



S.E.P

S.E.S

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“DISEÑO DE UNA PLANTA DE AGUA DESIONIZADA”

OPCIÓN: III PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:
PAOLA GISEEL VERA DE PAZ
NÚMERO DE CONTROL: 06281112**

**ASESOR:
DR. FREDY CUELLAR ROBLES**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, MAYO DE 2019

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos.

A mis padres Humberto Vera y Nicolasa de Paz quienes, a través de su esfuerzo diario, cada uno en sus actividades diarias me enseñaron a trabajar para lograr objetivos, plantearme metas y dar él mejor desempeño posible en lo que se hace, que aún a pesar de parecer insignificante es importante y requiere el mismo esfuerzo, para poder ser mejor. Les doy gracias por haberme brindado todo el apoyo hasta el final para culminar mi carrera profesional y por ayudarme en mis primeros pasos al incorporarme al área laboral y por siempre estar a mi lado para apoyarme en todo e incondicionalmente. A mi padre por sus horas de desvelo en el trabajo para que pudiera ir a la escuela y tener un mejor futuro, a mi madre por sus días de madrugar para no llegar tarde a la escuela. Por todo su esfuerzo y amor, infinitas gracias.

A mis hermanos Humberto, Maria Fernanda y Marcopolo de quienes aprendí y me apoyaron a mejorar mis habilidades, manejo de software, matemáticas y mejorar mi ánimo cuando había fracasado e impulsarme a levantarme y mejorar.

Agradezco a esta institución al Instituto Tecnológico de Toluca y los catedráticos ingenieros, maestros y doctores que en ella imparten, gracias a sus lecciones, tiempo brindado para resolver dudas y mejorar mi aprendizaje siempre estuvieron disponibles.

Al Dr. Fredy Cuellar, quién me ha apoyado a dar este último gran pasó para lograr concluir con mi carrera profesional, le agradezco las horas y el empeño dedicado a la lectura, comentarios y críticas hechas sobre este trabajo que se desarrolla en las páginas siguientes.

RESUMEN

En las páginas de este trabajo verán el reflejo de un proyecto realizado en un periodo de dos años, investigación, desarrollo de ingeniería, implementación y resultados obtenidos, proyecto elaborado con el objetivo de lograr abastecer el volumen de agua con la calidad requerida para su empleo en los procesos de una planta de pintura para la industria automotriz.

Se revisarán los distintos procesos de tratamiento que existen, primarios, secundarios y terciarios, conceptos, características, así como las nuevas tecnologías, las ventajas y desventajas que cada tratamiento ofrece y la eficiencia que se puede obtener de estos procesos.

Se analizó la calidad de agua de la que se dispuso en el área donde se desarrolló este proyecto, así como la cantidad de agua con la que se dispone para la operación de la planta de pintura. También se analizaron los requerimientos tanto de calidad como cantidad de agua que cada uno de los procesos que conforman esta planta de pintura y la demanda de los mismos.

De los resultados de lo anterior, se planteó el mejor diseño posible para una planta de agua desionizada, misma que cumpla con la calidad requerida para los procesos de pintura en la industria automotriz, que suministre el efluente necesario para abastecer los procesos y con la eficiencia permita obtener el menor desperdicio posible en cada uno de los procesos que se definan en el tratamiento, ya que es necesario optimizar el agua este recurso que es un vital líquido. Por otra parte, se debió tener cuidado de no sobrepasar el presupuesto dado para este proyecto.

Se concluyó con la instalación y puesta en marcha del sistema de agua desionizada, ajustes y monitoreo del mismo, para validar se haya cumplido con las premisas dadas y verificar el correcto diseño de la planta de agua desionizada.

REVIEW

In the pages of this work will be the reflection of a project carried out over a period of two years research, engineering development, implementation and results, project developed with the objective of supplying the volume and quality of deionized water required in the process of paint shop in the automotive industry.

We will review the different treatment processes that exist, primary, secondary and tertiary concepts, features and new technologies, the advantages and disadvantages of each treatment offers and efficiency we can get from these processes. We analyze the quality of water that we have in this project and the amount of water that we have available for the operation of the painting plant. We will also analyze the quality and quantity, requirements of each processes that do in a paint shop demand.

From the results above we will make the best possible design for a deionized water plant that meets the required quality in the painting processes of the automotive industry, which provide us the needed effluent to supply all the processes and allow us to get less possible waste in each of the defined processes in the treatment and looking for the optimization of this resource the water that is a vital liquid. We must also be careful to do not exceed the given budget for this project.

We conclude with the installation and commissioning of the system, adjustments and efficiency monitoring system of deionized water, to validate that it has complied with the given premises and verify the correct design of deionized water plant.

1. INTRODUCCIÓN

¿Qué es el agua? Químicamente se define como una molécula conformada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, entrelazados por un enlace de hidrógeno, elemento capaz de estar presente en tres estados físicos, sólido, líquido y gaseoso; pero cabe destacar que también es un líquido preciado en la actualidad, debido a su escasez y su uso para cubrir las necesidades básicas diarias de las poblaciones, desde la higiene, salud y la industria, lo que ha generado que su disponibilidad sea el impulsor del desarrollo económico en las poblaciones.

Debido al crecimiento poblacional y el desarrollo industrial en el mundo, se ha generado una creciente demanda del agua, lo que ha ido llevando a la ciencia desde hace años a indagar en procesos de tratamiento ya sea con el fin de reciclarla o purificarla y estos tratamientos siempre han sido estudiados con el objetivo de optimizarse, para obtener un mayor aprovechamiento del agua, esto mismo ha implicado el desarrollo de nuevas tecnologías, uso de las mismas que se ha incrementado en las últimas décadas, convirtiéndose en tecnologías accesibles, debido a la actual demanda.

La optimización ha sido impulsada por el dato ya documentado que en el planeta tierra se cuenta con un 99 % de agua la cual es salada y tan solo el 1% es dulce, de este escaso porcentaje el 0.989 % es inaccesible o se ubica en puntos donde es difícil su extracción y tan solo el 0.001 % es accesible y es el que abastece las necesidades humanas, bajo estos porcentajes se vuelve crítico el aprovechamiento al máximo del agua.

Hoy en día el desarrollo de complejos industriales, se lleva a cabo posterior del estudio de todas las facilidades necesarias para su correcto desarrollo y funcionamiento, considerando vialidades, medios de transporte, poblaciones próximas, acceso al agua y energía principalmente, ya que estos dos últimos son recursos básicos para el funcionamiento de los procesos.

A lo largo de este trabajo se analizará la cantidad y calidad de agua necesaria para el funcionamiento de una planta de pintura automotriz, la calidad de agua disponible en el área donde se ubicará la planta, así como el diseño del proceso de tratamiento para cubrir las necesidades de la planta.

ÍNDICE

1. EL AGUA.....	1
1.1 Definición del agua.....	1
1.2 Características del agua.....	2
1.3 Composición química del agua.....	6
1.3.1 Elementos presentes en el agua	6
1.3.2 Gases disueltos.....	11
2. PROCESOS DE TRATAMIENTO.....	12
2.1 Tratamientos físicos.....	13
2.1.1 Filtración gruesa.....	14
2.1.2 Filtración fina.....	14
2.2 Tratamientos químicos.....	19
2.3 Tratamientos por membranas.....	25
3. AGUA PARA PROCESO DE PINTURA AUTOMOTRIZ.....	38
3.1 Disponibilidad del agua.....	38
3.2 Calidad de agua para el proceso de pintura automotriz.....	41
4. DISEÑO DE PROCESO DE TRATAMIENTO.....	48
4.1 Características del agua salobre.....	48
4.2 Proceso de tratamiento.....	51
5. RESULTADOS.....	66
6. CONCLUSIONES.....	69

7. RECOMENDACIONES.....	70
8. FUENTES CONSULTADAS.....	71

1. EL AGUA

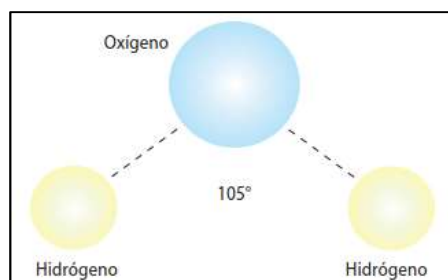
1.1 Definición del agua

En este primer capítulo, se definirán las bases de este caso de estudio, iniciando con resolver una pregunta.

¿Qué es el agua? Bajo este elemento que se definirá a continuación se desarrolla el proyecto que en las páginas siguientes se describe.

El Diccionario de la Real Academia Española (2004) define es una “sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, líquida, insípida e incolora”.

Esta definición queda expresada con la formula química H_2O (agua), que quiere decir dos átomos de hidrogeno, están ligados a uno de oxigeno por medio de un puente de hidrogeno, formando un ángulo de 105° , como muestra la Figura 1.1.



Fuente: Guerrero, 2012

Figura 1.1 Fórmula química del agua.

Cabe mencionar que el agua es un recurso abundante en el planeta y se puede decir que su estado es casi puro, pero debido a que cuenta con características fisicoquímicas, que la definen de manera cualitativa y cuantitativa, conlleva a una clasificación de la misma, lo que permite definir sus posibles usos o determinar el proceso de tratamiento necesario para lograr su uso en una aplicación en específico.

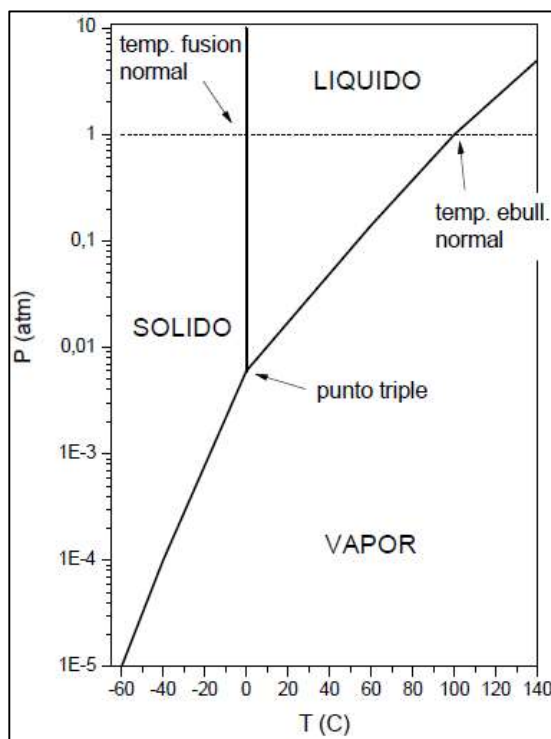
También es indispensable mencionar la importancia que juega el agua en el desarrollo de la vida en el planeta, pues resulta esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente. Actualmente el aprovechamiento de este recurso es caso de estudio en investigaciones, proyectos, congresos, desarrollos tecnológicos para potencializar su uso y

convenciones a nivel mundial para determinar metas del uso del agua buscando sea sustentable, algunos ejemplos son reduciendo el consumo, incrementando el volumen tratado para el reciclaje de este vital líquido.

1.2 Características del agua

Se describen enseguida las principales características físicas y químicas del agua, las cuales están inmersas a su estado natural y se ven afectadas por el medio en el que se encuentra:

- a) Punto de fusión: Temperatura a la cual el agua se presenta en estado líquido y esto ocurre aproximadamente a la presión de 1 atm y una temperatura entre 0 °C y 100 °C.
 - b) Punto de ebullición: Temperatura a la que el agua comienza a hervir, alcanzando un cambio de fase, pasando del estado líquido a vapor. Aproximadamente a la presión atmosférica (760 mmHg) alcanzando su punto de ebullición a los 100 °C.
 - c) Punto de solidificación: En este estado se le conoce comúnmente como hielo, en este punto el líquido tiene un cambio de fase a estado sólido, logrando esto a presión atmosférica a 0 °C.
- Estas descripciones se pueden observar de manera gráfica como se muestra en el diagrama de fases en la Figura 1.2.



Fuente: Gaskell, 1996

Figura 1.2 Diagrama de fases del agua.

d) Densidad: Definida como el volumen de agua que ocupa un peso específico. En esta característica del agua se presenta la llamada “anomalía del agua”, pues se contrapone a la regla general que indica que los sólidos son más densos que los líquidos, debido a que el agua a bajas temperaturas, presenta una expansión y al igual que otros líquidos, su densidad disminuye con un aumento de temperatura. Se observa el comportamiento de lo antes mencionado en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Tabla de Densidades del agua.

Temperatura en °C	Estado	Densidad en g/mL
100	Líquido	0.95838
15	Líquido	0.99913
10	Líquido	0.99973
5	Líquido	0.99999
3.98	Líquido	1.00000
2	Líquido	0.99995
0	Líquido	0.99987
0	Sólido	0.91700
-2	Sólido	0.91718
-4	Sólido	0.91733
-6	Sólido	0.91750

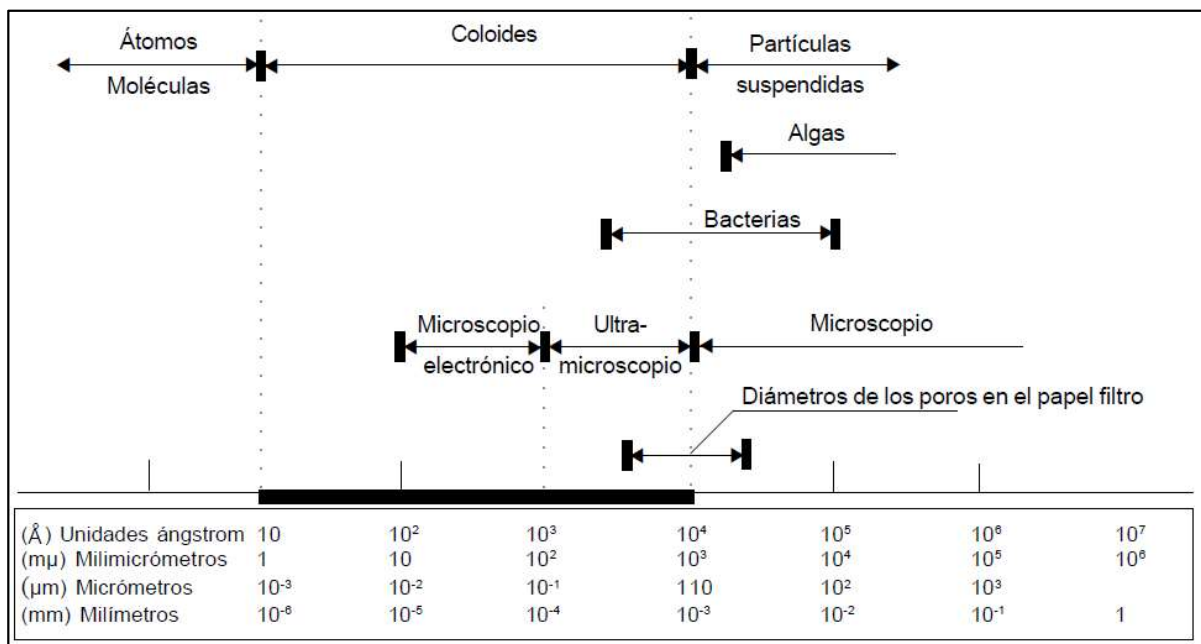
Fuente: Crane, 1992

e) Calor específico: Cantidad de poder calorífico necesario para elevar la temperatura de 1 gramo de agua, se define como 1 cal/g °C.

f) Tensión superficial: Característica física de los líquidos que tienden a tomar formas con reducidas áreas superficiales, producto de las fuerzas de atracción que atraen las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido. Esta característica es la resistencia que presenta un líquido a la penetración de su superficie. Teniendo como unidad de medida dina/cm o N/m (Levine, 2004).

g) Viscosidad: Característica que permite el desplazamiento de un líquido o gas con respecto a otro fluido, resultado de la fuerza de atracción entre las moléculas resistiéndose al desplazamiento.

h) Turbiedad: Producto de la suspensión de partículas o coloides que reducen la transparencia del agua en menor o mayor grado. Esta característica determina de manera directa la calidad del agua. La Figura 1.3 representa la diferencia de tamaños de partículas y coloides.



Fuente: Barrenechea, 2004

Figura 1.3 Distribución de tamaños de las partículas en el agua.

i) Disolución: El agua es conocida como el disolvente universal, derivado de ser capaz de disolver más sustancias, pues forma puentes de hidrógeno con otras sustancias que se disuelven cuando interaccionan con las moléculas polares del agua.

j) Potencial de hidrogeno (pH): Característica que indica la concentración de iones hidrogeno H⁺ presentes en los líquidos, este nos indica el nivel de acidez o alcalinidad del líquido, el agua presenta un valor de pH=7 es decir neutro. Cabe mencionar este término se expresa de manera matemática como (Chang, 2002):

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

k) Conductividad eléctrica: Capacidad de conducir una corriente eléctrica a través de una sustancia, en esta característica el agua cuenta con un valor bajo. Pero debido a su capacidad de disolución, a medida que se disuelve con otros elementos se vuelve una sustancia conductora. Cabe mencionar esta capacidad varia también en función de un cambio de temperatura aumentando su capacidad al hacerlo esta.

Es importante saber que a medida que aumenta la conductividad también aumenta su capacidad de corrosión.

La conductividad se expresa comúnmente en microsiemens ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Siendo relacionada con la salinidad o contenido total de sales (TDS) que se mide normalmente en mg/l o ppm, considerándose un coeficiente de 0.64 o múltiplos de este valor según las unidades para realizar la conversión de una unidad a otra, en el agua natural, como se muestra a continuación la fórmula (Medina, 2000):

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE}(\mu\text{S/cm}) \times 0.64 = \text{CE mS/cm} \times 640$$

En otro tipo de agua, este coeficiente estará en función de la composición química, debido a los iones presentes y las concentraciones de los mismos. El agua se podrá clasificar en función de su salinidad como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Clasificación del agua según la salinidad.

Tipo de agua	Salinidad
Aguas salobres	Aguas con una salinidad hasta 1,500 mg/L
Aguas de salinidad media	Aguas con una salinidad hasta 3,000 mg/L
Aguas de alta salinidad	Aguas con una salinidad hasta 10,000 mg/L
Aguas de mar	Aguas con una salinidad desde 25,000 mg/L

Fuente: Ortega, 2001

I) Dureza: Se refiere a la concentración de sales presentes en el agua la cual puede ser de dos formas, carbonatadas debido a que se tiene presencia de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) que se combinan con bicarbonato (Ca_2CO_3) y carbonato (CO_3) y la dureza no carbonatada que se causa principalmente por nitratos, cloruros y sulfatos de calcio y sulfatos de magnesio, siendo la diferencia de la dureza total y la dureza carbonatada. Esta característica por lo general queda expresada como mg/l CaCO_3 (carbonato de calcio).

La Tabla 1.3 nos muestra la clasificación de la calidad del agua que se puede dar en función de su dureza.

Tabla 1.3 Clasificación de la dureza del agua.

Tipo de agua	CaCO ₃
Muy blanda	0 – 15
Blanda	16 – 75
Semidura	76 – 150
Dura	151 – 300
Muy dura	> 300

Fuente: Millán, 2003

Ya se han detallado las principales características físico-químicas del agua, que se deben tener presente en este caso de estudio.

1.3 Composición química del agua

Cuando se habla de calidad del agua, se hace una referencia directa a su composición química la cual es muy variable, dependiendo de la zona y los puntos de contaminación con los que pueda estar en contacto, para ello se han desarrollado diversos métodos de análisis para determinar la calidad de agua y está relacionada con la cantidad y presencia de elementos que tiene y estos determinan sus usos probables y son también el punto de partida para determinar el tratamiento al que se deberá someter para lograr su implementación en algún uso en específico.

Los elementos presentes en el agua pueden dividirse en dos los que son más abundantes que serán los elementos principales y los secundarios o microelementos.

