aproximaciones o teorías se utilizan para predecir el efecto de la polarización.

3.1.1. Modelos Analíticos

Los modelos analíticos varían en su complejidad dependiendo de la exactitud para describir el movimiento del fluido cuando esta circula sobre la superficie de la membrana

- a) **Teoría de la película.** Esta teoría proporciona un estimado rápido del grado de la polarización de concentración basado en el conocimiento del coeficiente de transferencia de masa en el lado de la alimentación y del flux de permeado. Este modelo supone: perfil de velocidades y concentración totalmente desarrollado, flux de permeado invariable en la dirección axial, y el efecto de la succión (permeado) en la superficie de la membrana no altera el perfil de velocidades axial. Se utilizan correlaciones teóricas o empíricas para estimar el coeficiente de transferencia de masa.
- b) **Teoría del soluto retenido.** Este modelo relaciona la velocidad del permeado con la concentración en la capa de polarización y determina la variación de la velocidad del permeado en dirección axial a lo largo de la superficie de la membrana mediante balance de materia del soluto.
- c) **Teoría de convección-difusión.** Este modelo, más complejo que las anteriores, considera que el fluido se mueve en dos direcciones y mediante el balance de

materia entre el soluto rechazado y el soluto que se mueve axialmente determina la variación de la concentración en ambas direcciones, axial y transversal.

El trabajo de S. Kim y E. Hoek (Suhan & Hoek, 2005) compara las predicciones teóricas de las tres teorías con datos experimentales. Sus resultados muestran que la capa de polarización de concentración varía a lo largo de la longitud axial de la membrana, y las predicciones del modelo de la película, siendo el más simple, es bastante próximo al modelo de convección-difusión.

3.1.2. *Modelos de fenómenos de transporte.*

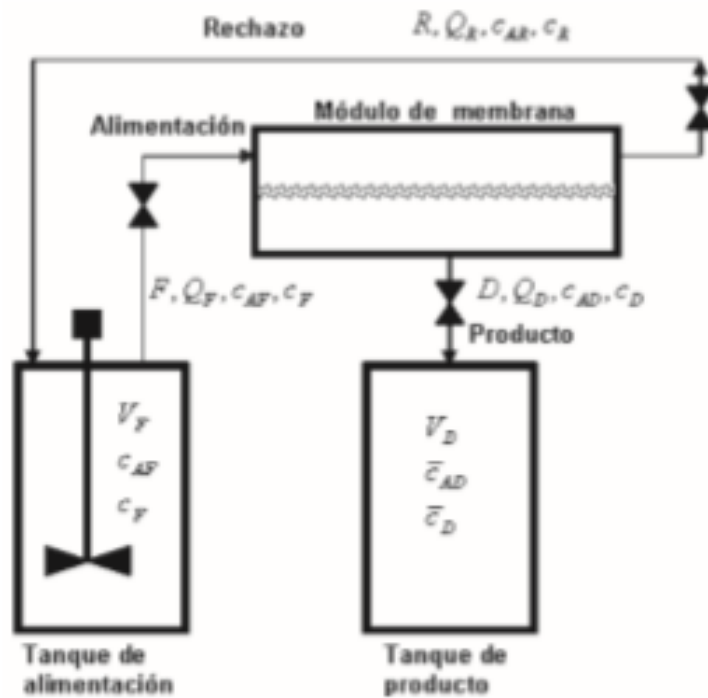
Estos modelos se fundamentan en principios fisicoquímicos para describir la hidrodinámica de flujo y el efecto de dispersión de las especies química. Actualmente se aprovecha el gran avance en los métodos computacionales para resolver de forma numérica las complejas ecuaciones que describen los perfiles de velocidad y concentración en más de una coordenada espacial, en la capa de polarización.

- a) **Balances de momento y transporte microscópico.** Una de las herramientas más poderosas desarrolladas para este fin es el denominado Computación Dinámica de Fluidos (CFD). Esta metodología analiza fenómenos transferencia de masa, calor y fenómenos asociados como reacciones químicas, adsorción e intercambio iónico aplicados a sistemas que trabajan con fluidos. Diferentes métodos numéricos se han implementado en diferentes softwares comerciales que se lista en la referencia (Su, 2007). Uno de los trabajos que sigue la línea CFD es el de E. Lyster y Y. Cohen, quienes escriben las ecuaciones diferenciales de momento y de transferencia de masa en dos dimensiones y resuelven “el sistema de ecuaciones de forma numérica mediante el método de elementos finitos con el programa COMSOL” (Lyster & Cohen, 2007). La enorme complejidad de la técnica CFD lo hace difícil acoplar sus resultados al diseño, control y optimización de los procesos de separación con membranas.

- b) **Balance de gradientes máximo.** En este análisis, variables tales como presión, velocidad y concentración se consideran que cambian solo en dirección axial de flujo y se desprecia los efectos de dispersión. L. Song y otros, utilizan esta técnica, mediante balances de materia determinan las velocidades en el canal del módulo y del permeado; y calculan la caída de presión en dirección de flujo utilizando un factor de fricción determinado experimentalmente (Song, Hong, Hu, Ong, & Ng, 2002).
- c) **Balances de materia y transporte macroscópico.** En este caso no se requiere detalles del proceso interno del módulo de osmosis. Las variables de proceso tales como velocidad y concentración dependen solo del tiempo y no de la coordenada espacial, se trabaja con información de las corrientes que entran y salen del módulo. Los trabajos de Slater y Jamal, (Slater, Zielinski, & Wendel, 1992) Khan, Kamil (Jamal, Khan, & Kamil, 2004) presentan la simulación dinámica del sistema de osmosis inversa basado en balances de materia combinados con las ecuaciones de transporte simplificados del módulo. Para la integración numérica utiliza el método de Runge- Kutta de 4to grado. Slater presenta resultados de la simulación numérica mediante balances macroscópicos y los compara con datos experimentales. Ambos trabajos, de Jamal y Slater, expresan el caudal de permeado en función de la concentración de la alimentación y no de la concentración de la corriente de rechazo porque suponen que son aproximadamente iguales.

El objetivo del presente trabajo es simular el sistema osmosis inversa mediante modelos dinámicos de balances de materia combinados con el modelo de transporte solución-difusión para determinar los efectos de la concentración, la presión y el área en el comportamiento de este proceso. La configuración que se muestra en la Figura 12 es el sistema de osmosis inversa seleccionado para el desarrollo del modelo matemático.

Figura 12 Esquema del sistema de osmosis inversa que muestra el tanque de alimentación, de permeado y el módulo



Nota Fuente [(Slater, Zielinski, & Wendel, 1992) (Jamal, Khan, & Kamil, 2004)]

El tanque de alimentación se carga con solvente puro (B: agua), mientras el sistema de agitación está operando. El líquido es bombeado hacia el módulo y se deja circular por un periodo de tiempo (t_b) hasta conseguir condiciones de flujo estacionario. El flujo de permeado o producto depende de la permeabilidad de la membrana al solvente, y de la caída de presión transmembrana. El volumen de permeado recogido es QDt_b .

Al tiempo $t=0$ se agrega una cantidad de soluto (A: sal) al tanque de alimentación. Debido a la agitación turbulenta, la concentración de soluto en el tanque es uniforme e igual a c_{AF0} , y la concentración total es c_{F0} . La corriente de alimentación tiene las mismas concentraciones que del tanque. A medida que transcurre el proceso, $t>0$, el volumen del producto se incrementa y el volumen del tanque de alimentación disminuye.

La concentración de soluto en el tanque de alimentación se incrementa en el tiempo debido a la recirculación de la corriente de rechazo. El soluto que pasa a través de la membrana se mezcla en el tanque de producto y la concentración, en cualquier instante, es un valor promedio entre el tiempo $t=0$ y el instante t .

Así el sistema opera en forma sucesiva de incrementos de la concentración de soluto en el tanque de alimentación. La descripción anterior difiere de la presentada en las referencias de Jamal y Slater donde el volumen de permeado en el tanque es cero al tiempo $t=0$. El análisis del sistema de osmosis inversa se realiza individualmente en cada unidad: tanque de permeado y de alimentación, y finalmente en el módulo.