1.3.1 Elementos presentes en el agua

A continuación, se enlistan los principales elementos presentes en el agua:

a) Sodio (Na⁺): Ión metálico que se encuentra en mayor presencia en el agua debido a su solubilidad, en agua de mar su concentración puede ser alrededor de 10,000 mg/L como menciona Medina (2000), este elemento se encuentra en el agua como cloruro, carbonato o bicarbonato sódico y en altas concentraciones en el agua esta puede llegar a ser alcalina y tener un pH superior a 9, afectando de manera directa la conductividad.

En función del uso que se requiera darle al agua son los límites máximos permisibles que pueden ser aceptados o determinar si es requerido un tratamiento adicional para lograr cubrir la necesidad.

b) Calcio (Ca^+): Ión metálico que se declara como el tercer metal más abundante, los iones de calcio contribuyen a la dureza del agua, al tener una mayor presencia en el agua se precipita y genera sedimentos. Este elemento es también necesario para la vida de los organismos y debe ser consumido diariamente.

c) Magnesio (Mg^+): Al igual que el calcio es un ión metálico que al encontrarse disuelto en el agua en grandes cantidades puede generar incrustaciones en la tubería debido a cambios de temperatura, pH y presión ya que, al sobrepasar los límites de concentración del equilibrio, genera carbonatos insolubles y en ocasiones genera sulfatos.

La concentración del magnesio no puede excederse en el agua de consumo humano, ya que genera problemas a la salud.

d) Cloro (Cl^-): Es un elemento halógeno y es el elemento más abundante en el agua de mar y tiene concentraciones medias de 20,000 mg/L, al igual que el sodio y magnesio, la normatividad determina su límite máximo en el que se puede encontrar en el agua para determinados usos como el consumo humano.

e) Sulfatos (SO^+): Son un componente natural en el agua y contribuyen a la salinidad, se encuentra en el agua principalmente como sulfatos de calcio, magnesio y sodio, los primeros dos constituyen la dureza del agua y la dureza permanente. Así como otros elementos su concentración en el agua esta normado, debido a efectos dañinos que puede tener en la salud.

Este componente puede llegar hasta concentraciones de 2,000 mg/L en el agua, tomando propiedades corrosivas, su remoción suele ser costosa, por lo que se recomienda el uso de fuentes con límites por debajo de lo que es requerido (Barrenechea, 2004).

f) Carbonatos y bicarbonatos: Estos elementos se encuentran en toda el agua, su alta concentración puede elevar el pH hasta 10, cuando se tiene una alta temperatura o elevado pH, se genera la producción de iones de carbonato e hidroxilo, precipitando el calcio y el magnesio, para evitar esto el agua se trata con ácido para mantener un equilibrio químico. Pero también se debe cuidar la formación del sulfato cálcico.

Teniendo como tratamiento más común el ablandamiento o suavización, mediante el intercambio iónico por la dosificación de un exceso de iones de hidroxilo de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, eliminando el magnesio (Mg^{+2}) y produciendo hidroxilo de magnesio $\text{Mg}(\text{OH})_2$, componente más soluble al agua (Ministerio de Sanidad y Política Social [MSPS], 2009).

g) Nitratos y nitritos: La presencia de estos tienen su relación a algún tipo de contaminación en el agua, el proceso de nitrificación dependerá de la temperatura, contenido del oxígeno disuelto y del pH.

Los nitratos (HNO_3) son muy solubles en agua, al igual los nitritos (HNO_2) que se forman a partir de los nitratos por oxidación o reducción bacteriana, es un ion menos estable por lo que participa como agente oxidante y reductor, por lo que se encuentra en condiciones de baja oxigenación y se transforma rápidamente en nitratos. Estos últimos predominan su presencia en agua superficial y subterránea.

El tener un alto contenido de nitratos puede indicar contaminación debido a la presencia de bacterias o en algunos casos indican el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados o acumulación de excretas humanas o animales. Y debido a la solubilidad de estos se mueven con facilidad a las aguas superficiales y subterráneas. Se puede eliminar del agua por medio de la desmineralización o separación por membrana (Barrenechea, 2004).

h) Hierro: Este elemento se encuentra en mayor o menor cantidad y puede ser problemática su presencia. Se presentan dos tipos de iones de hierro el ferroso y el férrico. El primero cambia a estado férrico por oxidación y se precipita de manera inmediata con un $\text{pH} > 5.7$ formado hidróxido férrico y con un $\text{pH} > 2.2$ es insoluble, siendo soluble en un $\text{pH} > 6$, por esto el agua subterránea puede tener cantidades de hierro ferroso (Medina, 2000).

Este metal en solución contribuye al desarrollo de bacterias que forman el óxido férrico que puede generar problemas en las líneas de distribución.

La remoción del hierro es relativamente fácil por medio de la aireación del agua consiguiendo bajar las concentraciones. La normatividad también regula estas concentraciones debido a que puede cambiar el sabor del agua.

i) Manganeseo: En el agua se encuentra en su estado reducido Mn^{2+} , y tiene un comportamiento similar al hierro ya que, al contacto con el oxígeno, forma óxidos hidratados menos solubles, provocando un olor desagradable.

La presencia de este elemento permite el desarrollo de bacterias que también forman sales insolubles por la oxidación. Por lo que para su eliminación se requiere del uso de oxidantes y un pH alto o sistemas de membranas.

Cuando los iones de Fe^{3+} (hierro) y Mn^{2+} (manganeso), están presentes simultáneamente, el primero podrá catalizar al segundo, por lo que se recomienda el uso de antiincrustantes, cuando se emplean sistemas de membranas (MSPS, 2009).

j) Sílice: El silicio junto con el oxígeno son de los elementos más abundantes en la tierra, por lo que forman sílice (SiO_2), normalmente se encuentra en el agua y no contribuye a la dureza, pero si es parte importante de las incrustaciones que se generan, debido a que su solubilidad esta relacionada con la temperatura y al tenerse en sistemas de membranas en los rechazos con el calcio y magnesio pueden formar silicatos que no son fácilmente disueltos, por lo que se recomienda su remoción por membranas cuando no se rebase su concentración en el rechazo en niveles superiores a los 150 mg/L de acuerdo a Medina (2000).

k) Flúor: La concentración de este elemento está en función de la temperatura del agua, la cual se presenta solo en pequeñas cantidades, pero en contenidos altos puede resultar peligroso, ya que al eliminarlo por sistemas de membranas el rechazo es alto y la solubilidad con la salmuera es muy baja, la precipitación puede ser alta.

l) Fosfatos: Encontrar fosfatos en el agua es muy común debido a la eutrofización de las aguas. La presencia de sus complejos afecta los procesos de coagulación, durante el tratamiento del agua.

m) Bario y estroncio: A pesar de que estos elementos no son abundantes en su presencia en el agua y al ser sometidos a procesos de membranas, los sulfatos de estos elementos son menos solubles y pueden precipitar, Para evitar su incrustación se recomienda el uso de hexametáfosfato sódico que actúa como inhibidor o antiincrustante de ambos.

Para eliminar el bario, también se puede emplear el proceso de coagulación y una filtración posterior, de este modo puede conseguirse eliminar hasta en un 30%, pero se debe tener un control adecuado del pH durante el ablandamiento y se puede lograr remover hasta el 90% (Medina, 2000).

n) Boro: Este elemento se encuentra en menor presencia, para su remoción se han empleado procesos de ablandamiento con un pH 8.5 – 11.3, logrando remover hasta el 98% y en menor grado por medio de una coagulación con sulfato férrico (Barrenechea, 2004).

o) Cadmio: Este metal pesado es altamente tóxico, por lo que se puede lograr su remoción con membranas o coagulación con sales de aluminio y regulación del pH, también con sulfato de hierro a un pH de 7.5 se puede remover el 90%. De igual forma se puede emplear un proceso de ablandamiento siendo efectivo en un 100% (Medina, 2000).

p) Cianuro: No es común en aguas naturales, su presencia es debido a problemas de contaminación, pero se ha encontrado una efectiva remoción con la cloración hasta reducirlo a pH neutro o ligeramente alcalino, al igual que el ozono sirve para la oxidación del cianuro.

q) Aluminio: Al igual que los elementos anteriores no se encuentra de manera natural en el agua, pero se puede presentar debido algún tipo de contaminación, se pueden remover por medio de membranas en un pH entre 5 y 6 la precipitación puede ser fácil, pero podrá eliminarse mediante acidificación y además el hidróxido de aluminio puede eliminarse por filtración.

r) Cinc: El agua puede contener este elemento en concentraciones bajas y puede ser soluble tanto en un pH ácido como un alcalino, en aguas residuales su remoción es efectiva al realizar una coagulación con sulfato y en procesos de ablandamiento con un pH de 9.5.

s) Cobre: También se encuentra en bajas concentraciones de manera natural en el agua, en concentraciones altas puede favorecer la corrosión del aluminio y cinc, se ha demostrado que con la coagulación, control del pH y turbiedad puede reducirse su concentración.

t) Cromo: El cromo se encuentra en aguas superficiales de manera natural en su estado reducido Cr^{+3} y el Cr^{+6} , sus compuestos son fuertes agentes oxidantes y son corrosivos. Debido a su solubilidad es más fácil remover el Cr^{+6} que el Cr^{+3} , la cloración puede convertir el Cr^{+3} en Cr^{+6} . Se considera que con una coagulación con sulfato férrico o ablandamiento con cal y control de pH entre 10.6 y 11.3 puede tener una eficiencia del 98% mientras que a un pH de 9.2 su eficiencia baja un 70%.

También puede utilizarse el sulfato ferroso como reductor del Cr^{+6} a Cr^{+3} , el ablandamiento puede remover entre el 80% y 90% de Cr^{+3} pero el Cr^{+6} no se remueve a pH 9.5 (Barrenechea, 2004).

1.3.2 Gases disueltos

Adicional a los elementos primarios y secundarios que pueden estar presentes en el agua como ya se vio anteriormente, también la presencia de gases disueltos determina la calidad del agua, siendo su detección parte de los análisis ya rutinarios para determinar su presencia en cantidad.

Los gases disueltos más comunes son oxígeno, gas sulfhídrico, dióxido de carbono, nitrógeno, anhídrido sulfuroso y amonio.

La solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura y aumenta con la presión, los gases disueltos son factores frecuentemente de corrosión y de precipitación.

A continuación, se describen cada uno de los principales gases disueltos:

a) Oxígeno disuelto: Esta normalmente presente debido a la descomposición de materia orgánica y se encuentra en bajas concentraciones en aguas subterráneas.

El oxígeno disuelto es un gas que varía de forma inversa a la temperatura, es decir, cuando esta se eleva, el oxígeno disuelto está en menor cantidad en el agua. Este es un elemento altamente corrosivo cuando se tiene también un pH bajo, influyendo en la velocidad de ataque, aunque existe como excepción cuando la conductividad eléctrica es alta.

También el agua con presencia de O_2 disuelto favorece la proliferación de bacterias, esto llega a hacer unos de los principales problemas de contaminación en los tratamientos de membranas (Ramalho, 1990).

b) Ácido sulfhídrico: Este elemento es fácilmente detectable ya que aun estando presente en bajas concentraciones genera un olor característico y al tener exposición con el aire produce precipitados de azufre provocando ensuciamiento de membranas.

También se hace presente por la acción de bacterias que, en ausencia de oxígeno y elevado contenido de sulfato, la bacteria cambia el sulfato a sulfhídrico (Medina, 2000).

Este elemento se puede remover por medio de torres de desgasificación y cloración.

a) Dióxido de carbono: El CO_2 se relaciona directamente con la presencia de materia orgánica, por lo que, cuando el agua entra en contacto con el suelo aumenta su concentración de CO_2 y un descenso en el O_2 .

Siendo liberado también como parte del ajuste del pH, así cuando se hace una liberación de CO_2 ocasiona el descenso del pH siendo más corrosiva. En un proceso de membrana se hace presente en el producto, siendo altamente corrosivo. Al momento de liberar el CO_2 , las aguas freáticas provocan la precipitación de carbonatos.

Por lo que al conocer los elementos presentes de forma natural o como efecto secundario de la contaminación presente en el agua, se procederá a indagar en el siguiente capítulo, sobre los procesos de tratamiento para la eliminación de los elementos indeseables en el agua, ya sea por medio de tratamientos primarios, secundarios o nuevas tecnologías.

2. PROCESOS DE TRATAMIENTO

En este capítulo, se revisa cada uno de los tipos de tratamiento existentes para la remoción de elementos no deseados del agua, empleados en la actualidad para la purificación del agua salobre.

Se debe hacer énfasis que la calidad del agua se conforma de parámetros variables que caracterizan el agua y de manera general se puede dividir en tres rubros, el agua para consumo humano a la que se tiene acceso ya sean yacimientos superficiales o subterráneas y el agua de mar, la última se considerada en la actualidad a pesar de no ser clasificada para su uso, pero hoy en día en diversas localidades se han desarrollado sistemas para su tratamiento y lograr su consumo.

En la Tabla 2.1 se puede ver de acuerdo a la OMS los principales parámetros y los valores que llegan a caracterizar el agua según su procedencia.

Tabla 2.1 Características del agua acorde a su origen.

Parámetro	Valores Característicos			
	Agua de pozo	Aguas superficiales	Agua de mar	OMS
Turbiedad (NTU)	<2	>200	<2	<5
Color (UC)	Ausencia	>50	Ausencia	<15
Salinidad (mg/L)	>1000	<400	>30,000	<1,000
Sulfatos (mg/L)	>200	<50		<400
Cloruros (mg/L)	>300	<50	>20,000	<250
Nitratos	>50	<25		<50
Bacterias	Ausencia	Presencia		Ausencia
SDI	<3	>5	<3	<5

Fuente: Ortega, 2001

Como se puede observar los valores son muy variables y aun así en ocasiones el agua puede estar fuera de estos parámetros, por lo que es imprescindible el uso de tratamientos para llevar sus características dentro de los parámetros deseados para su uso, ya sea para consumo humano, uso doméstico o industrial.

Por lo que la selección de los tratamientos a los cuales será sometida el agua dependerá totalmente del uso que se le desee dar.

Los tratamientos que existen para la purificación del agua, para este estudio se dividirán en dos:

- Tratamientos físicos
- Tratamientos químicos
- Tratamientos por membranas

2.1 Tratamientos físicos

Los tratamientos físicos son aquellos que se emplean para realizar la separación de partículas sólidas y materia orgánica suspendida principalmente, empleando como principio básico la filtración.

La filtración de manera general se puede definir como el paso de un flujo a través de un medio filtrante para la retención de sólidos y está puede ser de dos tipos, gruesa y fina.

2.1.1 Filtración gruesa

La filtración gruesa es aquella que se realiza por medio de elementos de mayor tamaño.

Dentro de los tratamientos de filtración gruesa se pueden encontrar:

a) Rejas: Rejillas empleadas para la separación de objetos de gran tamaño, que puedan estar presentes en el efluente por arrastre o contaminación, teniendo como objetivo eliminar elementos que puedan dañar los equipos posteriores del tratamiento o contaminar los procesos subsecuentes.

Los equipos empleados para este proceso pueden ser manuales o automáticos, en el diseño de estos equipos para alturas menores de agua las rejillas suelen ser curvas y para alturas mayores las rejillas deben estar en posición casi vertical a la caída del agua.

b) Tamizado: Los tamices consisten en mallas con una inclinación que permite fluya el agua y obliga a los sólidos presentes a deslizarse a un punto definido para su recolección y disposición final.

2.1.2 Filtración fina

La filtración fina se emplea para la remoción de partículas micrométricas.

Para una filtración fina son variados los procesos y equipos que se pueden emplear, estos son a detalle descritos en textos como el de Medina (2000) y Maldonado (2004) como:

a) Filtros de medio granular: Estos filtros consisten en hacer incidir un flujo de agua sobre uno o más tipos de materiales filtrantes, los medios filtrantes pueden ser de diversos materiales y granulometría, estos pueden ser abiertos o cerrados.

Los filtros abiertos o de gravedad, son filtros que operan a una velocidad entre 5 y $7.5 \frac{m^3}{m^2h}$, lo que implica un mayor espacio para su instalación ya que requieren una forma rectangular y una columna de filtración de al menos 1-1.5 m. En estos filtros se suelen emplear materiales de un tamaño no mayor a 0.35 mm.

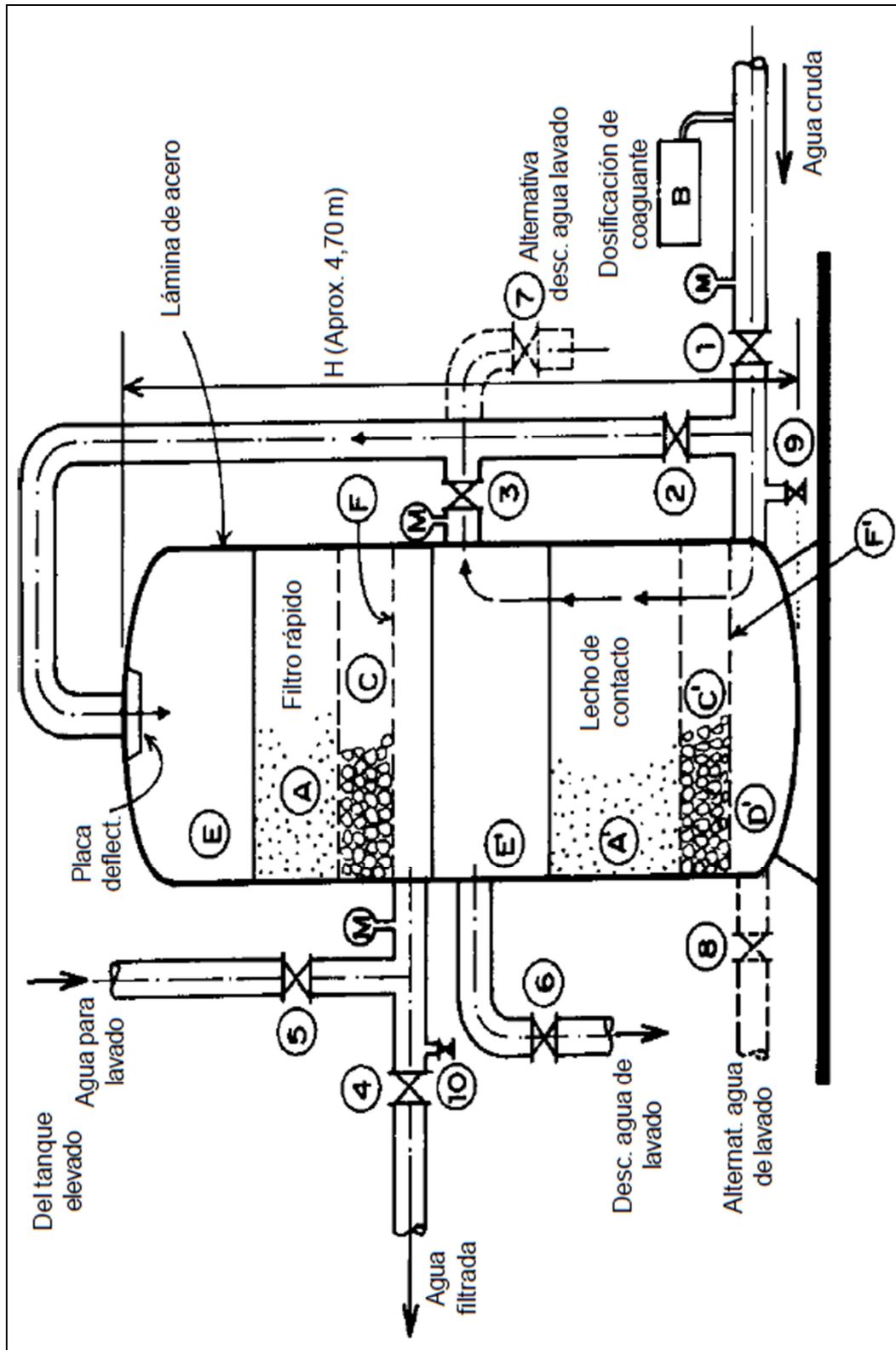
Los filtros cerrados o de presión, trabajan a velocidades más altas operando entre 7 y $12 \frac{m^3}{m^2h}$, siendo equipos en posición vertical u horizontales, son más eficiente y mayormente empleados en posición vertical, estos requieren sistemas de bombeo para lograr los parámetros de operación. Se emplean arenas de tamaños no mayores a 2 mm.