3.1.3. *Balances de materia*

3.1.3.1. **Tanque de permeado o producto**

Balance de soluto y solvente, ecuación 1:

$$\frac{d(V_D \bar{c}_D)}{dt} - D = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

El flujo molar se relaciona con el flujo volumétrico, acorde a la ecuación 2:

$$D = c_D Q_D \quad (\text{Ec. 2})$$

Si consideramos que las soluciones son diluidas, podemos aproximar (ecuación 3):

$$\bar{c}_D \cong c_D \quad (\text{Ec. 3})$$

Reemplazando las ecuaciones 3 y 2 en la ecuación 1 obtenemos la ecuación 4:

$$\frac{dV_D}{dt} = Q_D \quad (\text{Ec. 4})$$

Balance de soluto, ecuación 5:

$$\frac{d(V_D \bar{c}_{AD})}{dt} - \frac{D}{c_D} c_{AD} = 0 \quad (\text{Ec. 5})$$

Expandimos el término de la derivada y obtenemos

$$\bar{c}_{AD} \frac{dV_D}{dt} + V_D \frac{d\bar{c}_{AD}}{dt} - \frac{D}{c_D} c_{AD} = 0$$

Si reemplazamos las ecuaciones 2 y 4 en la ecuación anterior obtenemos la ecuación 6:

$$\frac{dc_{AD}}{dt} = \frac{Q_D}{V_D} (c_{AD} - c_{AD}) \quad (\text{Ec. 6})$$

3.1.3.2. Tanque de alimentación

Balance de soluto y solvente, ecuación 7

$$\frac{d(V_F c_F)}{dx} + F - R = 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

Los flujos volumétricos se relacionan con los flujos molares con la ecuación 8:

$$F = c_F Q_F \quad R = c_R Q_R \quad (\text{Ec. 8})$$

Para soluciones diluidas suponemos que:

$$c_F \cong c_R \quad (\text{Ec. 9})$$

Reemplazando las ecuaciones 9 y 8 en la ecuación 7, se obtiene la ecuación 10:

$$\frac{dV_F}{dt} = Q_R - Q_F \quad (\text{Ec. 10})$$

Balance de soluto, ecuación 11:

$$\frac{d(V_F c_{AF})}{dt} * \frac{F}{c_F} c_{AF} - \frac{R}{c_R} c_{AR} = 0 \quad (\text{Ec. 11})$$

Si expandimos el término de la derivada obtenemos:

$$V_F \frac{dc_{AF}}{dt} + c_{AF} \frac{dV_F}{dt} + \frac{F}{c_F} c_{AF} - \frac{R}{c_R} c_{AR} = 0$$

Reemplazamos las ecuaciones 8 y 10 en la ecuación anterior se obtiene la ecuación 12:

$$\frac{dc_{AF}}{dt} = \frac{Q_R}{V_F} (c_{AR} - c_{AF}) \quad (\text{Ec. 12})$$

3.1.3.3. Módulo de osmosis inversa

Suponemos que el volumen del módulo es pequeño comparado al volumen del tanque de alimentación y por lo tanto no hay acumulación de materiales en ella. Si bien el fenómeno de polarización es un proceso de acumulación de soluto, se considera que el crecimiento de la capa de acumulación sobre la superficie de la membrana ocurre en los primeros instantes y es rápido.

Una vez establecida la capa de soluto esta mantiene un espesor invariable en el tiempo a lo largo de la dirección del flujo así mismo, la concentración de soluto en la capa de polarización permanece constante. El trabajo de simulación numérica de Lyster-Cohen para un módulo de canal rectangular muestra que la concentración de soluto se incrementa, en estado estacionario, desde la entrada al canal hasta el extremo de salida.

Balance de soluto y solvente, ecuación 13

$$F = R + D \quad (\text{Ec. 13})$$

Balance de soluto, ecuación 14

$$\frac{F}{c_F} c_{AF} = \frac{R}{c_R} c_{AR} + \frac{D}{c_D} c_{AD} \quad (\text{Ec. 14})$$

Si reemplazamos los flujos volumétricos definidos mediante las ecuaciones 2 y 8; y consideramos soluciones diluidas

$$c_F \cong c_R \cong c_D$$

Las ecuaciones 13 y 14 se transforman en las ecuaciones 15 y 16, respectivamente:

$$Q_F = Q_R + Q_D \quad (\text{Ec. 15})$$

$$Q_F c_{AF} = Q_R c_{AR} + Q_D c_{AD} \quad (\text{Ec. 16})$$

Combinando las ecuaciones 15 y 16 se llega a la ecuación 17:

$$Q_R (c_{AR} - c_{AF}) = Q_D (c_{AF} - c_{AD}) \quad (\text{Ec. 17})$$

3.1.4. Balances de materia combinados

De la ecuación 15: $Q_R - Q_F = -Q_D$, reemplazando en la ecuación 10 obtenemos la ecuación 18:

$$\frac{dV_F}{dt} = -Q_D \quad (\text{Ec. 18})$$

La ecuación 18 se resuelve con la ecuación 4:

$$\frac{dV_D}{dt} = Q_D \quad (\text{Ec. 4})$$

Utilizando las condiciones iniciales, ecuación 19:

$$t = 0 \quad V_F = V_{F0} \quad V_D = V_{D0} \quad (\text{Ec. 19})$$

El resultado de la integración es la ecuación 20:

$$V_F = (V_{F0} + V_{D0}) - V_D \quad (\text{Ec. 20})$$

Por otro lado, si reemplazamos las ecuaciones 17 y 20 en la ecuación 12 se obtiene después de arreglar la ecuación 21:

$$\frac{dc_{AF}}{dt} = \left[\frac{Q_D c_{AF}}{(V_{F0} + V_{D0}) - V_D} \right] \left(\frac{c_{AF} - c_{AD}}{c_{AF}} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

Las ecuaciones 4, 6 y 21 forman el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que simulan el comportamiento dinámico del sistema de osmosis inversa. Para resolver estas ecuaciones se necesita una expresión para el permeado, Q_D , el mismo que está determinado por el modelo que se use para describir el transporte de las especies químicas a través de la membrana. En este trabajo aplicamos el modelo de la solución-difusión.

3.1.5. Modelo de transporte solución-difusión

Este modelo se caracteriza por un mecanismo simultáneo de disolución y difusiones en la membrana, ambos, dependientes de las características del material del que están hechas las membranas. El mecanismo del modelo es:

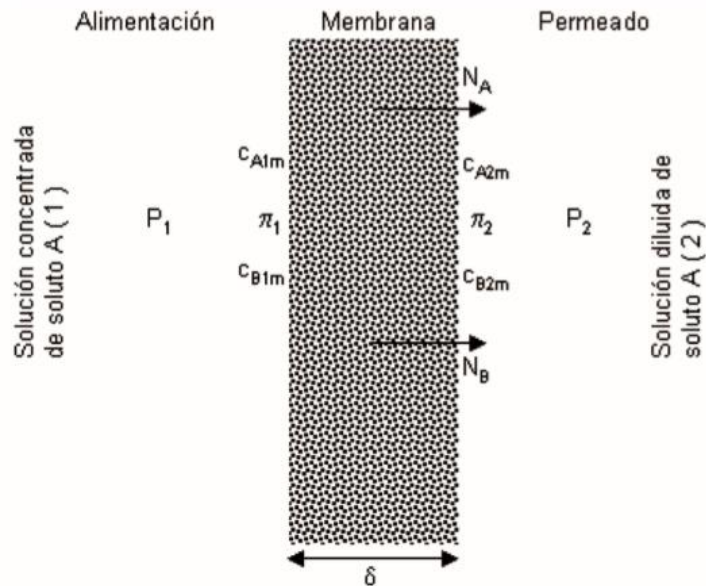
- a. Las especies químicas son adsorbidas sobre la superficie de la membrana desde el fluido adherida a ella.
- b. Las especies químicas adsorbidas se difunden a través de la membrana en virtud de una gradiente de concentración.
- c. Las especies químicas que llegaron a la cara opuesta de la membrana son desorbidos desde la superficie de la membrana hacia la fase fluida.

El modelo supone:

- i. En la interfase fluido-membrana se establece rápidamente un estado de equilibrio en la distribución de las especies químicas, es decir la velocidad de adsorción y desorción son más rápidas que la velocidad difusión en la membrana. Las concentraciones pueden relacionarse mediante la ley de Henry.
- ii. En el interior de la membrana las especies se difunden a consecuencia de su gradiente de concentración. La velocidad de difusión está determinada por la ley de Fick y es proporcional a un coeficiente de difusión efectivo.
- iii. La solución de alta presión (alimentación) transmite su presión al interior de la membrana de manera uniforme, y se propaga de forma constante hasta alcanzar la superficie de la membrana en contacto con la solución de baja presión (permeado) donde cae bruscamente hasta igualarse a la presión menor.
- iv. No existe acumulación de especies químicas en la membrana.

La figura 13 muestra un esquema con las variables que se utilizan para expresar las ecuaciones de transporte según el modelo de solución-difusión.