En el medio filtrante se pueden tener una o más capas de materiales de distintas granulometrías, estos se colocan en la parte inferior y se van colocando otras sobre ellas. Algunos materiales empleados son antracita, arena, granete, magnetita, carbón activado, zeolita entre otros.

En los filtros de este tipo la velocidad es un parámetro esencial para su operación, variable que es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia del medio filtrante y el ensuciamiento ya presente, por lo que conforme se presenta una pérdida de carga o caída de presión es necesario realizar una limpieza.

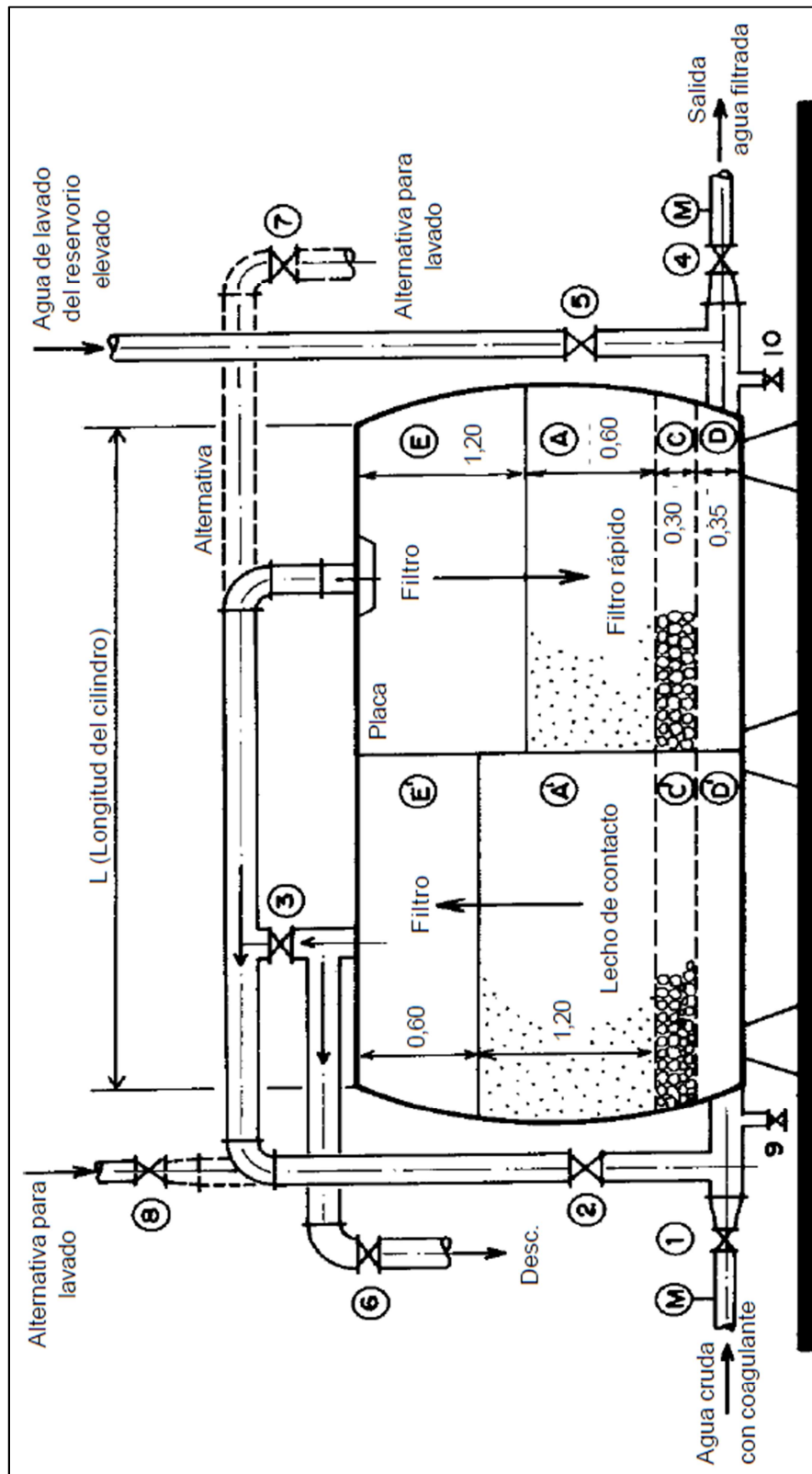
Las limpiezas es indispensable realizarlas cuando las pérdidas de carga son de $0.5-1 \frac{kg}{cm^2}$, para los filtros sujetos a presión y en filtros abiertos de $0.3-0.8 \frac{kg}{cm^2}$. El proceso de limpieza se realiza sometiendo el medio filtrante a ciclos de lavado a contracorriente.

Se puede observar en la Figura 2.1 un filtro del tipo vertical y en la Figura 2.2 un filtro del tipo horizontal.



Fuente: Maldonado, 2004

Figura 2.1 Filtro bajo presión en posición vertical.



Fuente: Maldonado, 2004

Figura 2.2 Filtro bajo presión en posición horizontal.

b) Filtros cartuchos: Este tipo de filtros consisten en hacer pasar el agua al centro del cartucho, el cual permite la retención de los sólidos, estos cartuchos permiten la retención de partículas de tamaño de hasta 5 micras e incluso puede llegar a filtrar tamaños de partícula de 1micra (MSPS, 2009).

Estos equipos suelen ser de una altura de 0.25 m hasta 1.25 m, trabajan con velocidades de filtración de 2 a 3 $\frac{m^3}{h}$ por cada metro de longitud de cartucho con hasta un diámetro de 2 ½”.

Este tipo de filtros al igual que los filtros granulares comienzan a sufrir un ensuciamiento, que se ve reflejado en una caída de presión y es indicativo de cuando es necesario remplazarlo.

Un cartucho se conforma de un eje hueco por el cual se hace pasar el efluente a través de una red de hilos que son enrollados en el eje, el espesor del hilo, el tipo de enrollamiento, la tensión y la presión permiten determinar el tamaño de partículas que será capaz de filtrar.

c) Microfiltración: En este tipo de filtrado el agua se hace pasar a través de las paredes de la membrana donde quedan retenidas las partículas y en la parte central se colectará el efluente filtrado, la microfiltración emplea membranas que se forman de fibras huecas que pueden ser de hasta 1 mm de diámetro, logrando por medio de las membranas una filtración de partículas de hasta 0.1 micra (Rodríguez et al., 2006).

Este tipo de membranas también presentan ensuciamiento, por lo que se deben realizar lavados con agua ya filtrada y aire, estos equipos suelen ser compactos y se deben realizar limpiezas para evitar el daño de la membrana.

Cabe mencionar que con este proceso se pueden filtrar bacterias y virus.

d) Ultrafiltración: Su principio de operación es muy similar a la microfiltración proceso anteriormente descrito, ya que en esta filtración el flujo fluye de manera inversa es decir del interior de la membrana hacia el exterior y se pueden emplear dos tipos de membranas de fibra hueca y en espiral, se puede lograr una filtración de 0.001 micras a 0.02 micras reteniendo materia coloidal y orgánica. El tipo de membranas que se emplean son de fibra hueca, espiral y tubular (Rodríguez et al, 2006).

Al igual que los otros equipos estos pueden presentar ensuciamiento, por lo que también se someten las membranas a procesos de lavado mediante aire y en ocasiones se emplean

reactivos en soluciones que se recirculan por las membranas y se puede lograr una recuperación entre un 85% y hasta un 90%.

e) Nanofiltración: Se emplean membranas semipermeables con un tamaño de poro de $0.001\mu\text{m}$ equivalente a un nanómetro, logrando el rechazo de iones divalentes entre un 90-98%, y los monovalentes de manera selectiva de 50-75% y trabaja a menores presiones que un sistema de ósmosis inversa.

Se emplea para el tratamiento de aguas superficiales y lograr reducir la concentración de elementos indeseados para el consumo, usando membranas de arrollamiento en espiral (MSPS, 2009).

2.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos se emplean para el tratamiento del agua cuando los elementos contaminantes son sólidos o gases producto de contaminantes orgánicos biológicos o algunas otras que no se pueden remover por un método físico.

A continuación, se enuncian los principales tratamientos químicos:

a) Eliminación de hierro y magnesio: Para algunos procesos es indeseable la presencia de iones de ferroso y magnesio, comúnmente se encuentran presentes en aguas subterráneas, por lo que se eliminan con una oxidación forzada para precipitarlos como hierro de férrico o dióxido de magnesio insolubles, como agentes oxidantes se puede emplear el oxígeno del aire, cloro o permanganato potásico.

Para esto es suficiente con realizar inyección de aire y agitando al mismo tiempo, haciendo uso de aireadores y posterior un proceso de filtrado para la eliminación del precipitado.

El mismo método se emplea para la remoción del manganeso, pero se recomienda el uso de un proceso de floculación y/o coagulación debido al pequeño tamaño de partículas (Rigola, 1990).

b) Coagulación y floculación: La presencia de coloides suele ocasionar turbidez y color desagradable en el agua y debido a su imposibilidad de sedimentarse, se aprovecha la presencia de cargas superficiales electrostáticas, que impide su aglomeración y sedimentación.

Por lo que se emplean electrolitos de carga opuesta al coloide, permitiendo la agrupación de partículas coloidales, logrando la formación de un floculo, dando como resultado el aumento del tamaño de la partícula con el proceso de floculación y de este modo se puede lograr la precipitación.

El proceso de floculación se logra por medio de la adición de un polielectrólito y polímeros de alto peso molecular y solubles en agua, permitiendo formar puentes de hidrogeno en las partículas coaguladas.

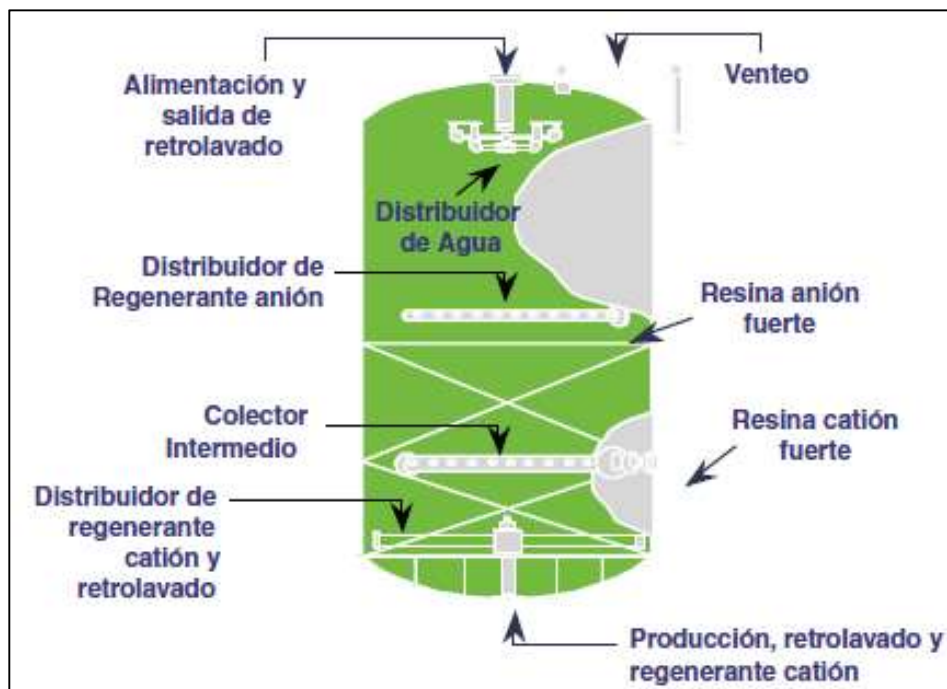
La selección del coagulante y floculante se realiza por medio de ensayos mejor conocido como prueba de jarras. La ejecución de este proceso se suele realizar en dos etapas, la dosificación para ejecutar la coagulación y un proceso de decantación, en la actualidad ya existen equipos mixtos que permiten ambos procesos.

De acuerdo con Barrenechea (2004), los coagulantes que se pueden emplear son sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso y sulfato férrico.

c) Intercambio iónico: Proceso empleado para la eliminación de sólidos disueltos, cuando las concentraciones están presentes entre 1000 y 2000 mg/L la ósmosis inversa es un proceso con mejores resultados.

Las resinas empleadas para el intercambio iónico, tiene la capacidad de eliminar por medio de selectividad los iones disueltos, permitiendo tenerlos unidos en combinación química, hasta que debe cederlos ante una solución fuerte como proceso de la regeneración de la resina.

Las resinas son de un polímero insoluble que forman la matriz de la resina, en ellas el intercambio iónico es reversible, presentan preferencia por ciertos iones y esto es reversible al realizar una regeneración y siempre está presente la electroneutralidad, empleándose normalmente el estireno y el divinil-benceno (Ramalho, 1996). En la Figura 2.3 se observa el esquema general de un intercambiador de iones.



Fuente: MSPS, 2009

Figura 2.3 Esquema general de un intercambiador de iones.

Existen cuatro principales tipos de resinas de acuerdo con Rigola (1990):

- Catiónica fuerte: Capaz de eliminar todos los cationes del agua, tienen una máxima selectividad para catiónicos trivalentes, intermedio para los divalentes e inferior para los monovalentes, pero sus costes de regeneración son muy altos.
- Catiónica débil: Este tipo de resinas captan el calcio y magnesio que corresponde a la alcalinidad bicarbonatada, liberando ácido carbónico el cual se puede eliminar de manera económica y sencilla por medio de una desgasificación, este tipo de resinas operan en un rango inferior a un pH de 7, llegando a tener el doble de capacidad catiónica fuerte, para su regeneración se puede emplear el residuo de la regeneración de una resina fuerte, también presentan mayor resistencia a los oxidantes como el cloro.
- Aniónica fuerte: Eliminan todos los aniones de ácidos débiles y fuertes, operan en cualquier rango de pH, su selectividad de aniones divalentes es superior a los monovalentes, éstas son menos estables que las catiónicas, su duración es inferior y su resistencia a bajar temperatura es mayor. Se suelen utilizar columnas previas de carbón activado o una resina aniónica débil.

Elimina de mejor manera el sílice y logra una mejor calidad del agua, pero su regeneración es más compleja, su resistencia a temperaturas altas oscila entre los 32 °C y 60 °C.

- Aniónica débil: Empleados para eliminar los aniones de ácidos fuertes, pero no de los ácidos débiles, estos trabajan en un rango de pH superior de 6, su capacidad es el doble de las aniónicas fuertes y resisten ensuciamiento orgánico. Su uso se suele dar posterior de una resina catiónica fuerte, para reducir los costos de retrolavado y proteger a la aniónicas fuertes de la materia orgánica y eliminar el cloro.

Como parte del intercambio iónico existen procesos muy comunes como:

- La descarbonatación y ablandamiento con cal: Este proceso se usa para reducir la alcalinidad bicarbonatada, también puede usarse con sosa para la eliminación de la dureza, este proceso se realiza con el uso por lo general de una columna con resina catiónica fuerte, que se regenera con una solución de sal común, por lo que su operación suele ser económica

Este proceso se debe trabajar a valor de pH de 9.2 y en caso de querer eliminar la presencia de magnesio como hidróxido magnésico, se debe emplear en un pH de 10.5. Para lograr eliminar los bicarbonatos se debe emplear de 5 a 2 mg/L, posterior se puede realizar un proceso de coagulación en caso de tener un precipitado muy fino (Rigola, 2009).

Cabe mencionar que al realizar el precipitado de hidróxido magnésico, simultáneamente se realiza la eliminación de sílice, en caso de requerir un tratamiento adicional para el sílice se puede utilizar óxido de magnesio, pero actualmente se prefiere el intercambio iónico.

- La desmineralización: Es la opción de combinar los cuatro tipos de resinas básicas para conseguir la calidad de agua requerida, se pueden realizar combinaciones de estos con desgasificadores para mejorar la eficiencia de la operación.

Sin olvidar que un proceso de intercambio iónico debe ir acompañado de un correcto pretratamiento, eliminando la materia en suspensión y la coloidal, ya que pueden provocar el ensuciamiento o taponamiento de las resinas, de igual forma sucede con aceites y gases, una decantación y una filtración.

Uno de los sistemas más empleados consta de dos columnas de catiónico fuerte y aniónico fuerte, se suele emplear en instalaciones de baja inversión, donde las conductividades requeridas son entre 5 y 20 microsiemens y la sílice no es problema ya que puede tener valores

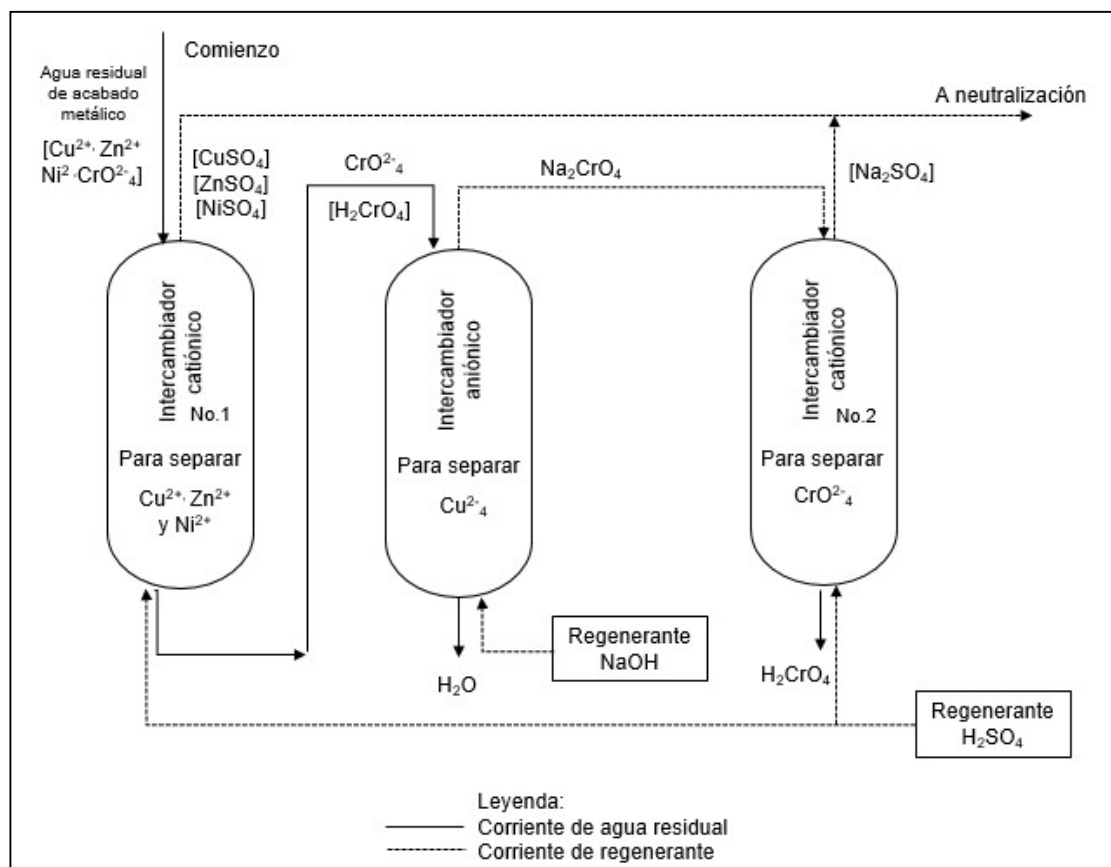
de 0.02 a 0.15 mg/L, se puede emplear un desgasificador en caso de tener una alcalinidad alta.