Figura 13 Esquema que muestra la difusión de soluto y solvente a través de la membrana



Nota Fuente [(Slater, Zielinski, & Wendel, 1992) (Jamal, Khan, & Kamil, 2004)]

Las ecuaciones que determinan las velocidades de transporte en función de las concentraciones en fase fluida son:

Flux molar de soluto, ecuación 22:

$$N_A = \kappa_A (c_{A1m} - c_{A2m}) \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde la constante de permeabilidad al soluto está dada por el cociente entre permeabilidad y espesor de membrana, ecuación 23:

$$\kappa_A = \frac{P_A}{\delta} \quad (\text{Ec. 23})$$

Flux molar de solvente, ecuación 24:

$$N_B = \kappa_B (\Delta P - \Delta \pi) \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

La caída de presión transmembrana es, acorde a la ecuación 25:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (\text{Ec. 25})$$

Las presiones osmóticas dependen de las concentraciones del soluto en cada lado de la membrana, ecuación 26:

$$\Delta\pi = \pi_1(c_{A1m}) - \pi_2(c_{A2m}) \quad (\text{Ec. 26})$$

La constante de permeabilidad al solvente está dada por el cociente de la permeabilidad al espesor a corregido por la relación entre el volumen molar y la concentración del solvente, la temperatura absoluta y la constante universal de los gases (Ecuación 27):

$$\kappa_B = \frac{P_B v_B c_{B1m}}{\delta RT} \quad (\text{Ec. 27})$$

La relación de flux molares permite demostrar la relación (ecuación 28):

$$\frac{N_A}{c_{A2m}} = \frac{N_B}{c_{B2m}} \quad (\text{Ec. 28})$$

La ecuación 26 permite establecer que un aumento de la presión de alimentación disminuye la concentración de soluto en el lado del permeado, lo cual mejora la calidad del agua en los sistemas de desalinización. En cambio, un aumento de la concentración en el lado de alimentación aumenta la presión osmótica π_1 , y como consecuencia aumenta la concentración de soluto en el permeado.

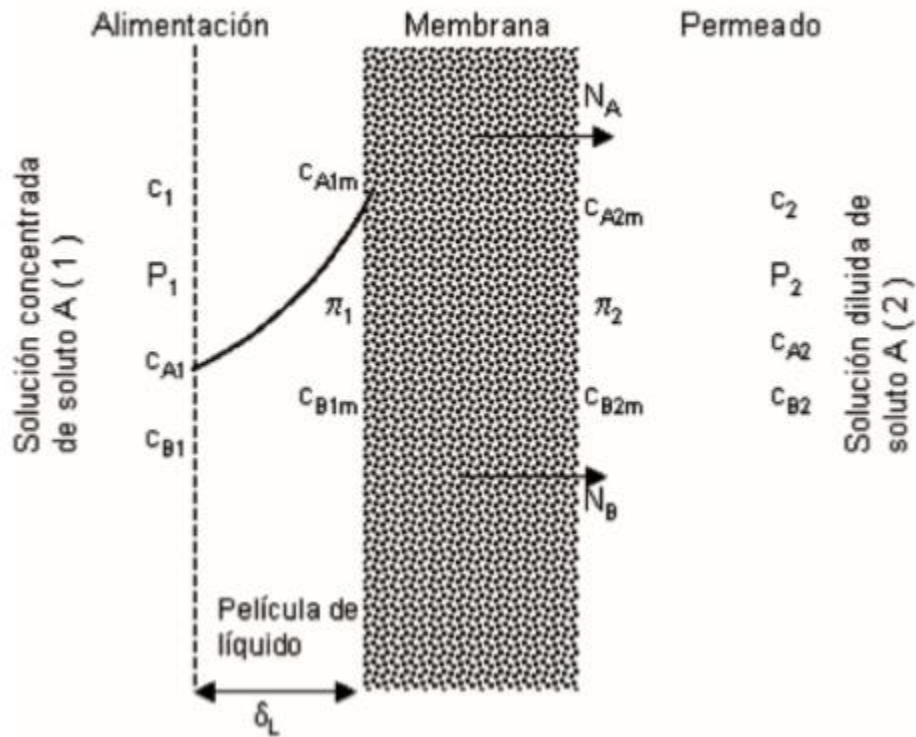
3.1.6. El efecto de la polarización por concentración

El soluto tiende acumularse sobre la superficie de la membrana si esta deja pasar más fácilmente al solvente. La concentración del soluto se incrementa en el tiempo creando una gradiente de concentración que origina un flux de retorno desde la superficie de la membrana hacia la masa principal de la solución.

En estado estacionario, se alcanza un valor constante para la concentración del soluto sobre la superficie de la membrana y así mismo para el flux neto del soluto, que es el mismo que atraviesa la película de líquido como el que atraviesa la membrana. Se considera que en el lado de la solución concentrada (alimentación) el efecto de la polarización por concentración es más importante que en el lado de la solución diluida (permeado).

La figura 14 muestra un esquema del modelo de película estancada sobre la superficie de la membrana.

Figura 14 Esquema de los procesos de difusión en la membrana y la película de líquido. Se muestra la caída de concentración en el lado de solución concentrada.



Nota Fuente [(Slater, Zielinski, & Wendel, 1992) (Jamal, Khan, & Kamil, 2004)]

Debido a la acumulación de soluto en la superficie de la membrana, se desarrolla un gradiente de concentración en la solución de alimentación que produce difusión molecular hacia el seno de la solución, reduciendo el flujo de solvente que llega a la membrana.

El incremento de la presión osmótica π_1 debido al aumento de la concentración también reduce el flujo de solvente. En estado estacionario, el flujo neto de A en la película de fluido está dado por la primera ley de Fick, ecuación 29:

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{c_A}{c_1} - D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (\text{Ec. 29})$$

Integrando la ecuación anterior se demuestra la ecuación 30:

$$N_A + N_B = \frac{D_{AB}}{\delta_L} c_1 \ln \left[\frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{c_{A1m}}{c_1}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{c_{A1}}{c_1}} \right] \quad (\text{Ec. 30})$$

Pero en el lado del permeado se puede escribir la relación, ecuación 31:

$$\frac{N_A}{N_A+N_B} = \frac{c_{A2m}}{c_2} \quad (\text{Ec. 31})$$

Reemplazando en la ecuación anterior obtenemos la ecuación 32:

$$N_A + N_B = \kappa_L c_1 \ln \left[\frac{c_{A1m} - f c_{A2m}}{c_{A1} - f c_{A2m}} \right] \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

El coeficiente de transferencia se define como:

$$\kappa_L = \frac{D_{AB}}{\delta_L} \quad (\text{Ec. 33})$$

La relación de concentraciones totales, ecuación 34:

$$f = \frac{c_1}{c_2} \quad (\text{Ec. 34})$$

En muchos casos prácticos, para soluciones diluidas f se aproxima a 1

Definimos:

La velocidad de permeado, ecuación 35:

$$V_p = \frac{N_A+N_B}{c_2} \quad (\text{Ec. 35})$$

Y el coeficiente de rechazo ecuación 36

$$r = 1 - \frac{c_{A2m}}{c_{A1m}} \quad (\text{Ec. 36})$$

Si las ecuaciones 35 y 36 se reemplazan en 36 se obtiene la ecuación 37:

$$M_P = \frac{t}{1+f(t-1)(1-r)} \quad (37)$$

Donde:

M_P es el módulo de polarización ecuación 38

$$M_P = \frac{c_{A1m}}{c_{A1}} \quad (\text{Ec. 38})$$

Y:

$$t = \exp \left[\frac{V_p}{f \kappa_L} \right] \quad (\text{ec. 39})$$

Para régimen turbulento el coeficiente de transferencia tiende a infinito y el valor de t se aproxima a 1, es decir, el módulo de polarización se hace 1 y:

$$c_{A1m} \cong c_{A1}$$

Al reemplazar la ecuación 38 en la ecuación 29 obtenemos la concentración del soluto sobre la pared de la membrana en el lado de permeado, en función de la composición del soluto en el lado de alimentación la:

$$c_{A2m} \cong c_{A2}$$

$$c_{B2m} \cong c_{B2} \quad (40)$$

Y finalmente la ecuación 41 representa la concentración a la salida en el permeado como:

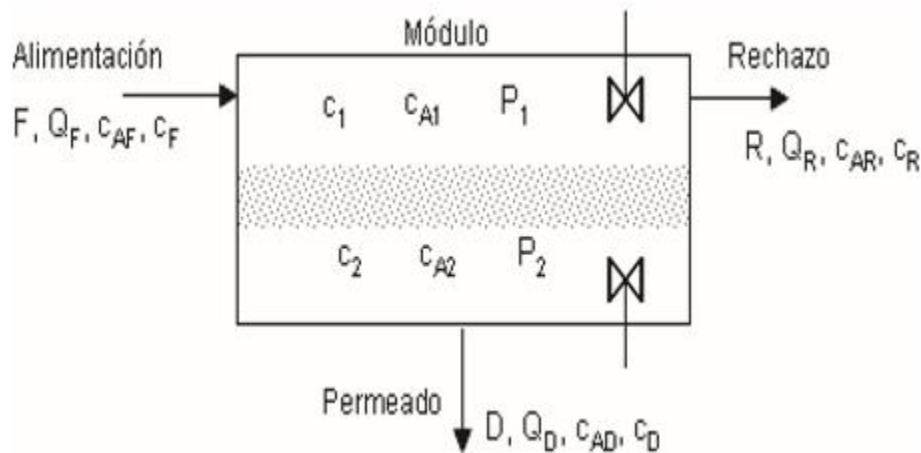
$$c_{A2} \cong \frac{M_P c_{A1}}{1 + k[\Delta P - \pi_1(M_P c_{A1}) + \pi_2(c_{A2})]} \quad (44)$$

3.1.7. Módulo de mezcla completa

El módulo de mezcla completa es un patrón de flujo idealizado que supone:

- Flujo pistón de los fluidos que circulan por la cámara de alimentación o rechazo, y por la cámara de permeado.
- Composición uniforme independiente de la geometría de la cámara, en ambos, alimentación y permeado.
- La composición de soluto en la corriente de rechazo es igual a la composición de soluto en el interior de la cámara de alimentación o rechazo.
- La composición de soluto en la corriente de permeado es igual a la composición de soluto en la cámara de permeado.

Figura 15 Esquema del módulo de osmosis inversa: Las concentraciones c_{A1} y c_{A2} pueden variar en dirección de flujo y no son iguales a las concentraciones de rechazo y permeado, respectivamente



Nota Fuente [(Slater, Zielinski, & Wendel, 1992) (Jamal, Khan, & Kamil, 2004)]

La figura 15 muestra las condiciones de las corrientes para el modelo de mezcla completa.

Las suposiciones mencionadas expresan que:

$$M_p \cong 1$$

$$c_{AD} \cong c_{A2}$$

$$c_{AR} \cong c_{A1} \quad (\text{Ec. 45})$$

Luego, reemplazando estas condiciones en la ecuación 44 se genera la ecuación 46:

$$c_{AD} = \frac{c_{AR}}{1 + \kappa[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]} \quad (\text{Ec. 46})$$

La ecuación 46 no permite un cálculo directo de alguna de las composiciones debido a que las presiones osmóticas dependen de ellas.

Por otro lado, si definimos el corte como la relación de flujos molares de permeado a alimentación, el mismo que puede expresarse en termino de flujos volumétricos para soluciones diluidas, como se presenta en la ecuación 47:

$$\theta = \frac{D}{F} = \frac{c_D Q_D}{c_F Q_F} \cong \frac{Q_D}{Q_F} \quad (\text{Ec. 47})$$

Al reemplazar la ecuación 47 en la ecuación 16 de balance de materia, obtenemos:

$$c_{AR} = \frac{c_{AF} - \theta c_{AD}}{1 - \theta} \quad (\text{Ec. 48})$$

Combinando las ecuaciones 47 y 48 obtenemos:

$$c_{AD} = \frac{c_{AF}}{1 + \kappa(1 - \theta)[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]} \quad (\text{Ec. 49})$$

Y reemplazando la ecuación 49 en la 48:

$$c_{AR} = \frac{c_{AF}\{1 + \kappa[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]\}}{1 + \kappa(1 - \theta)[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]} \quad (\text{Ec. 50})$$

Finalmente, el flujo volumétrico de permeado se relaciona con el flux molar del solvente y el área de la membrana (ecuación 51):

$$N_A A_m = \frac{c_{BD}}{c_D} D = c_{BD} Q_D \cong c_D Q_D \quad (\text{Ec. 51})$$

Reemplazando el flux molar de solvente dado por la ecuación 24, y despejando el caudal obtenemos:

$$Q_D = \frac{\kappa_B A_m}{c_D} [\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})] \quad (\text{Ec. 52})$$

Las ecuaciones 49, 50 y 52 representan las relaciones combinadas del balance de materia en el módulo, suponiendo mezcla completa, con el modelo de transporte solución-difusión.

3.1.8. Metodología de solución de las ecuaciones diferenciales

El sistema de ecuaciones diferenciales no lineales está constituido por:

$$\frac{dV_D}{dt} = Q_D \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\frac{dc_{AD}}{dt} = \frac{Q_D}{V_D} (c_{AD} - c_{AD}) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\frac{dc_{AF}}{dt} = \left[\frac{Q_D c_{AF}}{(V_{F0} + V_{D0}) - V_D} \right] \left(\frac{c_{AF} - c_{AD}}{c_{AF}} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

$$\theta = \frac{D}{F} = \frac{c_D Q_D}{c_F Q_F} \cong \frac{Q_D}{Q_F} \quad (\text{Ec. 47})$$

$$c_{AD} = \frac{c_{AF}}{1 + \kappa(1 - \theta)[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]} \quad (\text{Ec. 49})$$

$$c_{AR} = \frac{c_{AF}\{1 + \kappa[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]\}}{1 + \kappa(1 - \theta)[\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})]} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$Q_D = \frac{\kappa_B A m}{c_D} [\Delta P - \pi_1(c_{AR}) + \pi_2(c_{AD})] \quad (\text{Ec. 52})$$

Presión osmótica en función de la concentración, Ecuación 53

$$\pi = 0.04572c - 1.797 \times 10^{-6} c^2 + 4.631 \times 10^{-9} c^3 \quad (\text{Ec. 53})$$

Condiciones iniciales:

$$t = 1, V_D = V_{D0}, V_F = V_{F0}, c_{AF} = c_{AF0}, c_{AR} = 0, c_{AD} = 0, c_{AD} = 0$$

En esta primera parte del trabajo, se supone módulo de mezcla completa, es decir cuando el módulo de polarización es 1.

El sistema planteado constituye un problema de valor inicial, cuya solución aproximada se realiza mediante técnicas numéricas de iteración. Una familia importante de estas técnicas son los métodos de Runge-Kutta [(J.D., 1991), (Butcher, 2008)]. Runge-Kutta 4^{to} grado (RK4) y Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) (Butcher, 2008).

El primero integra las ecuaciones diferenciales en pasos de tamaño iguales, por lo tanto, el número total de pasos tiende a ser muy grande. En el segundo método, el tamaño del paso puede aumentar o disminuir de acuerdo con un error preestablecido para las variables dependientes.

3.2.Método con solución practica

3.2.1. Caudal de alimento Q_F (m^3/h)

Corresponde a la cantidad de agua producto de las operaciones la industria textil que se desea sea ingresar al equipo de ósmosis inversa para mejorar la calidad del agua.

3.2.2. Caudal de rechazo Q_D (m^3/h)

Corresponde al agua de la alimentación que no atraviesa por la membrana, pero que se dirige en otra dirección del equipo, limpiando el agua continuamente y extrayendo los sólidos inorgánicos y orgánicos para drenarlos.

3.2.3. Caudal de permeado Q_P (m^3/h).

Se refiere a la cierta cantidad de agua que atraviesa la membrana quedando libre queda libre de sólidos disueltos (minerales, materia orgánica, etc. y de microorganismos (virus, bacterias, etc.).

3.2.4. pH

Coefficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

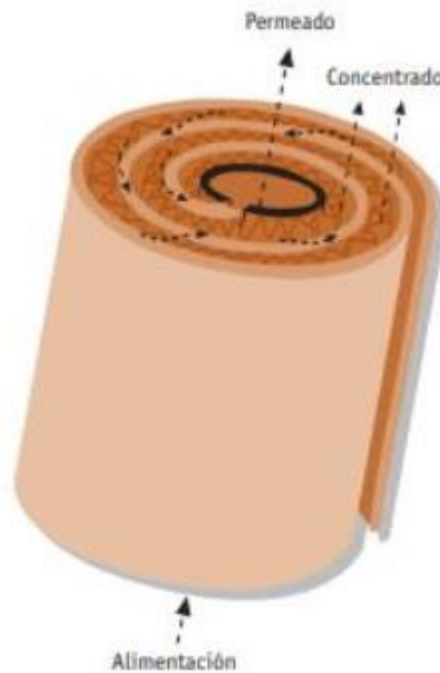
3.2.5. Temperatura del agua que ingresa al sistema ($^{\circ}C$)

Parámetro físico que permite medir las sensaciones de calor y frío.