En caso de tener agua con alta alcalinidad y dureza, se debe incluir una resina catiónica débil antes de la catiónica fuerte.

En aguas con altos porcentajes de sales de ácido fuerte, situando a la resina aniónica débil antes de la aniónica fuerte, se logra una regeneración más económica.

Si se desea una calidad de agua superior, se puede realizar el uso de un lecho mixto con resinas aniónicas y catiónicas fuertes, mezcladas en una misma columna, generando un lecho que al final del proceso es usado como un pulido final. Con eso se puede lograr conductividades inferiores a 1 microsiemen y concentraciones de sílice entre 0.01 y 0.05 mg/L.

Como se muestra en la siguiente Figura 2.4, se puede observar un sistema de intercambio iónico conectado en serie, para lograr la desmineralización.



Fuente: Ramalho, 1990

Figura 2.4 Diagrama de flujo de un intercambiador iónico.

d) Desgasificación: Proceso empleado para la eliminación de gases generados por la materia orgánica disuelta como el oxígeno y nitrógeno, así como el dióxido de carbono y el ácido carbónico, otros gases que pueden estar disueltos son el SH_2 (Sulfhídrico), NH_3 (Amoníaco) y HCN (Cianuro de hidrógeno).

En este proceso la transferencia de masa es proporcional al área superficial de la masa líquida en contacto con el gas que la rodea y a la diferencia de las presiones parciales entre las dos fases, por lo que es ideal producir la mayor área posible en forma de pequeñas gotas, esto puede ser posible por una superficie de un material relleno de gran área específica o haciendo burbujear el gas en el seno líquido.

En la desgasificación por aireación, normalmente empleada para eliminar el dióxido de carbono de soluciones acuosas, se emplea una corriente intensa de aire, mientras el agua resbala por el material de una columna de relleno o bien desciende a través de platos perforados.

El uso de torres con relleno logra descender la concentración del CO_2 en un 90-95%.

e) Electrodialisis: Este proceso se basa en el uso de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Al ser la energía eléctrica el principio de operación, su coste se vuelve elevado, pero se elimina el uso de reactivos, así como presencia de lodos y la selectividad se puede controlar con el potencial del electrodo permitiendo seleccionar la reacción electroquímica (Schoeman y Thompson, 1998).

- Oxidación de ánodo: En el ánodo se produce la oxidación de los compuestos a eliminar, tanto orgánicos como inorgánicos. Esta oxidación se puede producir directamente por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo o bien por la generación de un agente oxidante in-situ. Con algunas otras aplicaciones de la oxidación se logra el tratamiento de cianuros, colorantes, compuestos orgánicos tóxicos, incluso oxidación del cromo III y VI. Sus rangos de concentraciones son muy amplios.

- Reducción del cátodo: Su principal aplicación es la reducción de metales tóxicos, reducción de metales catiónicos, siendo una primera etapa de deposición del metal sobre la superficie del cátodo que ha de continuar la remoción del mismo, por medio de un raspado en una disolución en otra fase.

La aplicación de este proceso suele ser en aguas salobres y puede tratar salinidades desde 7,000 mg/L y hasta 2,000 mg/L, logrando calidades de hasta 500 mg/L. Las membranas suelen ser de poliestireno, con grupos sulfonados las catiónicas y grupos amonio las aniónicas. Se construyen en láminas planas que contienen un 30-50% de agua, para mantener la electroneutralidad, cada carga fija debe estar asociada con un ión de carga opuesta, los contra iones se mueven fácilmente. La semipermeabilidad no es perfecta pero la selectividad supera el 90%.

Estos equipos se componen de una multitud de membranas aniónicas y catiónicas dispuestas alternativamente, en una sección el agua se desaliniza y en los dos contiguos se encuentran iones. Se realiza con proceso inverso cada 3 o 4 horas y cambia su polaridad de la corriente, eliminando los depósitos que se forman en las membranas sin embargo también se debe tener cuidado del ensuciamiento de coloides y polielectrólitos.

El uso de un pretratamiento apropiado debe eliminar materia coloidal, óxidos de hierro, manganeso, el cloro con carbón activado y sulfito sódico ya que atacarían la membrana.

f) Destilación: Es un proceso de uso poco común debido a los costes de operación y mantenimiento, este proceso consiste en calentar el agua hasta el punto de ebullición pasando a forma de vapor, mientras que las impurezas no volátiles permanecen en el recipiente de partida. Se hace pasar el vapor a través de una cámara refrigerante que condensa el agua destilada. Se logran eliminar virus, bacterias y pirogénicos, pero se puede tener un pequeño arrastre de materia disuelta y coloidal.

Este tipo de proceso suele ser empleado para el agua destilada en la industria farmacéutica y en algunas otras aplicaciones.

2.3 Tratamientos por membranas

En los últimos años desde la década de 1960 el desarrollo tecnológico, investigaciones y uso de las membranas para el tratamiento del agua ha incrementado, permitiendo obtener una mayor calidad en el agua tratada, así como una mayor cantidad.

Definiendo que una membrana, es una membrana semipermeable, siendo una lámina fina de material capaz de separar sustancias en función de sus propiedades físicas y químicas, cuando se aplica una fuerza directa sobre la misma y estas se clasifican en función de las

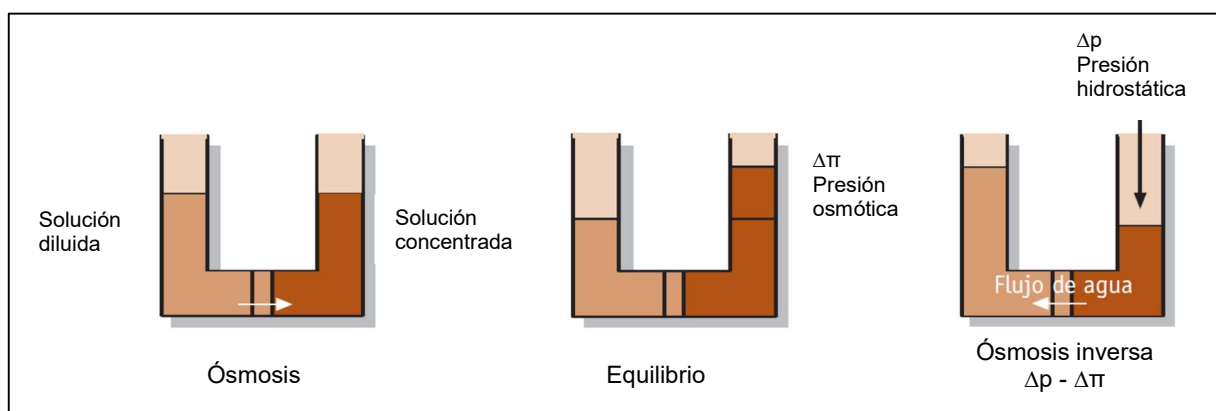
sustancias que separa y las fuerzas empleadas (Mallevialle et al, 1998), dentro de los tratamientos de membranas se pueden encontrar:

a) Ultrafiltración: Empleada para procesos de clarificación y desinfección ya que logra retener, virus y bacterias, sus presiones de trabajo son muy bajas 50 – 500 kPa.

b) Microfiltración: Muy similar a la ultrafiltración radicando su diferencia en el tamaño de poro de membrana que este puede llegar a ser de 0.1 μm , empleándose principalmente para la remoción de partículas o clarificación.

c) Nanofiltración: También llamada ósmosis inversa a baja presión, diseñada para eliminar iones polivalentes principalmente calcio y magnesio, permitiendo un proceso de ablandamiento en el agua, en los iones monovalentes se presenta una muy baja eficiencia, en los últimos años se ha empleado también para la remoción de materia orgánica, sus presiones de trabajo oscilan entre 0.5 – 1.5 MPa.

d) Ósmosis inversa: Esta es una de las tecnologías emergentes de las últimas décadas, basada en el proceso natural que se produce en las células de los seres vivos, fenómeno en el cual la solución de distintas concentraciones salinas al entrar en contacto a través de una membrana semipermeable tiende a igualar las concentraciones. Produciéndose un movimiento de la solución más diluida hacia la más concentrada, deteniéndose una vez que se alcanza el equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que permite este movimiento se le conoce como presión osmótica y se relaciona con concentración de sales en el interior de ambas soluciones, la Figura 2.5 explica el proceso de ósmosis inversa:



Fuente: Rodríguez et al., 2006

Figura 2.5 Ósmosis inversa.

Cuando dos soluciones de diferente concentración o salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una pared impermeable, cada una de ellas alcanza en el depósito correspondiente una altura que únicamente tiene relación con el volumen de la solución y el diámetro del depósito, si se igualan las alturas de las soluciones de los dos recipientes se obtendría un resultado como en la primera imagen.

Si se sustituye la pared por una membrana semipermeable se producirá el movimiento a través de la membrana desde la solución más diluida a la más concentrada, como observa en la Figura 2.5, este proceso se detiene cuando alcanzan un desnivel entre ambos tubos, que corresponde a una presión osmótica entre ambas soluciones.

Si la diferencia de presión que impulsa el agua a través de la membrana se invierte aplicando una presión en el tubo de la solución concentrada, el movimiento se produce desde esta hacia la más diluida, hasta que alcance un equilibrio en función de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.

Este proceso es el conocido como ósmosis inversa. Es llamado así porque para conseguir un flujo de solvente a través de las membranas hay que ejercer una presión suficiente para vencer la presión osmótica de la solución.

En el proceso habitual no es necesario vencer la presión osmótica de la solución de alimentación, sino solo la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y producto, esta presión dependerá del flujo de agua a través de las membranas y las características de las membranas.

La membrana como mínimo deberá cumplir con ciertas características:

- Debe resistir las presiones a que se va a someter la solución para invertir el proceso.
- Permeabilidad al agua para que el flujo que proporciona sea elevado.
- Rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

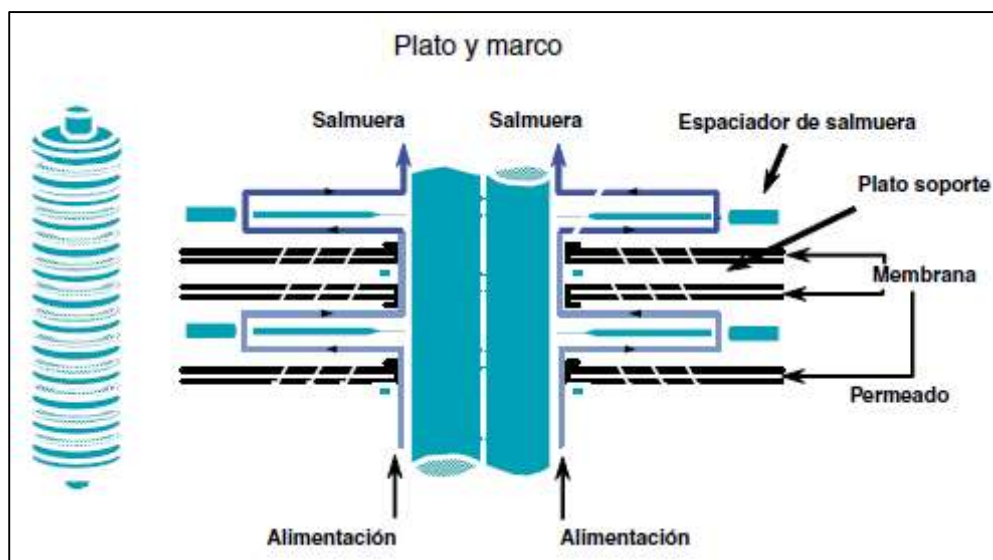
Las membranas utilizadas en la ósmosis inversa, rechazan las sales que crecen con la carga de iones (SO_4^{2-} , Cl^- , Al^{3+} , Ca^{++} , Na^+), los compuestos poco ionizados, ácidos y bases débiles; son poco rechazados o nada rechazados. Los gases no son rechazados y atraviesan la membrana. Los compuestos orgánicos de bajo peso molecular y no polarizados tienden a pasar, con un peso molecular inferior a 200 casi todos pasan, pero el rechazo aumenta con el

peso molecular y las formas polimerizadas, formando complejos que son rechazados y también las bacterias y virus. El paso del agua y sales aumenta con la temperatura. Los valores estándar de temperatura son de 25 °C y las condiciones deben ajustarse a la temperatura real, un solo grado centígrado representa un aumento de caudal de hasta un 2% o 3%. Este tipo de aplicación permite la filtración de partículas con diámetros de hasta 0.0001 μm .

La membrana es una lámina muy delgada que por sí sola no soportaría los esfuerzos a que se somete y su caudal es muy reducido, por lo que se deben integrar en una estructura mecánica que permita soportar los esfuerzos y ocupar el menor espacio posible, lo que ha llevado al desarrollo de cuatro configuraciones principales (Tylor y Jacob, 1998):

1.- Membrana de tipo plano: Esta es la más sencilla y la primera que fue utilizada, se constituye por una lámina que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte de la membrana, le da rigidez y resistencia. La superficie de estas membranas es pequeña, por lo que para aumentar la producción de los equipos que disponen de estas membranas, se colocan una encima de otra, constituyendo pilas o columnas de membranas.

La sujeción se hace por medio de pasadores que presan desde la parte externa de las membranas y dan un aspecto más compacto y monolítico. En la Figura 2.6 se observa el arreglo de una membrana del tipo plano.



Fuente: MSPS, 2009

Figura 2.6 Membrana de tipo plano.

La película empleada como membrana no difiere de otras pues tiene características similares para el rechazo y el caudal. El inconveniente de estas membranas es que son de pequeña capacidad productiva, por lo que se requieren numerosas membranas en pilas, que son voluminosas y se encarecen enormemente los costes.

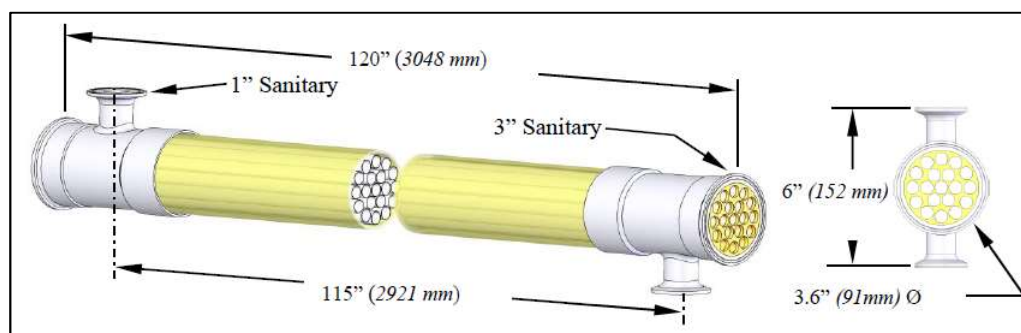
Una de sus principales ventajas es la separación entre membranas que puede ser de 1 a 3mm, es amplia, por lo que se obstruyen menos que otras y en caso de ensuciamiento se limpian fácil y eficazmente con aire y agua, en caso de que el ensuciamiento sea persistente, se puede realizar la limpieza desmontando las pilas. Su uso suele ser en aguas muy contaminadas, residuales o con elevada carga orgánica.

2.- Membranas tubulares: Con esta configuración se consigue una mayor superficie unitaria, pero sin renunciar a las ventajas de fácil limpieza.

Por lo general son membranas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, se alojan en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presión del proceso, en ocasiones se colocan varias membranas en el interior de un tubo de 1.5 a 2" de diámetro, el tubo lleva orificios que permiten la entrada y salida de los flujos del agua que intervienen en el proceso.

En este tipo de membrana, la alimentación se realiza por el interior se alimenta a la membrana y el permeato se obtiene en la parte exterior de la misma, por lo que para aumentar la capacidad en la instalación se colocan varios tubos en paralelo, pero aun así resulta pequeña para tratar grandes volúmenes.

Su uso se ha hecho de práctica común en el tratamiento de agua para instalaciones industriales. En la Figura 2.7 se puede ver la configuración de una membrana del tipo tubular.



Fuente: Koch, 2017

Figura 2.7 Membrana tubular.

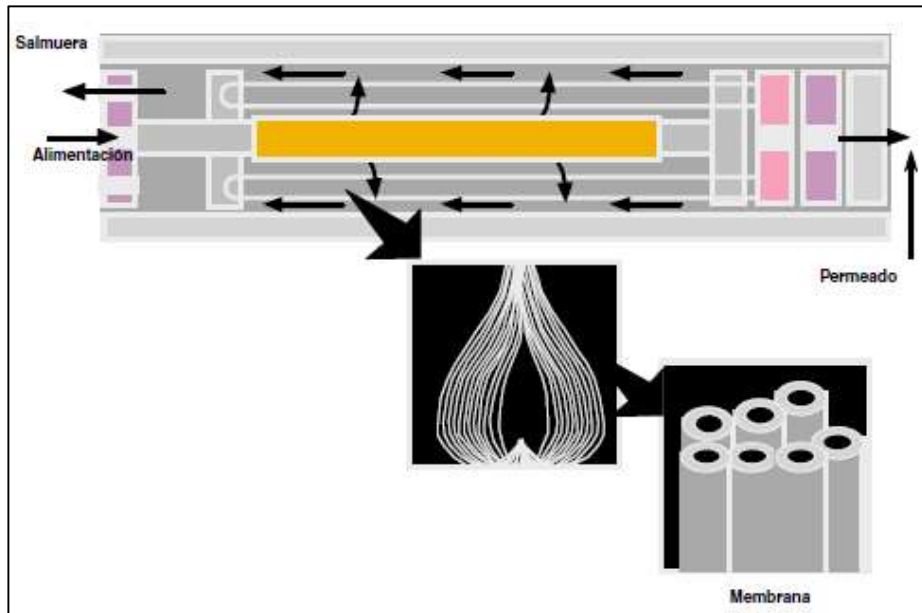
3.- Membrana de fibra hueca: Se forman de un haz de millones de tubos capilares del tamaño de un cabello humano, huecos en el interior.

Las primeras membranas de este tipo fueron de acetato de celulosa y producían un caudal muy pequeño, por lo que se planteó una membrana muy delgada para aumentar su caudal, colocado dentro de un tubo como carcasa protectora que permite la circulación de una solución a desalar.

En estos tubos para evitar la corrosión se emplea un material plástico de alta resistencia como el PRFV (plástico reforzado con fibra de vidrio), entrando el agua por un extremo del tubo o carcasa y se distribuye de un tubo central provisto de perforaciones en dirección a las paredes del tubo. Las fibras se colocan paralelas alrededor del tubo central, doblándose en uno de los extremos y retornando del otro, de forma que la longitud de cada fibra es del doble del tubo.

Por ambos extremos del tubo las fibras quedan incrustadas en material epóxico para darle rigidez. Posterior se corta en los extremos del tubo, facilitando la salida del producto y asegurando su rigidez en la sujeción. El conjunto de estas se llama modulo o membrana y esto ayuda a resistir las presiones aplicadas.