3.2.6. Membranas

Fibras microporos que rechazan las impurezas y que impide el paso del agua. Las membranas rechazan las bacterias y 85%-95% de sólidos inorgánicos. La selección de las membranas dependerá del tipo de agua que se quiere tratar, la composición química y la cantidad de permeado que se desea obtener al pasar el agua concentrada por el proceso de ósmosis inversa.

Figura 16 Membrana



Nota. Fuente (Rodriguez, y otros, 2021)

Número de membranas requeridas (ecuación 54)

$$\#Membranas (N) = \frac{\text{Caudal de permeado } (Q_P)}{\text{Variación del Flujo } (J) * \text{Área } (A_m)} \quad (\text{Ec. 54})$$

Donde el flujo de variación de acuerdo a la ecuación 55 es:

$$\text{Variación del Flujo } (J) = \frac{\text{Caudal nominal } (Q)}{\text{Área } (A_m)} \quad (\text{Ec. 55})$$

Incorporando la ecuación 55 a la 54,

$$\#Membranas (N) = \frac{\text{Caudal de permeado } (Q_P)}{\frac{\text{Caudal nominal } (Q)}{\text{Área } (A_m)} * \text{Área } (A_m)}$$

Convirtiéndose así en la ecuación 56:

$$\#Membranas (N) = \frac{\text{Caudal de permeado } (Q_P)}{\text{Caudal nominal } (Q)} \quad (\text{Ec. 56})$$

3.2.7. Tubos de presión

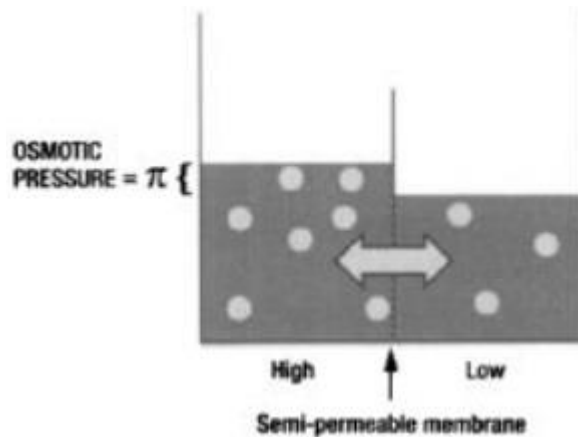
Recipientes cilíndricos de alta presión que permiten la incorporación de las membranas de ósmosis inversa, donde sucede el proceso de separación de las concentraciones (ecuación 57).

$$\#Tubos\ Requeridos = \frac{\#Membranas\ (N)}{\#Membranas\ por\ Tubo} \quad (Ec. 57)$$

3.2.8. Presión osmótica

Fenómeno que se presenta cuando se aplica una presión hidrostática necesaria para detener el flujo neto de agua a través de una membrana semipermeable que separa soluciones de composición diferente.

Figura 17 Presión osmótica



Nota. Fuente (Kucera, 2010)

La presión osmótica puede ser calculada de acuerdo a la ecuación 58:

$$\pi = 0,08308 * \Phi * (t + 273,16) * \sum m_i \quad (Ec. 58)$$

La molalidad, m , se puede calcular acorde a la ecuación 59:

$$m = \frac{c_i}{1000 * M * \frac{10^6 - STD}{10^6}} \quad (Ec. 59)$$

Donde M , es el peso molecular de los iones acorde a la tabla periódica y STD son los sólidos suspendidos totales

Al realizar un balance de masa se tiene que la composición del permeado se puede calcular de acuerdo con la ecuación 60:

$$Cp = \frac{Ca * QF - Cr * QD}{Qp} \quad (\text{Ec. 60})$$

Donde el coeficiente de rechazo, Cr , se puede calcular mediante la ecuación 61:

$$Cr = \frac{\%Rechazo \ de \ sales * Ca}{1 - Eficiencia} \quad (\text{Ec. 61})$$

Por su lado el coeficiente osmótico Φ , puede ser calculado mediante la ecuación 62:

$$\Phi = 1 - \frac{S}{3,375 * I} * \left(A - 2 * \ln(A) - \frac{1}{A} \right) + B * I' + C * (I')^2 \quad (\text{Ec. 62})$$

Los parámetros en la ecuación 62, puede ser calculados con las ecuaciones 63 a 70:

$$S = 1,12202 * \left(\frac{\sum m * (Z)^2}{\sum m} \right) * \left(\frac{23375,556}{D * (T + 273,16)} \right)^{\frac{3}{2}} * (\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 63})$$

ρ , la densidad se calcula de acuerdo a la ecuación 64 a la T de operación:

$$\rho = 1,00157 - 1,5609610^{-4} * T - 2,6949110^{-6} * T^2 \quad (\text{Ec. 64})$$

$$I = \frac{1}{2} * \sum m * Z^2 \quad (\text{Ec. 65})$$

Con Z como la valencia de los iones

$$I' = \frac{1}{2} * \sum m \quad (\text{Ec.66})$$

$$A = 1 + 1,5 * (I)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 67})$$

$$B = 6,72817 - \frac{348,662}{T + 273,16} - 0,971307 * \ln(T + 273,16) \quad (\text{Ec. 68})$$

$$C = \frac{40,5016}{T + 273,16} - 0,721404 * T + 0,103915 * \ln(T + 273,16) \quad (\text{Ec. 69})$$

$$D = 273,76 + \frac{5321}{T + 273,16} - 0,9297 * (T + 273,16) + 0,001417 * (T + 273,16)^2 - 2,400680953 * 10^{-6} * (T + 273,16) \quad (\text{Ec. 70})$$

4. Resultados

Para realizar el diseño del prototipo de ósmosis inversa fue necesario desarrollarlo a través de información recolectada de la literatura, mostrada en la Tabla 4 Caracterización fisicoquímica del agua industrial se requiere calcular la presión en la red del laboratorio. En esta medición realizada en el laboratorio de mecánica de fluidos (Rodriguez & Dominguez, 2018) se conectó un manómetro a la salida de una cañería en un momento en el que no había agua siendo usada en el laboratorio, para medir la presión del fluido en la tubería. La presión manométrica medida fue de 18 psi (1,24 bar ó 124,1kPa). De igual manera se calculó que el caudal máximo proporcionado por la red

$$Q_{max\ red} = 10,826 \frac{Litros}{min} = 2,86 \frac{Galón}{min} = 171,6 \frac{Galón}{h}$$

Necesitamos entonces la presión absoluta de agua al ingreso al equipo

$$P_{abs\ ingreso} = P_{man} + P_{atm}$$

$$P_{abs\ ingreso} = 18\ psi + 14,7\ psi = 32,7\ psi = 225,459kPa = 2,254586\ bar = 2,2251\ atm$$

Para efectos prácticos se tendrá en cuenta el consumo promedio de 429 m³ de agua al mes y efectos de cálculos el 5% del mismo

$$429 \frac{m^3}{mes} * \frac{1mes}{30\ dia} * \frac{1\ dia}{24h} * \frac{5}{100} = 0.0297916 \frac{m^3}{h}$$

ó:

$$0.0297916 \frac{m^3}{h} * \frac{1\ Galón}{0.00378541m^3} = 7,87 \frac{Galón}{h}$$

En el diámetro de las tuberías se tiene en cuenta la necesidad de mantener una presión constante dentro de cada tanque del pre-filtrado del proceso de osmosis inversa, además se debe tener en cuenta que el proceso normal de filtración del agua se da por medio de un flujo laminar con presión constante, y a través de unos colectores que tiene la función de distribuir el agua equánimemente por toda el área dentro de los tanques, y en las etapas de retro lavado, los tanques necesitan un flujo turbulento, que permita agitar y eliminar las sustancias removidas del agua en proceso normal, lo cual demanda un flujo mayor y por ende un diámetro mayor al del proceso normal. Por tanto, se tiene que la tubería usada es de ½ pulgada y diámetro nominal 13, caudal nominal 1.5.

Como ejemplo operacional del equipo y de la membrana se obtuvo información en el trabajo de grado realizado por parte de José Alberto Moreno Benavides para la empresa Dober Osmotec de Colombia (Moreno Benavides, 2011), tabla 6.

Tabla 6 Información operativa del equipo

Información operativa del equipo	
pH	3 a 9
Temperatura °C	20 a 30
Diferencial de presión osmótica (ΔP)	18,7606 bar
Capacidad de membranas/tubo	5 a 7
%Rechazo Sales	95-98
%Rechazo, Cr	92
Máxima presión de Operación	83,0865 bar
%Eficiencia	45

Nota. Adaptado de (Moreno Benavides, 2011)

Como el agua sin tratar contiene varios elementos se recurre a la literatura para conocer el comportamiento de dichos elementos en la membrana y se reportan en la Tabla 7.