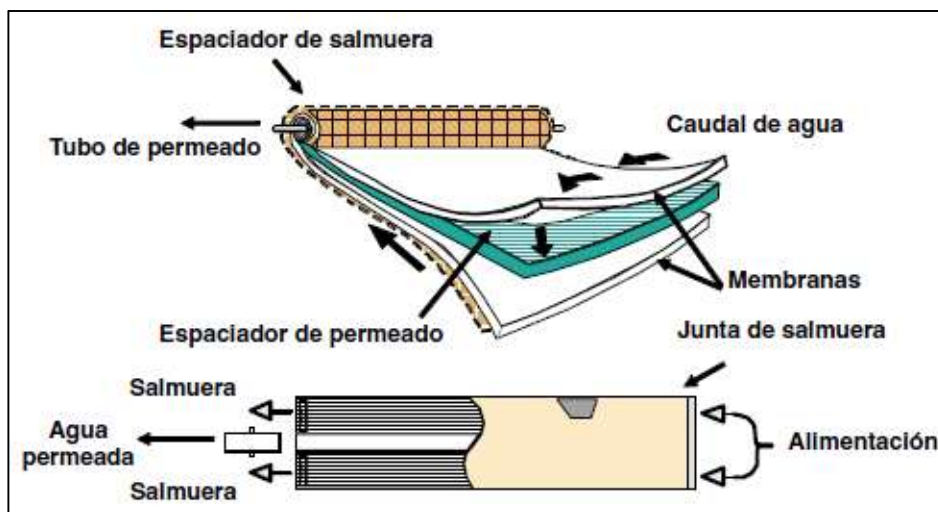
En estas membranas el agua a presión se aplica a la membrana desde el exterior del capilar y la pared de la fibra actúa como lámina o membrana separadora reteniendo sales, mientras que en el interior circula el agua producto que ha atravesado las membranas, la salmuera es desplazada de manera radial hacia los bordes del tubo siendo recogida mediante un colector para su eliminación. En la Figura 2.8 se observa el arreglo de una membrana de fibra hueca.



Fuente: MSPS, 2009

Figura 2.8 Membrana de fibra hueca.

4.- Membrana de enrollamiento en espiral: Se forman por láminas rectangulares, que se enrollan alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten colectar el agua producto. Para el enrollamiento de las láminas desaladoras se disponen alternadas por un separador impermeable y una malla, de forma que en la membrana enrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas, la Figura 2.9 muestra el arreglo general de una membrana de fibra hueca.



Fuente: MSPS, 2009

Figura 2.9 Membrana de enrollamiento en espiral.

La malla plástica determina los canales hidráulicos por los que circula el agua a tratar y su forma cuadriculada garantiza un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce las posibilidades de taponamiento por elementos extraños.

El separador impermeable permite aislar el caudal que pasa por cada una de las láminas o membranas y separarlo de la salmuera.

El conjunto de membranas, mallas y separadores, se sella mediante un pegamento por los tres lados, mientras que por el cuarto lado que constituye la única salida posible para el agua que ha atravesado las membranas y se une al eje perforado.

Se cierra el conjunto con una capa exterior de poliéster con fibra de vidrio.

Este tipo de enrollamiento permite introducir una gran superficie de membrana en un espacio reducido, logrando reducir el espacio ocupado por las membranas considerablemente, aumentando la capacidad de los módulos y reduciendo los costos.

Estas últimas dos configuraciones de membranas, son las que se emplean para los tratamientos de agua en los procesos de desalación.

Las membranas hoy en día se fabrican de dos materiales acetato de celulosa y poliamidas, las membranas de acetato de celulosa han sido mejoradas con distintas mezclas de polímeros de acetato y triacetato de celulosa.

Son membranas sensibles al pH, son de caudal moderado y susceptibles al ataque biológico, pero permiten la cloración. La superficie es lisa por lo que resulta poco susceptible al ensuciamiento, empleándose para el tratamiento de aguas residuales.

El triacetato de celulosa produce un caudal más reducido pero el material es más resistente, por lo que se emplea en membranas fibrilares o de fibra hueca, compensado el menor caudal con una mayor superficie que implican las fibras.

Las membranas de poliamida alifática y aromática representan, una nueva generación, con muchas ventajas, teniendo caudales y rechazos superiores, logrando operar a presiones más bajas.

Todas las membranas son de manera general muy sensibles al cloro, el material de soporte de la membrana es poroso de polisulfona o de polipropileno. Existen dos tipos de poliamidas

aromáticas, una con grupos carboxílicos base de las membranas en espiral y la de sulfónicos empleadas en las membranas de fibra hueca.

Al mismo tiempo las membranas cuentan con características que les confieren propiedades que nos permiten su uso en función de las necesidades que se tengan, a continuación, se explican algunas de estas características:

a) Rechazo de sales: Esta es su característica principal, el rechazo de iones depende del tipo de iones y otras variables como el tamaño de molécula, el radio iónico, la carga eléctrica y la interacción entre diferentes iones y el solvente, de manera general las membranas retienen mejor los iones polivalentes que los monovalentes, así mismo el rechazo de iones divalentes es siempre superior al rechazo total de iones de la membrana y el rechazo de iones monovalentes inferior al mismo.

Se puede decir que las membranas actúan como un filtro para las moléculas que tienen un peso superior a 200.

El rechazo de sales en sistemas de agua de mar ronda en un 99.2% y en aguas salobres entre el 85% y 95%. En la Tabla 2.2 se observan los porcentajes de rechazo de sales en función del tipo de membrana.

Tabla 2.2 Rechazo de iones según el tipo de membrana.

Iones	Agua salobre PA	Agua salobre CA	Agua de mar	Nanofiltración
TDS	90-99	85-92	99,2-99,6	65-80
Na ⁺	92-98	90-95	99,2-99,6	40-60
K ⁺	92-96	85-95	99,3-99,6	60-75
Ca ⁺⁺	93-98	92-95	99,4-99,8	85-92
Mg ⁺⁺	93-98	94-97	99,3-99,8	75-85
Cl ⁻	92-95	90-95	99,2-99,5	50-70
SO ₄	96-98	96-98	99,4-99,7	80-94
CO ₃ H-	93-97	85-95	99,3-99,6	75-90
PO ₄ ³⁻	95-98	95-97	99,4-99,7	85-95
NO ₃	90-95	50-70	99,3-99,5	85-90
SiO ₂	80-90	80-90	99-99,2	85-92
Bo ⁺⁺	50-70	85	99-99,3	60-75
F ⁻	92-95	85-90	99-99,3	60-70

Fuente: Medina, 2000

b) Rechazo de bacterias: Al tener las membranas el tamaño de un poro tan pequeño, logran la separación de bacterias, virus y pirogénicos, por lo que el uso de estas como método de desinfección es muy seguro y efectivo. Por lo que el detectar bacterias en el agua producida a través de la membrana es aviso de alguna anomalía en la membrana.

En ocasiones también se puede generar por la proliferación de bacterias en el medio de la membrana, por lo que se hace recomendable el uso de un proceso de desinfección en el agua que se va a tratar.

c) Compuestos orgánicos: La materia orgánica es retenida en grado diferente, las moléculas de mayor peso molecular son retenidas mejor que las de menor peso molecular.

Los ácidos orgánicos y aminos pasan en mayor proporción por la membrana que los iones, pero muchos compuestos como fenoles, hidrocarburos, clorados de bajo peso molecular y otros con derivados halogenados, pesticidas y alcoholes de bajo peso molecular están presentes en el agua producto casi en la misma proporción que en el agua tratada.

Pero sustancias complejas que originan el color son eliminadas en su totalidad, también hay compuestos orgánicos que pueden afectar las membranas como algunos polímeros.

El rechazo que presentan las membranas a los compuestos orgánicos depende del material de la membrana, siendo más eficientes las de poliamida que las de acetato de celulosa, como se puede ver en la Tabla 2.3 de comparativa.

Tabla 2.3 Rechazo de compuestos orgánicos por las membranas.

Solución orgánica	Poliamida	Acetato celulosa
	Rechazo en %	
Metanol	41	6
Etanol	86	12
Propanol	94	25
Fenol	87	2
Clorofenol	83	21
Formaldehído	70	20
Acetaldehído	80	69
Acetona	96	22
Ciclohexano	98	37
Acido acético	70	24
Acido láctico	89	13
Acido benzoico	82	18
Etilamina	92	11
Anilina	96	5
Urea	80	9

Fuente: Medina, 2000

d) Resistencia al cloro: El cloro en su forma de hipoclorito sódico y potásico, así como en forma de gas son altamente empleados en pretratamientos, las membranas solo tienen cierta tolerancia al cloro y depende del tipo de membrana.

Las de acetato de celulosa admite concentraciones moderadas en largos periodos de tiempo, pero conforme aumenta la concentración, la resistencia en la membrana es menor.

Algunas membranas pueden soportar dosis de cloro continuo si la concentración es menor a 1 mg/L y en cortos periodos pueden soportar dosis superiores, dando la oportunidad de someter la membrana a proceso de desinfección.

Las membranas de triacetato de celulosa, mezclas de acetato, triacetato son algo más resistentes, pero siempre en límites moderados. Las membranas de poliamida son resistentes al cloro.

La configuración de enrollamiento en espiral, de poliamida alifática se destruyen con el cloro casi instantáneamente, mientras que las de poliamida aromática soporta dosis máximas de 0.1 mg/L en cortos periodos de tiempo, algunos proveedores de membranas aseguran la funcionalidad de la membrana con un máximo de 1 mg/L.

Se ha comprobado que las membranas de fibra hueca de poliamida tienen una mayor resistencia al cloro esto se debe a dos factores, el espesor de la pared respecto al diámetro de fibra es mayor y son membranas dinámicas, donde su capa de recubrimiento puede tener una aplicación periódica.

En el caso de ser necesario emplear un tratamiento para evitar el desarrollo biológico se puede emplear un reductor para evitar un daño irreversible de la membrana.

e) Condiciones hidráulicas: Para un correcto funcionamiento de la membrana es necesario que tengan velocidades óptimas de circulación. Es necesario que el flujo de salmuera sea constante y uniforme, el caudal de alimentación se debe de mantener dentro de unos valores, lo que implicaría fijar flujos mínimos, en función del tamaño.

Cabe destacar que el flujo de la membrana lo rigen cuatro factores: la presión osmótica, permeabilidad de la membrana, el espesor de la membrana y la difusión o diferencia de concentraciones.

Determinar el flujo de la membrana es importante ya que es el volumen que la atraviesa por unidad de área de membrana en un periodo de tiempo determinado y una presión determinada, este valor nos permitirá definir cuantas membranas se deberán disponer en los módulos para lograr los consumos requeridos y calidad deseada.

Se debe tener en cuenta que a medida que empeora la calidad del agua, se va reduciendo el flujo en la membrana.

Abajo se observa en la Tabla 2.4 las diferencias de flujo que se logran por calidad de agua y tamaño de membrana.

Tabla 2.4 Superficie eficaz de diferentes membranas.

Membrana	4"		8"	
	Superficie m ²	Caudal m ³ /día	Superficie m ²	Caudal m ³ /día
Tipo				
Agua salobre	6.7-7	7.2	30.6-34	30.3-34
Agua salobre magnum			48-54	48-54
Agua de mar	6-6.5	4.2	27.8-29	19
Agua de mar magnum			44-46.4	30-33
Baja presión	7-7.5	4.5	30.6-37	18.2
Nanofiltración	7.5-8	6.1-8	34-37	26-40
Acetato	7.5	7.6	31.6	30.3
Acetato magnum	11.6	12.3	49	49.2

Fuente: Medina, 2000

g) Carga electroforética: Las membranas en la superficie tienen una carga eléctrica o electroforética, como consecuencia de los elementos químicos empleados en la fabricación, estas cargas retienen materia orgánica y coloides, así como radicales de los productos químicos usados en el pretratamiento, es importante tener este valor presente para elegir un correcto pretratamiento y productos de limpieza más adecuado, para evitar atracciones unos con otros y deteriorar la membrana.

h) Concentración de polarización: El rechazo de sales de las membranas es limitado, por lo que la concentración de éstas depende de la concentración que posee el agua de alimentación a la entrada, las sales disueltas en el agua son transportadas hacia la membrana. Como la difusión no se realiza en la misma proporción, se produce una acumulación de sales en la superficie de la membrana. Para eliminarla se debe utilizar la difusión mediante un proceso de transferencia de masa en conjunto con movimientos hidrodinámicos.

Junto a la membrana se desarrolla una capa límite de disolución agitada, estancada, de la que se extrae agua y en la que las sales rechazadas se van acumulando, dando lugar al efecto de polarización concentrada.

La concentración de la polarización se ve afectada por:

- El movimiento de convección de las sales hacia la membrana y su difusión fuera de la misma.
- El rechazo de sales.
- La presencia o ausencia de flujo transversal en la superficie de la membrana.
- Las interacciones entre los distintos componentes del agua de alimentación.

Y tiene efectos negativos:

- El aumento de sales en la interface aumenta con la presión osmótica y disminuye la presión efectiva que impulsa el agua a través de la membrana.
- Aumento de sales en el agua producto.
- Precipitaciones de los componentes disueltos.

La polarización no se puede eliminar, pero puede reducirse: haciendo la solución turbulenta para mantener dicha capa límite lo más delgada posible, establecer canales de flujo para reducir los efectos de entrada, ajustar el flujo y limitar el rechazo.

El grado de polarización de la concentración aumenta proporcionalmente al flujo del disolvente y también es proporcional a la presión aplicada. Cuando se hace un aumento en el flujo y solo se tiene un aumento de presión osmótica se ha encontrado la velocidad máxima de flujo.

3. AGUA PARA PROCESO DE PINTURA AUTOMOTRIZ

3.1 Disponibilidad del agua

En los capítulos anteriores se ha fundamentado la composición del agua y los diferentes tipos de tratamientos existentes para su purificación y poder obtener la calidad de agua deseada, ahora se analizará su disponibilidad a nivel mundial y localmente en el caso de estudio del presente trabajo.

El agua tiene características químicas muy variables al igual que su disponibilidad, lo que hace que su acceso y uso sea limitado.

A pesar de vivir en un planeta que está compuesto en un 99% de agua, su uso y disponibilidad es muy baja, tan solo el 0.01% está disponible y cuenta con la calidad para su uso, por ello es que el ser humano ha enfocado parte de su desarrollo científico al estudio, investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan incrementar la disponibilidad y mejorar la calidad del agua para su uso. La Tabla 3.1 explica la calidad que se puede llegar a tener del agua dependiendo de su origen.

Tabla 3.1 Calidad del agua en relación a su origen.

Origen	Conductividad	SDT	Na	SiO ₂	COT
	S/cm	ppm	ppm	ppm	ppm
Mar	51000	36000	11000	1-20	1-10
Residual urbana	600-2000	500-1500	50-200	5-20	100-300
Río	100-3000	50-2000	5-800	2-20	100-300
Pozo	150-1000	100-600	1-100	10-30	<1
Pozo salobre	1200-10000	800-6000	150-1500	1-20	1-5
Municipal	600-2000	400-1200	15-150	1-6	2-6
Desmineralizada	2-20	2-10	1-5	0.01-0.1	1-4

Fuente: Rigola, 1990

El actual crecimiento poblacional ha generado consigo una globalización que ha llevado implícito el desarrollo de nuevos proyectos tanto en el sector privado como en el público, con el objetivo de lograr abastecer de bienes, productos y servicios a la población, siendo partícipes todas las industrias de los distintos ramos desde la alimentaria, farmacéutica, textil, automotriz, petrolera, minera, entre otras; quienes se han desarrollado con un rápido crecimiento y optimización de sus propios procesos, produciendo con ello un aumento en el empleo de recursos naturales y disminución de los mismos, para cubrir los volúmenes de producción demandados por la población.

Teniendo como necesidad para la producción y distribución de estos productos y servicios, primordialmente el uso de algunos recursos naturales como combustibles, agua, metales, petróleo, gas y electricidad, algunos de estos recursos son considerados como materia prima, para la producción de productos y la mayoría de estos recursos son clasificados como no renovables, actualmente la disponibilidad y la calidad de estos recursos son base de estudio, para la definición de las localidades en las que se desarrollarán, instalarán e implementarán los nuevos proyectos, para lograr cubrir las necesidades de la población.

Bajo estadísticas dadas en los últimos cinco años el crecimiento poblacional a nivel mundial ha ido desde 1.35% al 1.49% (Grupo Banco Mundial, 2017), tendiendo en México un aumento poblacional del 1.23% al 1.25%, trayendo consigo también un crecimiento económico mundial según reportes estadísticos del 3.0% al 4.3% (Grupo Banco Mundial, 2017) y nacionalmente en México el crecimiento económico reportado del 1% al 4%.

Con estas estadísticas de crecimiento poblacional y económico a nivel mundial y nacional, también se ha generado una creciente preocupación por la disponibilidad y calidad de recursos vitales como lo es el agua, siendo hoy en día este uno de los recursos naturales más codiciados, recurso esencial para la vida, actividades cotidianas, así como para diversos sectores productores como la agricultura, ganadería, piscicultura y todo el desarrollo industrial, convirtiéndose hoy en un problema de estudio debido a la accesibilidad que se tiene de este recurso, en datos estadísticos el recurso de agua dulce en los últimos cinco años decreció de 1412.608 billones de metros cúbicos a 1383.6471 billones de metros cúbicos (Grupo Banco Mundial, 2017), reportándose en México el acceso a 409 billones de metros cúbicos de agua dulce, dato de suma importancia para la implementación de nuevos desarrollos industriales y crecimiento económico del país ya que el uso de este vital líquido es imprescindible para todo el desarrollo industrial.

El agua es un recurso que en ocasiones no cumple con la calidad o especificaciones para ser empleada en procesos de producción o en consumo directamente, ya que no puede cumplir con los estándares requeridos, pues al analizarse sus características físico-químicas no son las ideales para el proceso y/o calidad del producto, viéndose forzada la industria a la implementación de procesos de tratamiento, según las necesidades requeridas o especificaciones que se tengan que cumplir del proceso.

Debiendo implementar procesos adicionales y tecnologías que cumplan con la calidad deseada y cuidado del vital líquido.

La industria automotriz es una de las industrias con mayor demanda en volúmenes de este recurso el agua y exige una alta calidad para su uso en los procesos.

Al requerir los procesos una alta calidad de agua, se enfrenta un alto consumo de agua, ya que en la actualidad y el desarrollo de tecnologías no ofrecen más de un 85%-90% de agua producto del total que es tratada, podría en algunos casos lograr hasta un 95% de recuperación, esto dependiendo de la calidad de agua que se tenga en la alimentación del tratamiento, la eficiencia del tren de tratamiento implementado, así como el cuidado del mantenimiento del mismo.

Hoy en día una de las problemáticas que se sufre en el noreste del país son las sequías que se han vivido en los últimos años en los estados de Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León, estados en los que de acuerdo al INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) se ha reportado como dato una precipitación pluvial promedio de 2.9 mm, apenas un 15% del promedio reportado a nivel nacional y al mismo tiempo se reconoce uno de estos estados, Coahuila por su gran desarrollo manufacturero en la industria automotriz, estado en el que en la última década ha tenido el asentamiento de tres plantas automotrices en la misma zona, en el municipio de General Cepeda en el Parque Industrial Santa Fe ubicado a 25 ° 22 ' 35" latitud norte y 101° 28 ' 30" latitud oeste y a una altitud de 1470 metros sobre el nivel del mar, municipio de Saltillo.

Municipio en el que de acuerdo a INEGI se tiene un total 8.99 Km² de superficie de cuerpos de agua de 388.44 Km² reportados en el Estado, siendo esto apenas el 2.3% del agua total existente, declarada como accesible.

3.2 Calidad de agua para el proceso de pintura automotriz

En el proceso de la industria automotriz la planta de pintura, es la parte del proceso más delicado, ya que se requiere del control químico del proceso y un alto estándar de calidad en el acabado de la pintura, proceso en el cual se tiene cuidado desde la calidad del aire que ingresa al proceso, la limpieza del personal que tiene acceso a las instalaciones y más aún con la calidad de agua que interviene con el proceso directamente, ya que es parte de la materia prima del proceso químico que se realiza en las líneas de proceso de pintura de las plantas automotrices.

El proceso de pintura automotriz se puede resumir en los siguientes subprocesos:

- Pretratamiento
- Electrodeposición
- Aplicación de sello
- Aplicación de pintura
- Preparación del aire
- Horneado

En este capítulo se abordarán los procesos de interés en este caso de estudio, siendo aquellos que llevan implícito el uso de agua y la calidad requerida por que estos procesos tengan una correcta operación y entreguen la calidad deseada en el producto final.

Pretratamiento: Consiste en el tratamiento químico de la superficie metálica, que se realiza en varias etapas interconectadas, para lograr una resistencia a la corrosión y una correcta adhesión de la capa de pintura.

En este proceso se logra la remoción de agentes contaminantes como aceites, grasas, oxidación, polvo, residuos de conformación del acero.

Hoy en día el método más efectivo para remover los contaminantes, es por procesos de aspersión e inmersión, donde se adicionan agentes base agua para la limpieza de agentes alcalinos, así como la superficie metálica es sometida a un tratamiento térmico de fosfatado en el que se produce una capa de recubrimiento en el metal, que lo hace más resistente a la corrosión.

Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran una línea de pretratamiento.

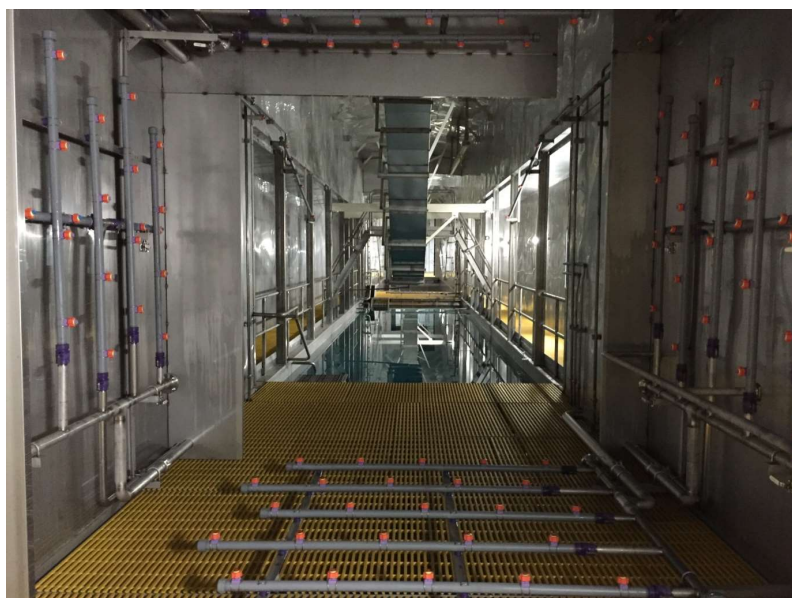
En todos estos procesos se tienen como factores principales para su correcta operación, temperatura, energía cinética, dosificación de químicos y la calidad del agua.

Es imprescindible que la calidad del agua cumpla con las características y el suministro del volumen sea el suficiente, para asegurar la funcionalidad de los agentes de limpieza y el fosfato.



Fuente: Dürr, 2016

Figura 3.1 Vista exterior del proceso de pretratamiento.



Fuente: Dürr, 2016

Figura 3.2 Vista interna del proceso de pretratamiento.

La calidad del agua requerida en el proceso de pretratamiento para este proyecto se ha estimado en función del volumen de producción y tipo de producto, quedando especificada como:

pH: 5.5 – 7.2

Conductividad: < 10 μS

Sílice: < 0.5 mg/L

De la realización de los cálculos de ingeniería considerando, el volumen de producción, el diseño de este proceso, consumos de volumen y pérdidas del proceso, se especifica la necesidad de suministro de $9.2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Electrodeposición: En este proceso se realiza la aplican de un recubrimiento de una resina por medio de inmersión que evita la corrosión en el acero y va acompañado de un proceso en enjuagues para asegurar el acabado de la superficie, basado en procesos electroquímicos y el principio de atracción mutua.

La unidad con carga negativa se sumerge en la pintura con partículas con carga positiva, las partículas de pintura son atraídas por la unidad, depositándose en forma de película, formando un recubrimiento uniforme sobre la superficie.

En este proceso se requiere una alta calidad en el agua, para que permita el correcto proceso de electrodeposición y el proceso logre el espesor deseado en la capa de pintura.

Al igual que el proceso de Pretratamiento, este proceso requiere control de temperatura, energía cinética y calidad del agua.

En la Figura 3.3 se muestra un tanque de un proceso de electrodeposición.



Fuente: Dürr, 2016

Figura 3.3 Tanque de electrodeposición.

Al igual que el proceso de Pretratamiento en el proceso de Electrodeposición, se debe cumplir con el requerimiento dado por el volumen de producción y tipo de producto como:

pH: 5.5 – 7.2

Conductividad: < 10 μS

Sílice: < 0.5 mg/L

Se estima un consumo en este proceso de $4.1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Aplicación de pintura: Proceso en el que por medio de celdas robotizadas se realiza la aplicación de pintura de la capa base y la capa clara, en estas celdas se tiene el control de un volumen específico de aire, temperatura, humedad, suministro de pintura y un sistema de separación de pintura residual, en este proceso se tiene un enfoque en el suministro de pintura.

Para lograr un correcto suministro de pintura a los equipos automáticos robotizados, se debe tener cuidado de manera especial con las viscosidades de la pintura solicitadas por el fabricante las cuales pueden requerir el suministro de agua de una alta calidad, para evitar cualquier efecto nocivo en la calidad de aplicación de la pintura. La Figura 3.4 muestra una cabina de aplicación.

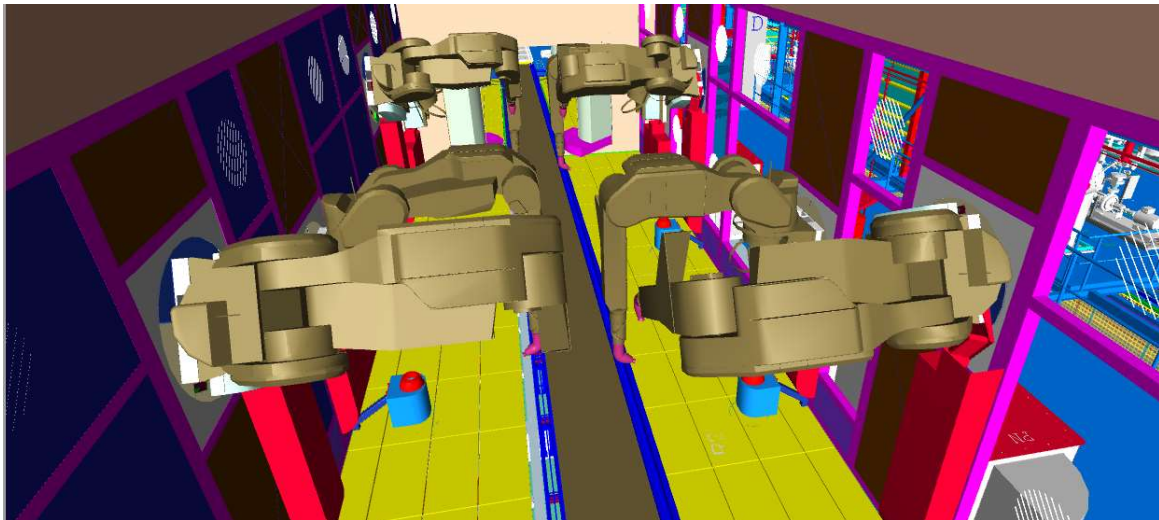
La calidad de agua demandada en esta parte del proceso se define como:

pH: 5.5 – 7.2

Conductividad: < 10 μS

Sílice: < 0.5 mg/L

Estimando un consumo de $0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.



Fuente: Dürr, 2015

Figura 3.4 Vista interna de una cabina de pintura

Preparación del aire: El acondicionamiento del aire para el proceso de aplicación es uno de los subprocesos en los que se debe tener mayor cuidado ya que el aire es tomado del exterior y entra en contacto directo con la pintura, al no tener un tratamiento correcto puede generar graves problemas de contaminación y calidad en el producto final, por lo que se debe asegurar un purificado de polvo y partículas de suciedad, para lograr tener en condiciones el aire se debe realizar un filtrado, así como se debe tener un control de la temperatura y la humedad, por lo que podría requerir ser humidificado o deshumidificado y controlar el volumen de aire inyectado por ventiladores. En la Figura 3.5 se muestra una unidad de preparación de aire.



Fuente: Dürr, 2015

Figura 3.5 Vista exterior de una unidad de preparación de aire.

Para lograr cumplir con el porcentaje de humedad requerido por el proceso, puede ser necesaria agua en caso de requerir ser humidificado, por lo que la calidad del agua debe cumplir con ciertas características, no tan estrictas como los subprocesos descritos anteriormente, pero si deberá cubrir con algunos rangos de valores para evitar el daño prematuro del equipo y contaminación del proceso, dadas las condiciones climatológicas de la ubicación del proyecto y volumen de producción, se ha definido un consumo máximo en invierno de $24.5 \frac{m^3}{h}$ de agua, con las siguientes características:

pH: 5.5 – 7.2

Conductividad: < 25 μS

Sílice: < 0.5 mg/L

Como se analizó en esta sección la calidad de agua que se requiere en una planta de pintura se define en dos tipos y distintos volúmenes y se identifican como sigue:

Tipo I – Agua Desionizada

pH: 5.5 – 7.2,

Conductividad: < 10 μS

Sílice: < 0.5 mg/L

Volumen requerido: $13.4 \frac{m^3}{h}$.

Tipo II – Agua de proceso

pH: 5.5 – 7.2,

Conductividad: < 25 μ S

Sílice: < 0.5 mg/L

Volumen requerido: $24.5 \frac{m^3}{h}$.

Cabe mencionar que la presencia de bacteria debe ser eliminada, ya que al tener en las etapas de fosfatizado y electrodeposición, un alto contenido de materia, puede funcionar como alimento a las bacterias y al ser etapas del proceso que está a temperatura entre los 48-52 °C, este medio resulta óptimo para la proliferación de bacterias y con un alto riesgo de contaminación del proceso, por lo que se deberá tener en consideración en el diseño del proceso de tratamiento.

Obtenidos los datos de volumen y calidad de agua que se requieren para la correcta operación y entregar la calidad deseada del producto final, se puede definir el sistema de tratamiento necesario para cumplir con lo antes ya especificado.

4. DISEÑO DE PROCESO DE TRATAMIENTO

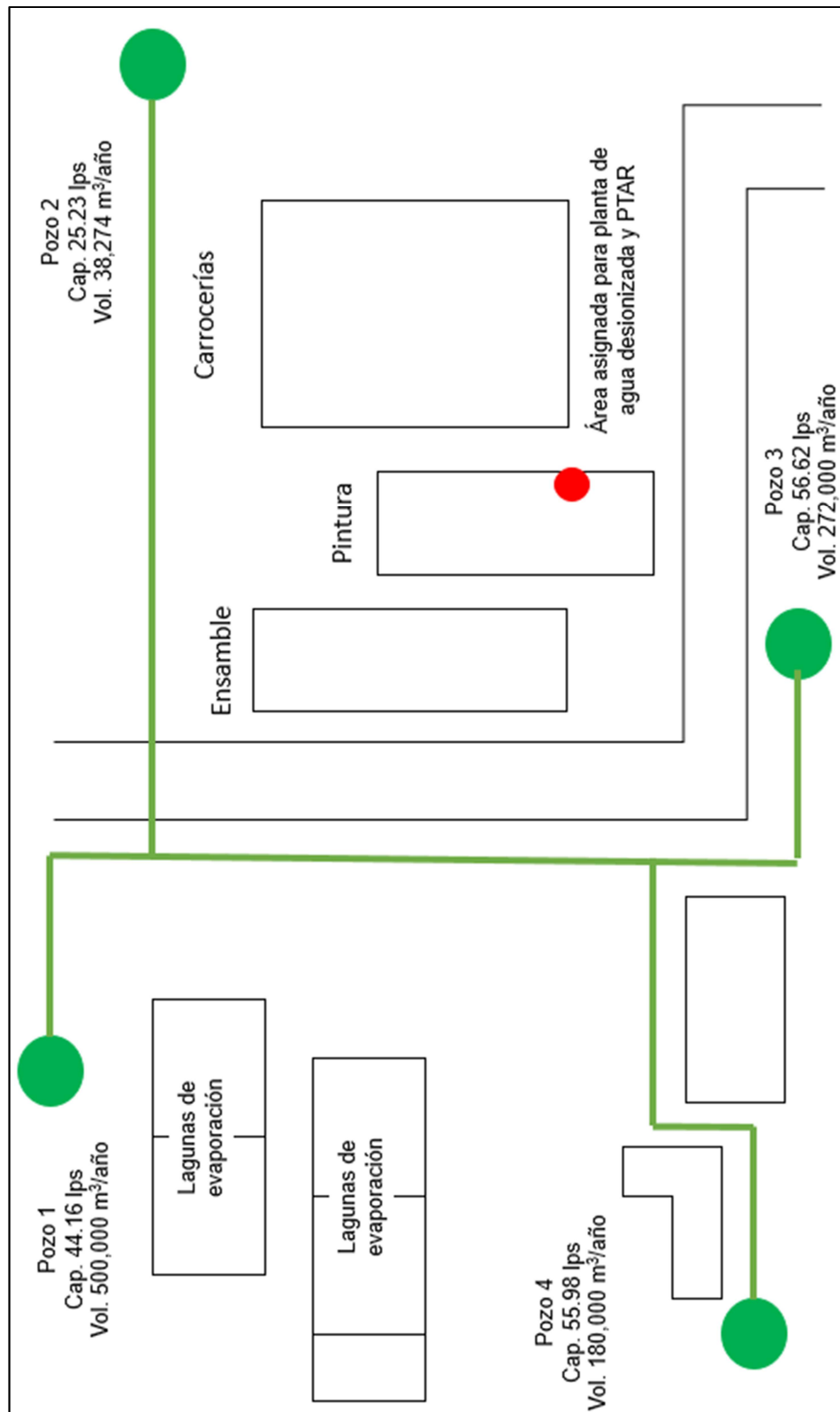
En el capítulo anterior ya se han detallado las necesidades específicas en cuanto a calidad y cantidad de agua que son requeridas para la operación de la planta de pintura.

Ahora se debe analizar la calidad de agua con la que se cuenta en el complejo para el desarrollo del proyecto y poder definir el tren de tratamiento adecuado para lograr los objetivos antes mencionados.

4.1 Características del agua salobre

El área donde se desarrollará la nueva planta de pintura automotriz se localiza en Derramadero, Saltillo en el Desarrollo Industrial Santa Fe, en el complejo se contará con un pozo de agua, siendo asignado el pozo #3, el cual dado a su aforo de 272,000 m^3 /anuales cuenta con el volumen para provisionar de agua a la nueva planta de pintura, considerando los consumos preliminares estimados, en la Figura 4.1 se muestra la ubicación del pozo 3, así la ubicación de fosas de evaporación que se podrán emplear para los fines que sean requeridos, con el objetivo de reducir los volúmenes de desecho producto de los trenes de tratamiento implementados en el proyecto para optimizar el uso del agua.

La calidad de agua de este pozo se determinó por medio de un análisis fisicoquímico y bacteriológico del agua, que se muestra en la Tabla 4.1. Características del agua de pozo.



Fuente: Dürr, 2012

Figura 4.1 Ubicación del pozo 3 en el complejo.

Tabla 4.1 Características del agua del pozo del caso de estudio.

MUESTRA : AGUA DE POZO. (No 3)

No 02/06

Parámetros	Unidades	Resultado	Límites max.	Norma	Analista
Conductividad	µS	751	xxx	NMX-AA-93	A.E.F.L.
Potencial hidrógeno	Unid pH	7.66	6,5 - 8,5	NMX-AA-08	A.E.F.L.
Alcalinidad a la ff	mg/L	0	xxx	NMX-AA-36	A.E.F.L.
Alcalinidad total	mg/L	265	xxx	NMX-AA-36	A.E.F.L.
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	500	500	NMX-AA-72	M.A.T.B.
Dureza de calcio [CaCO ₃]	mg/L	481	xxx	NMX-AA-72	M.A.T.B.
Cloruros	mg/L	26,9	250	NMX-AA-73	M.A.T.B.
Sulfatos	mg/L	19,7	400	NMX-AA-74	A.E.F.L.
Sulfuros	mg/L	N.D.	xxx	NMX-AA-33	A.E.F.L.
Fierro total	mg/L	N.D.	0,3	Std. Methods	M.A.T.B.
Fierro soluble	mg/L	N.D.	xxx	Std. Methods	M.A.T.B.
Fosfatos totales	mg/L	N.D.	xxx	NMX-AA-29	M.A.T.B.
Nitrógeno total	mg/L	N.D.	0,5	NMX-AA-26	A.E.F.L.
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	0,09	xxx	NMX-AA-28	A.E.F.L.
Demanda química de oxígeno	mg/L	3,8	xxx	NMX-AA-30	M.A.T.B.
Coliformes totales	NMP/ml	9	<2	NOM-112-SSA1	M.A.T.B.
Coliformes fecales	NMP/ml	N.D.	N.D.	NOM-112-SSA1	M.A.T.B.
Gérmenes aerobios	UFC/ml	2	xxx	NOM-092-SSA1	M.A.T.B.
Turbidez	N.T.U.	0,79	5	NMX-AA-38	A.E.F.L.
Sílice	mg/L	13,01	xxx	NMX-AA-75	M.A.T.B.

Muestra No: 20378/2010

Nota: Los análisis corresponden al material sometido a prueba.

No deberán reproducirse parcialmente sin la autorización del laboratorio.

Analizó:

Ma de los Angeles Torres B.

Q.F.B. Ma de los Angeles Torres B.

Representante de la Dirección Técnico

No de Cédula Profesional: 2639465

Responsable:

Q.I. Patricia Portillo Zugastly

Q.I. Patricia Portillo Zugastly

Director General

No de Cédula Profesional: 452524

No de registro AGSAL: PSSA-01/2010

Fuente: Dürr, 2012

Como se puede observar en la Tabla 4.1 de resultados dada por el laboratorio, se encuentra que el agua de este pozo tiene una alta conductividad indeseable para nuestro proceso con un valor de 751 µS, así como una alta dureza total que pueda afectar la tubería y la durabilidad de los equipos y que está relacionada directamente con una dureza total de 500 mg/L y una

dureza de calcio de 481 mg/L, también se observa un alto valor de sílice 13.01 mg/L, por encima del valor deseable para el proceso.

Así también se observa la presencia de cloruros y sulfatos en concentraciones bajas.

En los resultados también se observa un pH de 7.66 ligeramente alcalino, así como presencia de bacteria que muy probablemente genere los sulfatos presentes.

4.2 Proceso de tratamiento

En los capítulos anteriores han sido revisados los diversos procesos de tratamiento que se pueden emplear para lograr la remoción o reducir concentraciones de elementos no deseados en el agua.

En este caso se debe cumplir con dos calidades de agua distinta, una del tipo desionizada y otra del tipo industrial.

Como se revisó hay varios procesos que al implementarlos pueden lograr la calidad de agua desionizada requerida, si se observan los resultados del análisis del agua de pozo, básicamente se puede considerar es requerido un proceso que realice la eliminación de iones, como procesos potenciales debido a su uso para el tratamiento de altos volúmenes, costes de inversión y mantenimiento, se puede considerar el intercambio iónico y un proceso de membranas, en este caso se selecciona un proceso de membranas que serían por medio de ósmosis inversa.