Tabla 7 Rechazo de elementos por membranas de osmosis inversa

Elemento		Membrana	Elemento		Membrana
Sodio	Na ⁺	94-96	Bario	Ba ⁺⁺	92-95
Calcio	Ca ⁺⁺	96-98	Cloruro	Cl	94-95
Magnesio	Mg ⁺⁺	96-98	Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	95-96
Potasio	K ⁺	94-96	Sulfato	SO ₄ ⁻²	95
Hierro	Fe ⁺⁺	98-99	Nitrato	NO ₃ ⁻	85-95
Manganeso	Mn ⁺⁺	98-99	Fluoruro	F	94-96
Aluminio	Al ⁺	99	Silicato	SiO ₂ ⁻²	80-95
Amonio	NH ₄ ⁺	88-95	Fosforo	PO ₄ ⁻³	99
Cobre	Cu ⁺	98-99	Bromuro	Br	94-96
Niquel	Ni ⁺⁺	98-99	Borato	B ₄ O ⁻²	35-70
Zinc	Zn ⁺	96-99	Cromato	CrO ₄ ⁻²	90-98
Estroncio	Sr ⁺⁺	96-99	Cianuro	CN ⁻⁴	90-95
Cadmio	Cd ⁺	96-98	Sulfito	SO ₃ ⁻²	98-99
Plata	Ag ⁺	94-96	Tiosulfato	S ₂ O ₃ ⁻²	99
Mercurio	Hg ⁺⁺	96-98	Ferrocianuro	Fe(CN)S ⁻³	99
Arsénico	As ⁺⁺⁺	90-95			

Fuente. (Vergara, 1976)

Resolviendo el método práctico se tiene:

Tabla 8 Caudal de entrada, Caudal de rechazo, Caudal de permeado.

Variables	m ³ /h	L/h
Caudal de entrada al equipo (Q _F)	0,0297916	29,7916
Caudal de rechazo (Q _R)	0,01638538	16,38538
Caudal de permeado (Q _P)	0,01340622	13,40622

Tabla 9 Temperatura, pH

T, °C	21
pH	8

En los procesos de ósmosis inversa se utilizan membranas densas, anisótropas, en configuraciones del tipo módulos enrollados en espiral, de 20 cm – 30 cm de diámetro y entre 100 - 150 cm de largo; que se disponen en número de 5 – 7 en el interior de carcasas de plástico reforzadas con fibra de vidrio. También se utilizan membranas del tipo fibra hueca, de 100 mm de diámetro, dispuestas en módulos que contienen 1000 unidades, tabla 10.

Tabla 10 Características de membranas

Material	Tipo membrana	Coefficiente de rechazo (%)	Presiones de trabajo (bar)
CA Acetato de celulosa (40% de acetato)	Loeb- Sourirajan	95-98	50-90
Poliamidas aromáticas	Loeb- Sourirajan	>99,5	-
NTR (nanofiltración) Polisulfonas / alcohol polivinílico	Loeb- Sourirajan	20-80	3,5-14
NS100 Polietilenamina / tolueno	Composite	>99	100
FT-30 /SW-30	Composite	99,3-99,5	55
Fenilendiamina / cloruro de trimesolil	--	>99	15

Nota Fuente. (Rodríguez, y otros, 2021)

Se usará la membrana de Acetato de Celulosa ya que tienen alta permeabilidad y selectividad de sustancias, se obtiene a bajo costo y la absorción de moléculas de proteínas es baja. Estas membranas se consideran ideales en procesos de filtración tanto de soluciones acuosas como medios de cultivo y sueros, debido a que mejoran el flujo del solvente y rechazan sales haciendo las soluciones cada vez más estériles. Con módulos enrollados de 20 cm de diámetro y 100 cm de largo para 5 membranas o de 150 cm de largo para 7 membranas.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que las bacterias pueden afectar a la membrana, por lo que es recomendable que el agua que será purificada en ellas pase por un pre-tratamiento con cloro para evitar los daños por las bacterias. En este caso en particular el agua cruda viene con exceso de cloro por tal motivo no es un proceso a tener en cuenta.

Tabla 11 # Membranas y # tubos de presión

# Membranas (N)=	8,93748	10
# Tubos de presión=	1,787496	2

El principio de ósmosis inversa se da en el equipo sólo si se alcanza la presión requerida para la separación de los compuestos presentes en el agua, y se determina el coeficiente osmótico, el cual es un valor que mide la desviación del comportamiento de un disolvente respecto de su comportamiento en condiciones ideales, según la ley de Raoult. Por lo tanto, es importante determinar a qué presión se necesita llegar para que el fenómeno se pueda presentar.

Tabla 12 Concentración en alimento, rechazo, permeado, masa molar de los iones y molalidades del alimento, rechazo, permeado*

Ión	Concentración			Masa Molar (g/mol)	Molalidad		
	Alimento Ca	Rechazo Cr	Permeado Cp		m _a	m _R	m _P
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)				
NH ₄ ⁺ NH ₃	0,000	0,000	0,000	35,07	0,00000	0,00000	0,00000
K ⁺	364,340	635,939	32,386	39,09	0,00960	0,01675	0,00085
Na ⁺	8696,990	15180,201	773,066	22,99	0,38957	0,67997	0,03463
Mg ²⁺	1156,610	2060,869	51,405	24,31	0,04900	0,08730	0,00218
Ca ²⁺	358,400	638,604	15,929	40,08	0,00921	0,01641	0,00041
Sr ²⁺	0,000	0,000	0,000	87,62	0,00000	0,00000	0,00000
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	137,33	0,00000	0,00000	0,00000
CO ₃ ²⁺	21,260	37,108	1,890	60,01	0,00036	0,00064	0,00003
HCO ₃ ⁻	195,730	341,638	17,398	61,02	0,00330	0,00577	0,00029
NO ₃ ⁻	11,830	20,434	1,314	62,00	0,00020	0,00034	0,00002
Cl ⁻	16142,170	27881,930	1793,574	35,45	0,46892	0,80995	0,05210
F ⁻	0,000	0,000	0,000	18,99	0,00000	0,00000	0,00000
SO ₄ ²⁻	1976,290	3413,592	219,588	96,06	0,02119	0,03659	0,00235
SiO ₂	6,220	10,744	0,691	60,08	0,00011	0,00018	0,00001
BO ₃ ³⁻	4,520	7,561	0,804	10,81	0,00043	0,00072	0,00008
CO ₂	0,970	1,693	0,086	44,01	0,00002	0,00004	0,00000
Total, Sumatoria					0,95190	1,65466	0,09296

*: teniendo en cuenta las ecuaciones 59 - 61

Tabla 13 Iones, valencia y multiplicación de las valencias por la molalidad del alimento, rechazo y permeado

Ión	Valencias, (Zi) ²	ma*(Zi) ²	mR*(Zi) ²	mP*(Zi) ²
NH ₄ ⁺ NH ₃	0	0,000000	0,000000	0,000000
K ⁺	1	0,009598	0,016753	0,000853
Na ⁺	1	0,389567	0,679971	0,034628
Mg ²⁺	4	0,195981	0,349202	0,008710
Ca ²⁺	4	0,036834	0,065632	0,001637
Sr ²⁺	4	0,000000	0,000000	0,000000
Ba ²⁺	4	0,000000	0,000000	0,000000
CO ₃ ²⁺	4	0,001459	0,002547	0,000130
HCO ₃ ⁻	1	0,003303	0,005766	0,000294
NO ₃ ⁻	1	0,000196	0,000339	0,000022
Cl ⁻	1	0,468919	0,809950	0,052102
F ⁻	0	0,000000	0,000000	0,000000
SO ₄ ²⁻	4	0,084746	0,146380	0,009416
SiO ₂	0	0,000000	0,000000	0,000000
BO ₃ ³⁻	9	0,003875	0,006482	0,000689
CO ₂	0	0,000000	0,000000	0,000000
		1,194479	2,083023	0,108481

Tabla 14 Cálculos de parámetros

Parámetro	Valor	Ecuación
<i>Cr</i>	0,81818182	61
<i>S</i>	1,44852154	63
ρ	1,00034876	64
<i>I</i>	0,47594922	65
<i>I'</i>	0,59723968	66
<i>A</i>	2,15921925	67
<i>B</i>	0,02186061	68
<i>C</i>	0,00694734	69
<i>D</i>	77,9864876	70

Tabla 15 Coeficiente Osmótico y Presión Osmótica

Coeficiente Osmótico, Φ	0,87432269	-
Presión Osmótica, Π	20,33960277	bar

Tabla 16 Comparación de concentraciones del permeado con la resolución 631 de 2015

Ión	Cp (mg/L)	NORMA	¿Cumple Norma?
NH ₄ ⁺ NH ₃	0	Análisis y Reporte	N/A
K ⁺	32,38577778	Norma no reporta	N/A
Na ⁺	773,0657778	Norma no reporta	N/A
Mg ²⁺	51,40488889	Norma no reporta	N/A
Ca ²⁺	15,92888889	Análisis y Reporte	N/A
Sr ²⁺	0	Norma no reporta	N/A
Ba ²⁺	0	1	SI
CO ₃ ²⁺	1,88977778	Norma no reporta	N/A
HCO ₃ ⁻	17,39822222	Norma no reporta	N/A
NO ₃ ⁻	1,314444444	Análisis y Reporte	N/A
Cl ⁻	1793,574444	250	NO
F ⁻	0	5	SI
SO ₄ ²⁻	219,5877778	250	SI
SiO ₂	0,691111111	Norma no reporta	N/A
BO ₃ ³⁻	0,803555556	Norma no reporta	N/A
CO ₂	0,086222222	Norma no reporta	N/A

En la tabla 17, se presenta el resumen de los resultados de los parámetros básicos para el diseño de un equipo de ósmosis inversa para el Laboratorio de Operaciones Unitarias

Tabla 17 Condiciones de entrada y condiciones de operación del equipo

Especificación	Valor/Característica	
Caudal de alimento	7,87	Galón/ h
Membrana	CA Acetato de celulosa (40% de acetato)	
Tipo de membrana	Loeb- Sourirajan	
#Membranas	10	Unidades
#Tubos	2	Unidades
Diámetro Membrana	20	cm
Largo Tubo	100	cm
Material Carcasas (Tubo)	Plástico reforzado con fibra de vidrio	
rechazo de Sales	95-98	%
Coefficiente de rechazo	92	%
Eficiencia	45	%
Presión Osmótica π Calculada	20,3396028	bar

5. Conclusiones

La industria textil en la ciudad de Medellín es un sector fortalecido desde hace muchos años lo que ha permitido que diferentes empresas lleguen a producir y comercializar sus prendas en otras ciudades de Colombia. La manufactura de los textiles requiere gran cantidad de agua para sus procesos, por lo tanto, es de vital importancia tener la cuantificación del consumo y caracterización del agua que se vierte al alcantarillado, pero muchas empresas son reacias a suministrar información sobre los residuos que generan, muchos por miedo a las multas o sanciones que se puedan generar al no cumplir con los parámetros establecidos.

Para el mejoramiento de la calidad del agua de los procesos industriales las membranas en la ósmosis inversa es una tecnología que ya cuenta con amplia aplicación debido a la facilidad de tratar altos caudales de producto. Es importante resaltar que para realizar el diseño del equipo de ósmosis inversa no se contaba con información real del tipo y composición fisicoquímica del agua producto de los procesos textiles, por motivos de la pandemia que estamos presentando tampoco fue posible realizar muestreos algunas afluentes que conectan con algunas industrias textiles ya que los laboratorios universitarios se encontraban cerrados por el confinamiento ordenado por la presidencia de la república de Colombia. En síntesis, en esta investigación se eligió de acuerdo con la literatura las composiciones de un agua muestra común en procesos industriales del sector textil.

Para el mejoramiento de la calidad del agua, ya sea para vertimiento o para reutilización en el proceso industrial, el equipo de ósmosis inversa debe contar con la cantidad de membranas y tubos de presión necesarios para que la separación de los iones presentes en la solución sea separada.

Respecto a la cantidad de información disponible, se encontró un gran número de artículos, informes, tesis y textos que ayudaron a introducir los conceptos clave sobre este tema en concreto, que tras realizar la selección de las fuentes más útiles y fiables se obtuvo en cuanto a los parámetros experimentales los artículos consultados han resultado con un porcentaje muy bajo en información, al igual que los documentos que realmente han sido de utilidad.

Se realizó un análisis riguroso de los pretratamientos requeridos para tratar las aguas residuales al igual de los residuos generados por diferentes industrias la cual se sintetizó en la tabla 2 Caracterización de Aguas residuales industriales, el siguiente punto fue observar cuál de estas

industrias eran más comunes en la ciudad de Medellín encontrando trascendencia en el sector textil. Por consiguiente se logró profundizar en esta industria, cuanto ha sido afectada por la pandemia al igual que las proyecciones tiene el gremio tras la reactivación económica, se logró obtener información en la literatura sobre la caracterización fisicoquímica del agua de industria textil sintetizada en la tabla 4 , en la cual se observó que la caracterización no cumplen con los límites máximos permisibles estipulados en la Resolución 631 de 2015 la cual establece la manera en que las empresas deben manejar el vertimiento de cuerpos de agua a superficies y a los sistemas de alcantarillado público. Así pues, se procedió a realizar el tratamiento de esta problemática a través del tratamiento de osmosis inversa lográndose comparar las concentraciones del permeado con los límites máximos permisibles en la resolución 631 de 2015 plasmados en la tabla 16 en la cual solo el cloro no cumple la norma.

Se logró establecer que el caudal de entrada para la implementación de la operación de osmosis inversa es de 7,87 gal/h con una presión absoluta de ingreso de 2.2251 atm y mediante el método de solución flujo patrón de mezcla completa en el módulo de osmosis inversa, el cual requiere para su solución datos que se deben obtener de forma experimental, se utilizaron algunos valores reportados en literatura para el establecimiento de algunos datos básicos.

Se determinó la condición de operación de la membrana a utilizar en la operación de osmosis inversa, la cual se resume en la tabla 17: Condiciones de entrada y condiciones de operación del equipo. Las ecuaciones fueron programadas y simuladas a través del programa Excel, lo cual ha permitido para la membrana seleccionada evaluar su desempeño en el tratamiento de un agua industrial.

6. Recomendaciones

Para lograr el acoplamiento de pretratamientos como filtros de arena, filtro de carbón activado, suavizadores o lecho de resinas que podrían ayudar a disminuir las concentraciones nocivas a la membrana, que de manera específica para este trabajo con el cloro se pudo solucionar con un filtro de carbón activado y así poder cumplir en su totalidad con la resolución 631 del 2015.

Como recomendación para un correcto diseño de los equipos de ósmosis inversa en los procesos industriales, es la implementación de toma de muestras antes del ingreso al sistema y previo al vertimiento al alcantarillado, de esta forma se verificará si el agua vertida cumple los parámetros ambientales requeridos o si el equipo incluyendo las membranas están realizando de forma óptima la retención de los materiales pesados o por efecto del ensuciamiento su función no sea la adecuada.

Realizar estudios a las membranas que se pueden usar en la osmosis inversa, determinando cuales con las concentraciones máximas de iones y/o sustancias en las cuales las membranas se pueden usar sin sufrir daños. Así como estudios de operación y mantenimiento en los equipos de osmosis inversa que sea de forma general o específica, es decir que tenga una aplicación en varias fuentes de agua cruda. Los estudios experimentales en equipos de osmosis inversa son importantes para determinar el rango en que se pueden utilizar los diferentes tipos de membranas ya que los fabricantes no brindan información al respecto solo se limitan a decir que funciona.

Referencias

- al, & Gil, M. (Julio- Diciembre de 2012). *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73.
- ALVAREZ, S., RIUS, F., ARIERA, F., ALVAREZ, R., & COCA, J. (ABRIL de 1996). ALIMENTACION. *Concentración de zumos de fruta y de verduras mediante ósmosis inversa*. EQUIPOS Y TECNOLOGÍA.
- Baker, R. (s.f.). Op.cit.
- baker, R. W. (2004). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- Benavides R., V. (2015). *Diseño del plan gestión ambiental para la industria textil aritex de colombia S.A*. Santiago de cali: Facultad de Ingenieria .
- Betancourt R.A., M. J. (2012). Análisis de aprovechabilidad del lixiviado de un relleno sanitario de una ciudad intermedia en Colombia. *ACODAL*, 8.
- Butcher, J. C. (2008). *Numerical methods for ordinary differential equations*. Jhon WILEY & Sons .
- CARIDE, J. A. (2008). El complejo territorio de las relaciones educación.
- Carreño R., L. (20 de 12 de 2020). *EL ESPECTADOR*. Recuperado el 02 de 01 de 2021, de <https://www.elespectador.com/noticias/economia/que-viene-para-la-industria-de-la-moda-en-2021/>
- Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015*. Diario Oficial.
- Directiva Europea. (26 de abril de 1999). 1999/31/, (Artículo 2 de la directiva) Relativa al vertido de residuos diarios oficial n° L182 de 16/07/1999. (D. d. consejo, Ed.) *Diario Oficial*, L(182), 0001-0019.
- emalsa. (16 de Septiembre de 2021). Obtenido de https://emalsa.es/3/3_10_2.php
- Fariñas Iglesias, M. (1999). *Ósmosis Inversa. Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones* . Madrid, España: Mc GRAW HILL.
- Fernández-Sempere, J., Ruiz-Beviá, F., Salcedo-Díaz, R., & García-Algado, P. (s.f.). Estudio de la capa de polarización durante el proceso de ósmosis inversa.
- García Olmos, C. F. (2004). Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Industrial. *Aplicación de la ósmosis inversa y la nanofiltración en el acondicionamiento de aguas de calderas*. España: Universidad de Oviedo.