Al emplear un sistema de ósmosis inversa se considera el tratamiento en dos etapas, buscando obtener en el primer paso el volumen requerido con la calidad de agua de proceso y alimentar el segundo paso, para obtener la calidad y volumen de agua desionizada, el primer módulo deberá ser capaz de tratar un mayor volumen y se considera puede tener recuperación del 75% ya que al ser el primer paso presentará una mayor pérdida en el concentrado y el segundo módulo se considera una recuperación del 82% ya que el agua de alimentación será producto de una etapa anterior de ósmosis inversa, por lo que la recuperación será mayor.

En función de los porcentajes de recuperación que se esperan tener, se tiene que considerar el diseño de un pretratamiento para un volumen de:

Ósmosis segundo paso: $13.4 \frac{m^3}{h} \times 1.18 \text{ factor de recuperación} = 15.8 \frac{m^3}{h}$

Ósmosis primer paso: $(24.5 \frac{m^3}{h} + 15.8 \frac{m^3}{h}) \times 1.25$ factor de recuperación = $50.4 \frac{m^3}{h}$

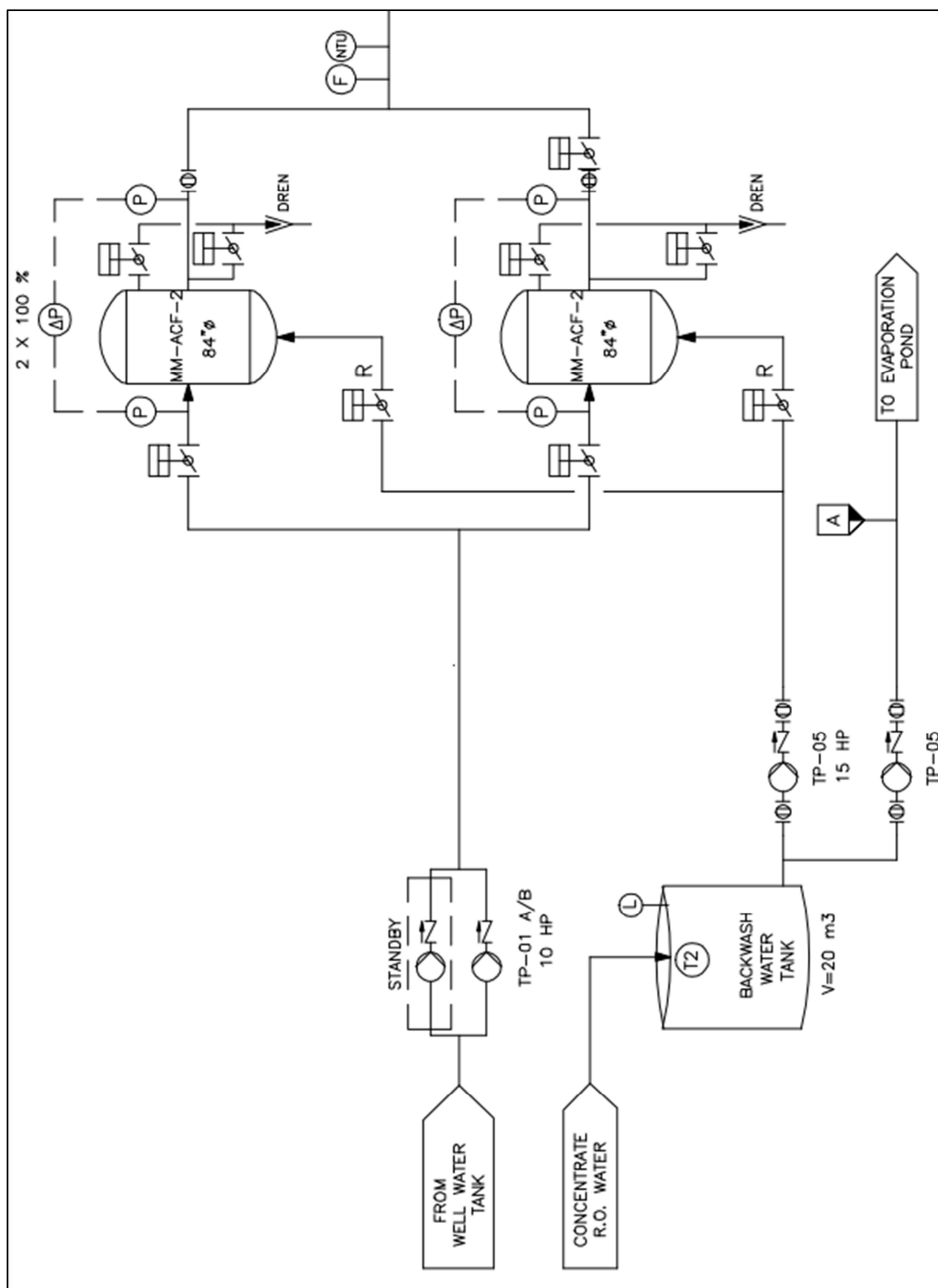
Volumen total de consumo = $50.4 \frac{m^3}{h}$ (Base de cálculo para la planta de desionización)

Debido a que se empleará un sistema de ósmosis inversa y el agua de alimentación es agua salobre sustraída de un pozo, es importante considerar en el pretratamiento un sistema de filtrado, en este caso se implanta un filtro multicapa debido a su alta eficiencia, así como nos permite una velocidad y volumen de operación aceptable para nuestro proceso y el tamaño de partículas que puede retener son finas en este caso como las arena o arcillas, que puedan estar presentes en el agua debido al proceso de extracción o transporte hasta el punto de uso.

En el diseño del proceso en general se tiene que considerar la instrumentación necesaria para poder tener un proceso automatizado, en el pretratamiento se debe considerar el sistema de bombeo principal con la capacidad de bombeo de $50.4 \frac{m^3}{h}$, considerando una bomba de stand-by, para casos de mantenimiento o reparación, se consideran dos equipos de filtrado en este caso para partículas finas un filtro de medio granular con el objetivo de lograr la remoción de partículas sólidas suspendidas y retención de residuos orgánicos que pudieran estar presentes en el agua empleando antracita y carbón activado, teniendo así un lecho mixto, cada uno con la capacidad de filtrado de $25 \frac{m^3}{h}$. considerando una presión de operación de 75 psi, a la salida se considera el instrumento para el monitoreo de la turbiedad, asegurando la operación del filtro multicapa y la calidad del agua para ingresar al sistema de ósmosis inversa.

Como se explicó anteriormente en este tipo de equipo una vez se tiene una pérdida de presión superior a 1 kg/cm^2 se debe realizar un lavado a contracorriente, para este caso en el diseño se considera un sistema para realizar el retrolavado de manera automática por 20 min, eliminando los sólidos suspendidos que se hayan acumulado en el lecho filtrante, así como un enjuague en automático por 20 min para dejar el medio filtrante en condiciones para continuar con la operación.

Para poder realizar el retrolavado de manera automática se considera un tanque de almacenamiento, así como un sistema de bombeo, las válvulas del proceso de retrolavado y enjuague deberán ser de apertura automática, por lo que se consideran válvulas electroneumáticas. Como se puede observar en el esquema el agua producto de los retrolavados se considera enviar a lagunas de evaporación eliminado con ello el desperdicio de este volumen de agua. En la Figura 4.1 se observa el arreglo del proceso de filtrado.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.1 Diagrama de proceso de filtrado.

En el primer paso de ósmosis inversa, se obtiene el agua de proceso donde se ha considerado un factor de recuperación del 75%, para comprobar la funcionalidad y confirmar dimensiones de las membranas se realiza un análisis en el simulador considerando del fabricante de las membranas Toray Industries Inc.

Para obtener los resultados del agua producto del primer paso, ha sido considerado un sistema 2:1, así como que cada recipiente se contempla con 7 membranas de la marca Toray Industries Inc. el modelo TM-720-400, de poliamida con un arreglo de enrollamiento en espiral, se obtiene del software la Figura 4.2 donde se observan los parámetros generales considerados en la simulación, así como como un resumen del agua y volumen producto.

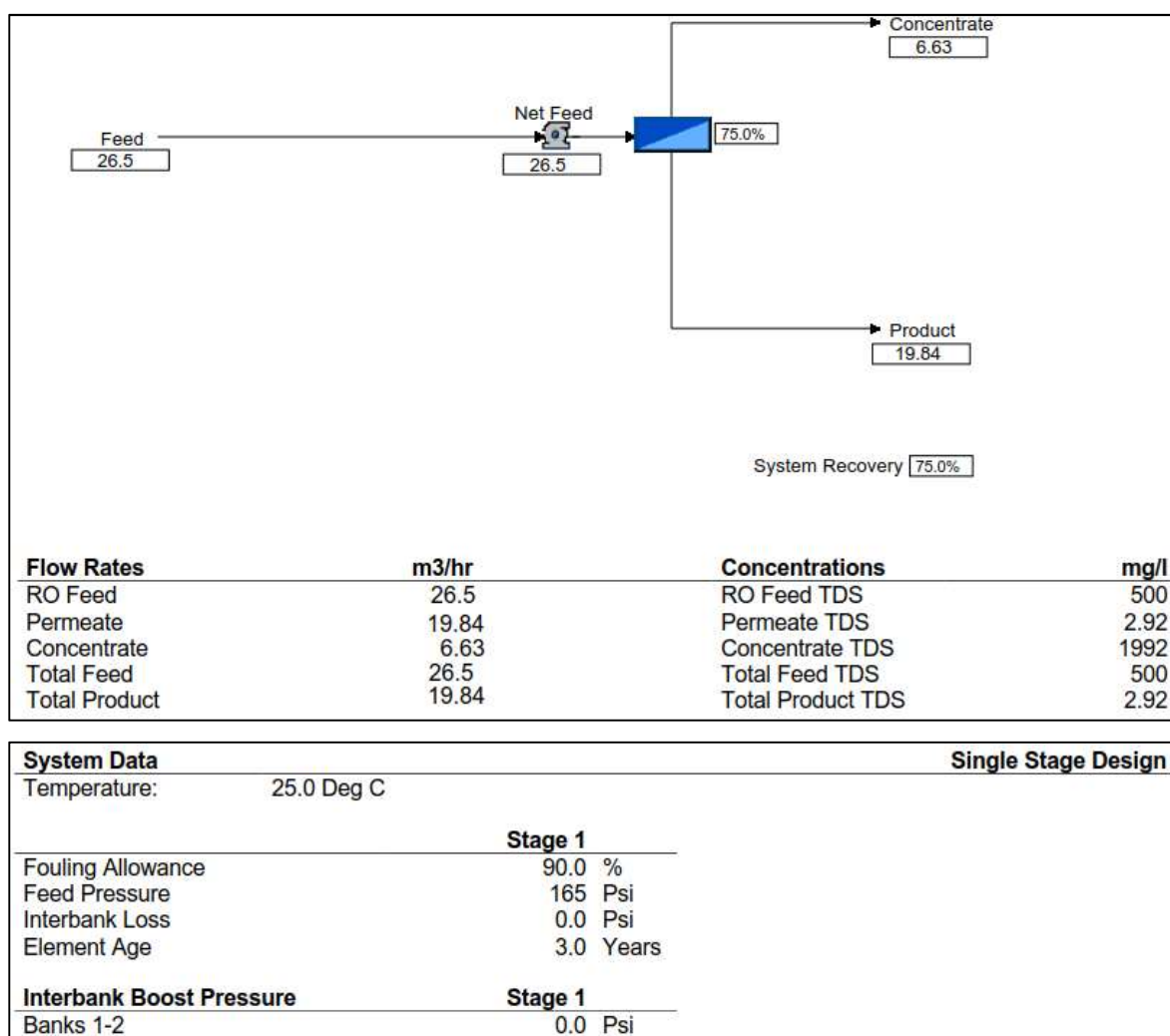


Figura 4.2 Resumen primer paso de ósmosis inversa 2:1.

En la Figura 4.2, se observa como la membrana y el arreglo seleccionado cumplen al lograr un producto final con un total de solidos disueltos de 500 mg/L se reduce la concentración a

2.92 mg/L, reduciendo considerablemente el valor de la conductividad, que siguiendo la fórmula de conversión se puede estimar para el agua producto del primer paso una conductividad de 24.5 μ S, en la Tabla 4.2 se puede observar a detalle la composición química del agua producto y rechazo del módulo de ósmosis inversa.

Tabla 4.2 Resumen de la composición química del agua del primer paso de ósmosis inversa.

Units: Pressure - psi	Flow - m3/hr	TDS - mg/l	Saturation - %		
Stream --->	System Feed	1st Pass Feed	Total Permeate	System Product	System Concentrate
Ca	72.1	72.1	0.22	0.22	288
Mg	29.1	29.1	0.0871	0.0871	116
Na	42.2	42.2	0.46	0.46	167
K	1.0	1.0	0.0123	0.0123	3.96
Ba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	0.1	0.1	0.0003	0.0003	0.4
HCO3	80.0	80.0	0.63	0.63	317
Cl	180	180	0.88	0.88	716
SO4	70.0	70.0	0.14	0.14	280
NO3	1.0	1.0	0.0145	0.0145	3.96
F	0.1	0.1	0.0003	0.0003	0.4
B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO2	25.0	25.0	0.48	0.48	98.6
PO4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CO3	0.0531	0.0531	2.44E-06	2.44E-06	1.07
CO2	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8
TDS	500	500	2.92	2.92	1992
pH	7.0	7.0	4.94	4.94	7.56
LSI	-0.71	-0.71	-9.06	-9.06	0.88
Stiff-Davis	-0.67	-0.67	-7.3	-7.3	0.92
BaSO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO4 Sat	1.37	1.37	1.11E-05	1.11E-05	12.2
CaPO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaF2 Sat	0.0004	0.0004	8.90E-13	8.90E-13	0.0416
SrSO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO2 Sat	20.0	20.0	0.37	0.37	78.8

Como se puede observar en la Tabla 4,2 el agua producto podrá llegar a tener una presencia de sílice de hasta 0.48 mg/L, valor que está dentro de los parámetros determinados por el proceso, así como tener en consideración el cambio del pH en el agua producto de 4.94, debido a que será el volumen empleado para la alimentación del segundo paso de la membrana.

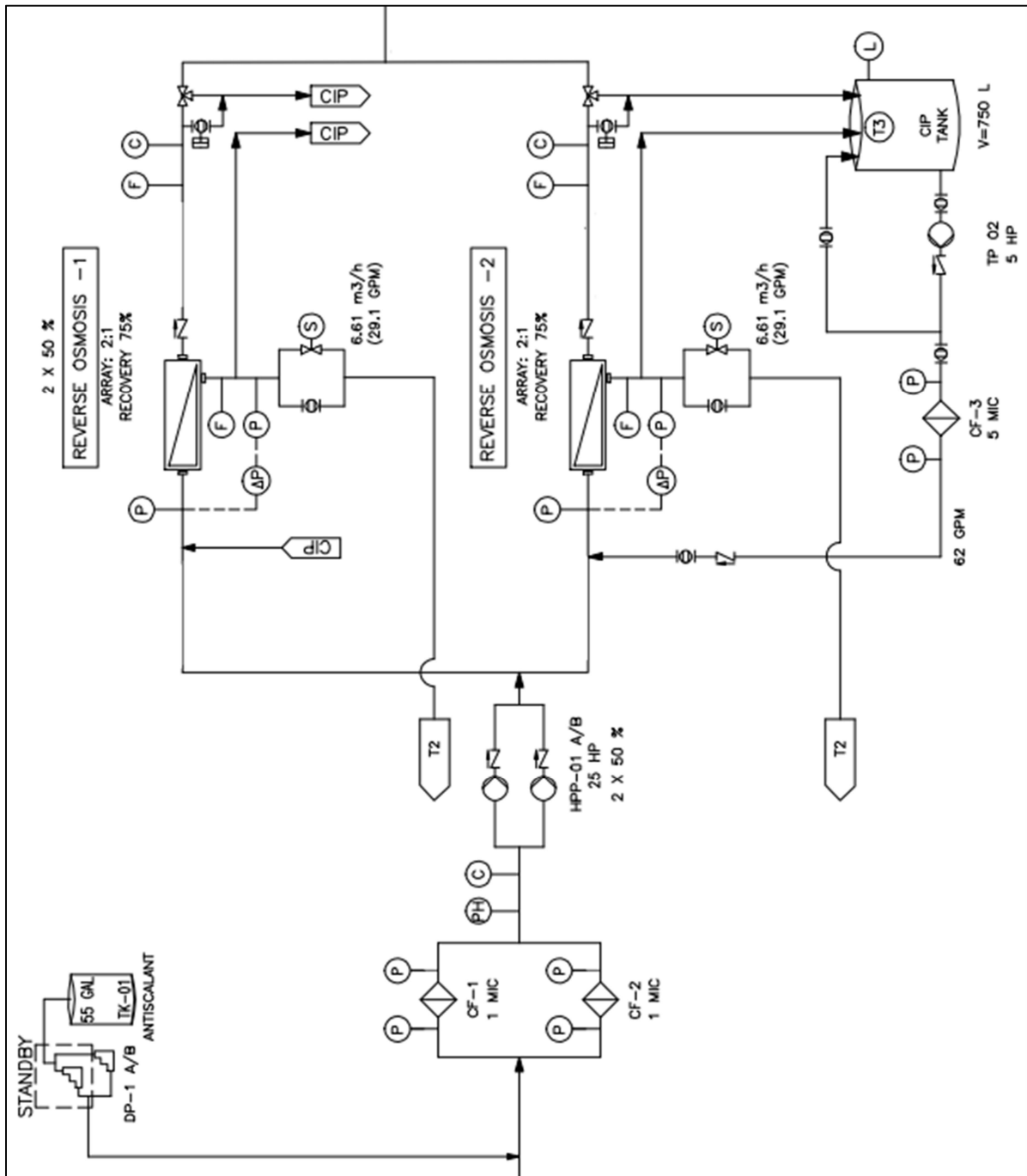
Se ha confirmado que el primer paso de la ósmosis inversa del tipo 2:1, cubre con las necesidades, ahora se puede iniciar el concepto del arreglo general de la ósmosis inversa primer paso.

Para un equipo de ósmosis inversa es indispensable contar con un sistema de filtrado fino, así como lo ideal es el uso de un filtro cartucho en este caso se considera de 15 μ m, para lograr

este filtrado se tiene que contar con sistema de bombeo, así como la implementación de dosificación de antiincrustante, para la operación del primer paso de ósmosis inversa, se consideran instrumentos básicos necesarios para controlar el sistema en automático, considerando bombas de alta presión, el monitoreo del flujo, presión y conductividad.

Se considera que el equipo cuente con un tanque y bombas para realizar la limpieza química de las membranas de manera automática, tomando en cuenta el agua producto de la limpieza química y el rechazo generado durante la operación de la ósmosis inversa se recolectara en el tanque de retrolavado (T2) el cual se considera transferir a las lagunas de evaporación.

En la Figura 4.3 se puede apreciar el isométrico del proceso de ósmosis inversa del primer paso.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.3 Diagrama de proceso del primer paso de ósmosis inversa.