- García, R. M. (2007). Bloque III: Tratamientos específicos de vertidos industriales -Parte II. *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*. Departamento de ingeniería química- Facultad de ciencias- Universidad de Granada.
- gea. (16 de septiembre de 2021). Obtenido de <http://www.geafiltration.com/Espanol/tecnologia/tipos-de-membrana.htm>
- Geoge, T., Theisen, H., & Vigil, S. (1997). *Gestión integral de residuos sólidos Vol. I*. Madrid: Mc Graw Hill.
- González Martínez, A. (Febrero de 2017). Modelado y simulación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) empleando GPS-X. *Tesis para obtener grado de Maestría en Tecnología y Gestion del Agua*. San Luis Potosí, S.L.P.: Universidad Autonoma de San Luis Potosí .
- Hernandez Lehmann, A., & Galan Martinez, V. (2004). *Manula de depuracion uralita*. Madrid (España): Paraninfo.
- Hernández, A. (2000). Manual de depuracion Uralita. España: Thompson Lering.
- Hernandez, A., & Galán, P. (2004). *Manual de depuracion Uralita*. Madrid: Uralita.
- Hernandez, J. (16 de octubre de 2016). *wikilibros*. Recuperado el 1 de julio de 2019, de Aguas Residuales: https://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Caracter%C3%A0sticas_de_las_aguas_residuales
- Hidalgo Santana, M., & Mejia Alvarez, E. (2010). Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domesticas, cuenca baja de la quebrada de macana, san antoni de prado, municipio de medellin. . Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Hidalgo, A. (2016). Alternativas en el tratamiento de lixiviados de vertedero. *CONAMA2016 DEL 28 DE NOVIEMBRE AL 1 DE DICIEMBRE, MADRID*.
- inexmoda, sectorial. (Septiembre de 2020). *Observatorio sistema moda*. Recuperado el 20 de 12 de 2020, de <http://www.saladeprensainexmoda.com/wp-content/uploads/2020/11/Informe-Observatorio-Sistema-Moda-Septiembre-2020.pdf>
- J.D., L. (1991). numerical methods for ordinary differential systems: The initial value problem. Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Jamal, K., Khan, A., & Kamil, M. (2004). Mathematical modeling od reverse osmosis systems . Desalination.

- Kimura, S., & Sourirajan, S. (1967). Analysis of data in reverse osmosis with porous cellulose acetate membranes used. *AIChE Journal*.
- Kucera, J. (2010). *Reverse Osmosis. Industrial applications and processes*. New Jersey: WILEY.
- linkcompresores. (13 de 03 de 2020). *linkcompresores*. Recuperado el 20 de 03 de 2020, de <https://www.linkcompresores.com.co/panorama-de-la-industria-textil-en-colombia-y-america-latina-para-2020/>
- lizarazo Becerra, J. M., & orjuela Gutierrez, M. I. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Lopez, G. M. (2015). Uso de un sistema de ahorro de agua para conservar ecosistemas para el recurso hídrico (Vol. 1). *Sistema de información científico*.
- López, M. C., Forné, T., & Martínez, B. (2012). Regeneración y reutilización de las aguas residuales. *Técnica Industrial Junio*, 298:32-44.
- LÓPEZ, M., GARCÍA, E., & PÉREZ, J. (1985). Aguas Residuales composición. En *Aspectos Sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Universidad de Granada.
- Lyster, E., & Cohen, Y. (2007). Numerical-study of concentration polarization in arectangular reverse osmosis membrachannel: permeate flux variation an hydrodynamic end effects. *J. of MembraneScience*.
- Martin, I., Salsedo, R., & Font, R. (2011). Tema 5:Operaciones separación sólido-fluido. En *MECÁNICA DE FLUIDOS* (pág. 3). UNIVERSIDAD DE ALICATE.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, Vertido Y Reutilizacion*. España: McGraw-Hill.
- Mohammad, N. L., & al-mefleh. (s.f.). Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración, tesis doctoral. *E.T.S. de ingenieros de caminos, canales y puertos*. universidad politécnica de Madrid.
- Moreno Benavides, J. A. (2011). *Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa dober osmotech de colombia ltda*. Santiago de cali: Universidad autonoma de occidente.
- Nemerrow, L. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Diaz de santos.
- norit. (16 de septiembre de 2020). Obtenido de <http://www.norit.com/p3.php?RubriekID=2160>

- Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (s.f.). <https://www.globalmethane.org>. Recuperado el 15 de Diciembre de 2019, de <https://www.globalmethane.org/documents/Seleccion-de-Tecnologias-para-el-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Municipales.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. Recuperado el 7 de Agosto de 2019, de Lima- Perú: <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/sanea/163esp-diseno-ti.pdf>
- Ortiz Flórez, R. (2011). *Pequeñas Centrales hidroeléctricas: construcción paso a paso*. Bogota: Ediciones de la U.
- Pérez-Baez, P., & Susial, S. (abril de 1999). *Diseño de plantas de ósmosis inversa (y II) Procedimientos de diseño*. Canarias.
- PINEDA, S. (1998). *Manejo y Disposición de Residuos Sólidos*. Bogotá: Panamericana.
- Ramalho, R. (2003). En *Tratamiento de aguas residuales* (pág. 92). REVERTÉ S.A.
- RAMALHO, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. (Reimpreso 2003). Barcelona, España: Reverté.
- Reynolds, K. A. (septiembre/Octubre de 2002). *AGUA LATINOAMERICA*. Recuperado el 25 de junio de 2019, de *Tratamiento de aguas residuales en latinoamerica, identificación del problema.*: http://cidta.usal.es/residuales/libros/documentos_nuevos/DeLaLaveSepOct02.pdf
- Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. PWS Publishing Company.
- Rodriguez, A., Fernández, A., Letón Garcia, P., Rosal Garcia, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz Garcia, J. M. (15 de 11 de 2021). *Madrimas*. Obtenido de https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
- Rodriguez, M. (2019). *Conclusiones de lecturas*.
- Rodriguez, M. (2020). *Tabla Caracterización de Aguas residuales industriales*. Medellín.
- Rodriguez, M., & Dominguez, N. (2018). *laboratorio de vertederos*. Medellín.
- Romero Rojas, J. A. (2002). *Purificación del Agua*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ron, G., & Crites, T. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogota: McGraw-Hill Interamericana.

- Sans, R. F., & Ribas, J. d. (1989). *Ingeniería ambiental:Contaminación y tratamientos*. Barcelona(España): MARCOMBO, S.A.
- Slater, C., Zielinski, J., & Wendel, R. (1992). Simulation of reverse osmosis processconcentrating industrial wastes. New York: ManhattanCollege Chemical Engineering Department Riverdale.
- Song, L., Hong, S., Hu, J., Ong, L., & Ng, W. (2002). Simulation offull-scale reverse osmosis membraneprocess . J. of Enviromental Engineering .
- Soriano, E., & Zaragoza, J. (1994). Membranas sintéticas en sistemas de osmosis inversa. *Ingenieria Química octubre. Vol. 16 N°187*, 389-407.
- Sparrow Álamo, E. (2008). *El Desarenador*. Perú: UNS- Estructuras Hidráulicas.
- Su, D. W. (2007). Computational FluidDynamics in Food Processing . CRC-Press Taylor & Francis Group.
- Suhan, K., & Hoek, E. M. (2005). Modelingconcentration polarization in reverosmosis process. Desalination .
- Tejero, S. (1992). *DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES*. Madrid .
- Valdez, C., & Vazquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. . *Fundación ICA*.
- Vergara, F. (1976). *Tratamiento de aguas industriales* . Perú: Kavi .