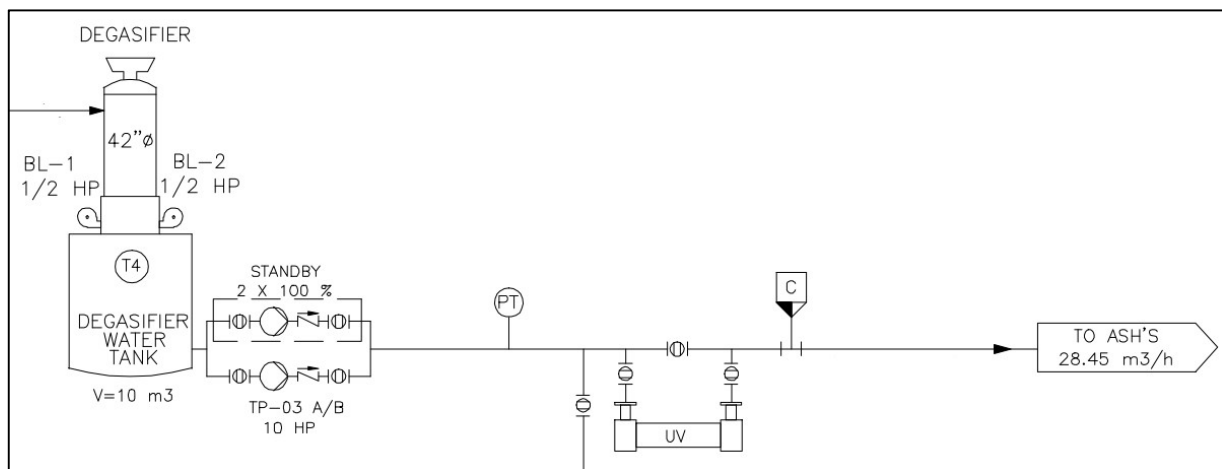
Como se puede observar en el digrama el agua producto de este primer paso de ósmosis inversa $39.7 \frac{m^3}{h}$, se emplearan para el suministro de agua a las unidades de preparación del

aire $24.5 \frac{m^3}{h}$ y $15.2 \frac{m^3}{h}$ serán procesados en un segundo paso de ósmosis inversa para lograr la calidad del agua desionizada solicitada.

Posterior del primer paso de ósmosis inversa se implementará un degasificador, para realizar la eliminación de gases disueltos en el agua y la oxidación de materiales presentes en el agua.

La torre de degasificación contará con ventiladores para ingresar el flujo de aire a contracorriente en la torre y un tanque de almacenamiento de $10 m^3$, control de nivel para que su operación sea en automatico, así como sistema de bombeo capaz de suministrar a la red de agua de proceso y una lampara UV con el objetivo de eliminar materia organica y bacterias que pudieran estar presentes en el permeato, ya que la presencia de bacteria podría ser un alto riesgo de contaminación del proceso.

En la Figura 4.4 se puede ver el conjunto del proceso de la torre de degasificación.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.4 Proceso de degasificación.

En el segundo paso de ósmosis inversa, se considera un arreglo 1:1, considerando 5 mebranas por recipiente del tipo TM-720-400, de poliamida con un arreglo de enrollamiento en espiral. Se realiza la simulación de los flujos y calidades de ingreso para confirmar los flujos y cualidades esperados.

En la Figura 4.5 se muestran los parametros considerados en la simulación los volúmenes de alimentación y los obtenidos en el producto.

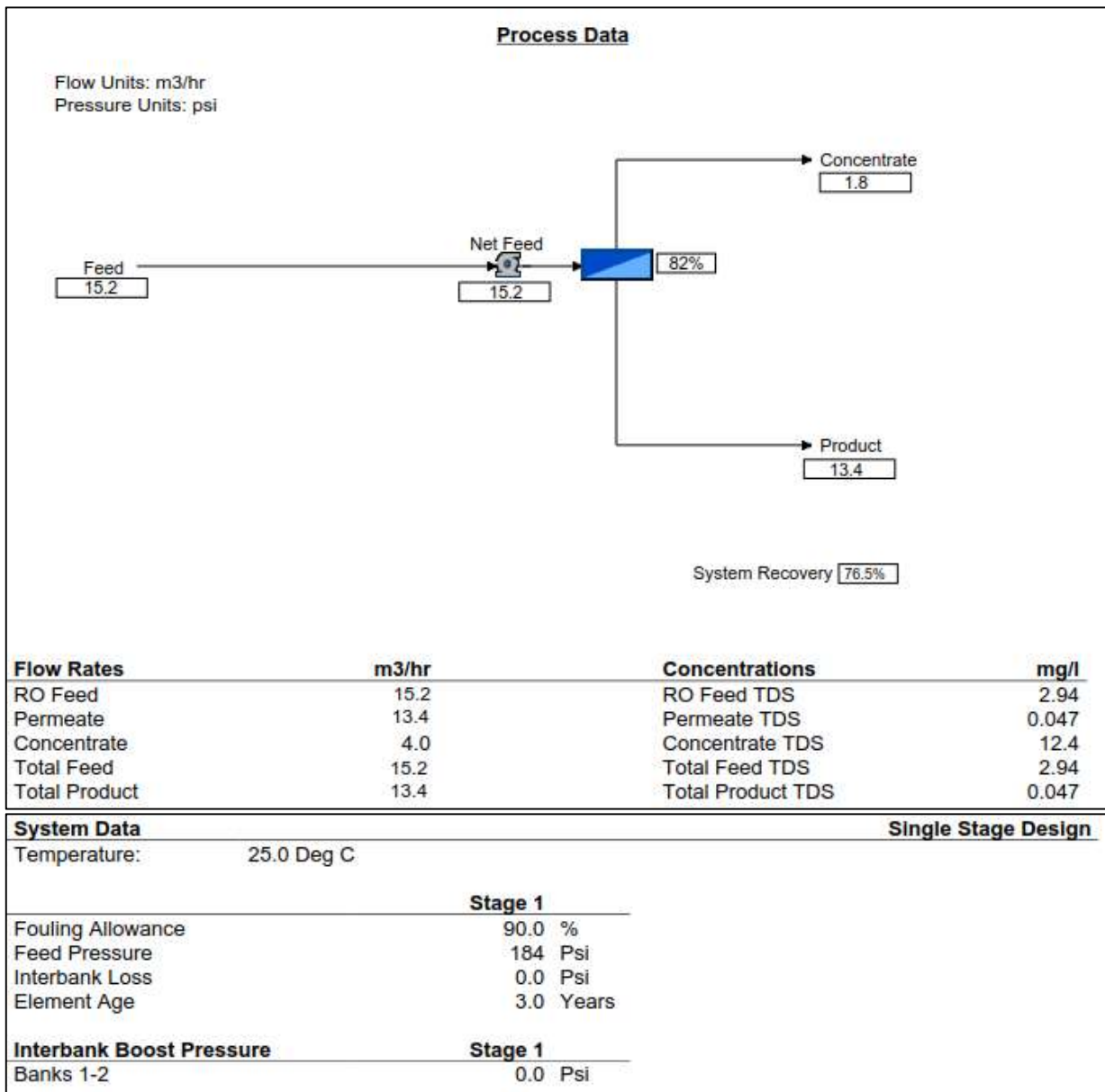


Figura 4.5 Resumen de parametros segundo paso de ósmosis inversa 1:1.

En la Figura 4.5 se puede ver a manera de resumen que al ingresar al agua producto del primer paso de osmosis inversa y procesarla en el segundo paso de ósmosis inversa en un arreglo 1:1 se logra reducir el valor del total de solidos disueltos de 2.94 mg/L a 0.047 mg/L, en la Tabla 4.3, se puede analizar la composición química del agua producto y evaluar los elementos presentes como la silica están dentro de los parametros deseados.

Tabla 4.3 Composición química del segundo paso de ósmosis inversa.

Units: Pressure - psi	Flow - m3/hr	TDS - mg/l	Saturation - %		
Stream ---->	System Feed	1st Pass Feed	Total Permeate	System Product	System Concentrate
Ca	0.22	0.22	0.0014	0.0014	0.93
Mg	0.09	0.09	0.0006	0.0006	0.38
Na	0.46	0.46	0.0103	0.0103	1.92
K	0.01	0.01	0.0003	0.0003	0.0417
Ba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HCO3	0.63	0.63	0.0132	0.0132	2.64
Cl	0.9	0.9	0.0117	0.0117	3.79
SO4	0.14	0.14	0.0007	0.0007	0.59
NO3	0.01	0.01	0.0004	0.0004	0.0413
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO2	0.48	0.48	0.0084	0.0084	2.01
PO4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CO3	2.80E-05	2.80E-05	1.21E-08	1.21E-08	0.0005
CO2	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
TDS	2.94	2.94	0.047	0.047	12.4
pH	6.0	6.0	4.33	4.33	6.62
LSI	-6.16	-6.16	-9.67	-9.67	-4.27
Stiff-Davis	-6.23	-6.23	-11.8	-11.8	-4.36
BaSO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO4 Sat	1.14E-05	1.14E-05	3.80E-10	3.80E-10	0.0002
CaPO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaF2 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrSO4 Sat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO2 Sat	0.42	0.42	0.006	0.006	1.91

Si se analizan los resultados se puede observar que el valor del silice en el agua resultante de ósmosis inversa a través del segundo paso se ve reducido a un valor de 0.0084 mg/L (En el primer paso tiene un valor de 0.48 mg/L) , por lo que este valor cumple con lo requerido para el proceso.

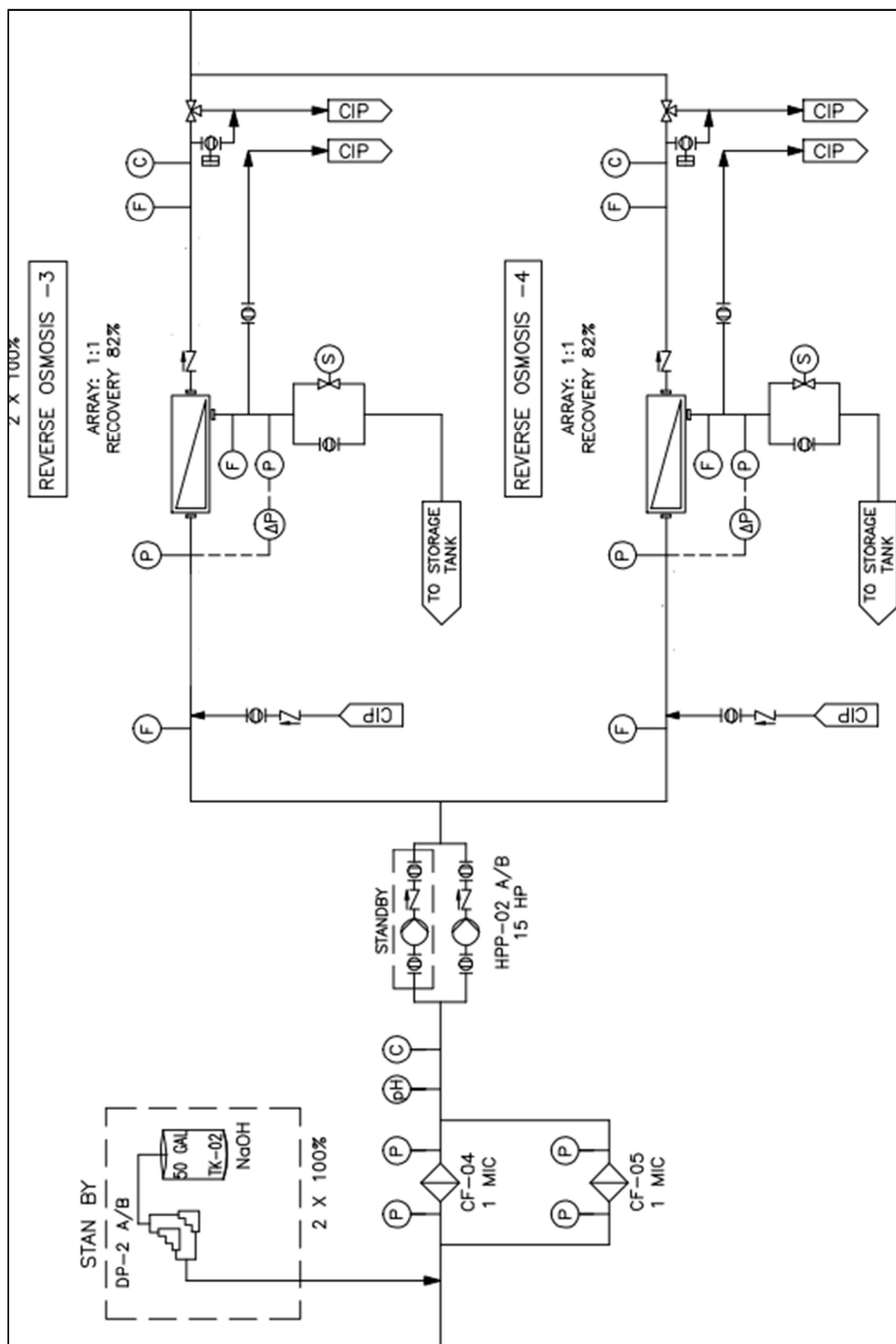
En el módulo del segundo paso de ósmosis inversa se considera un ajuste de pH con hidróxido de sodio ya que debido al paso del agua en el primer paso y pérdida de iones el pH se ve afectado y como se menciona en capítulos anteriores es necesario que el agua de alimentación se encuentre en los parametros de pH recomendados por el fabricante de membranas, al igual que en el primer paso se considera un filtro cartucho para la remoción de partículas de hasta 1 micra, se suministran dos bombas de alta presión, en este caso el suministro de antiincrustante no es requerido, debido a la baja presencia de sólidos totales disueltos que presenta el agua de alimentación.

En la Figura 4.6 se observa el arreglo general de la segunda etapa de ósmosis inversa.

El agua de rechazo de la primer etapa al tener una alta presencia de sólidos se enviará a lagunas de evaporación para que se reincorpore el volumen al ciclo hidrológico del agua.

Si se analiza la presencia de sólidos totales disueltos en el agua de rechazo del segundo paso de ósmosis inversa se observa un valor de 0.0047 mg/L, muy por debajo del valor del agua de pozo de 500 mg/L, por lo que se decide enviar el rechazo del segundo paso de la ósmosis inversa al tanque de almacenamiento donde inicia el proceso de pretratamiento.

De esta manera, se logra reducir el consumo de agua salobre del pozo, así como reducir la concentración de sólidos totales disueltos en el agua de alimentación del primer paso de ósmosis inversa y con ello se logran reducir los tiempos de ensuciamiento.



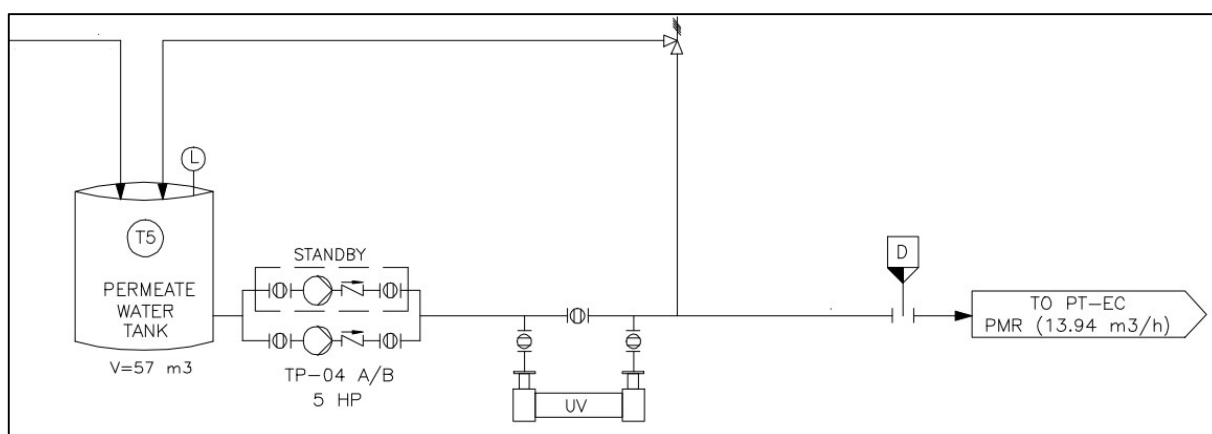
Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.6 Diagrama de proceso de segundo paso de ósmosis inversa.

Por último se considera un sistema de almacenamiento y bombeo para el suministro de agua desionizada, este sistema se considera automático, por lo que se habilita con sistema de detección de nivel, sistema de bombeo con monitoreo de presión y una lampara UV para que al igual que en la primer etapa de osmisis inversa, ayude a la desinfección y eliminación de bacterias.

Con el objetivo de evitar la formación de un punto de contaminación en el tanque de almacenamiento, tuberías o en el propio proceso.

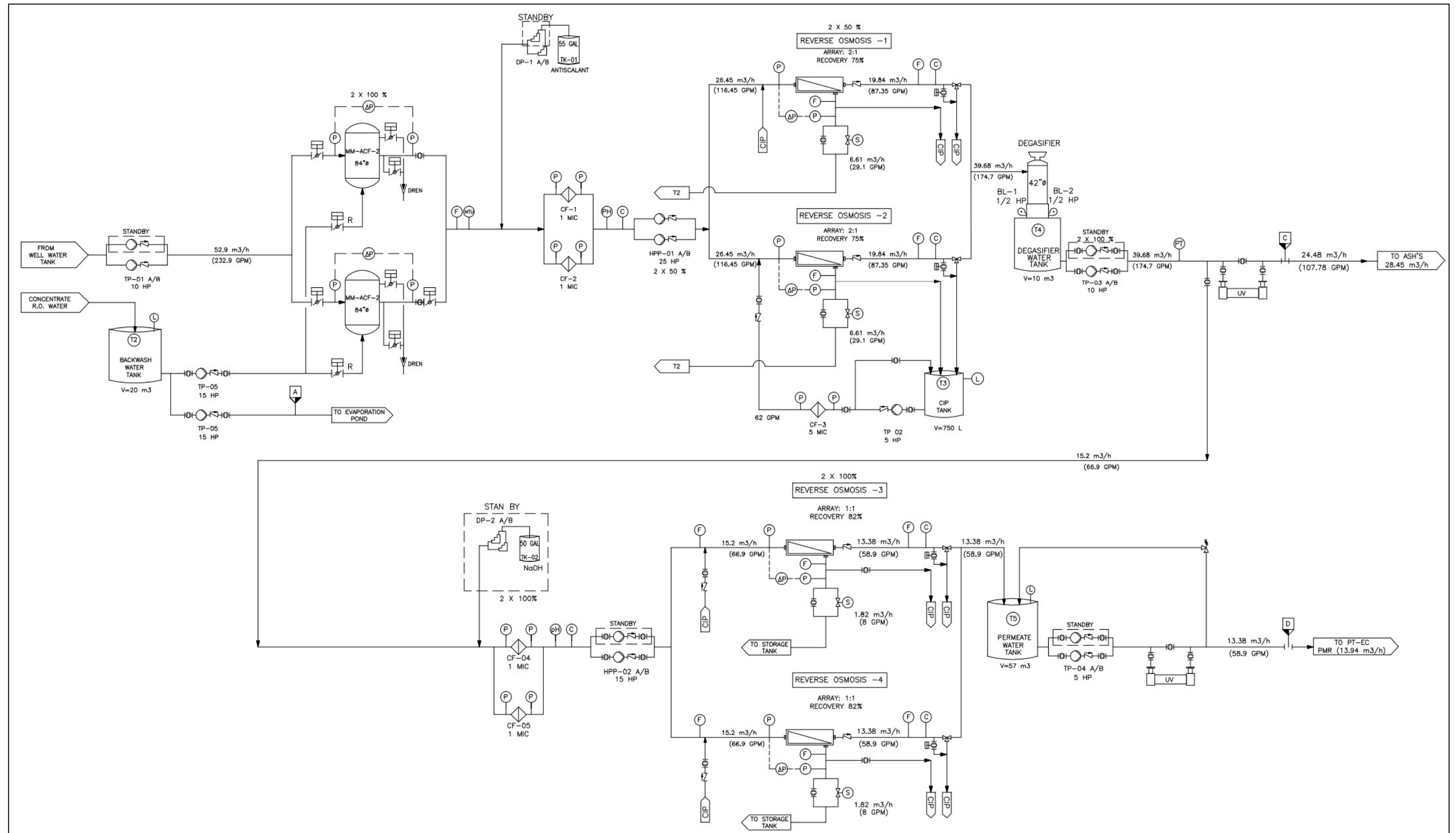
En la Figura 4.7 se puede revisar lo anteriormente descrito.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.7 Sistema de almacenamiento y bombeo de agua desionizada.

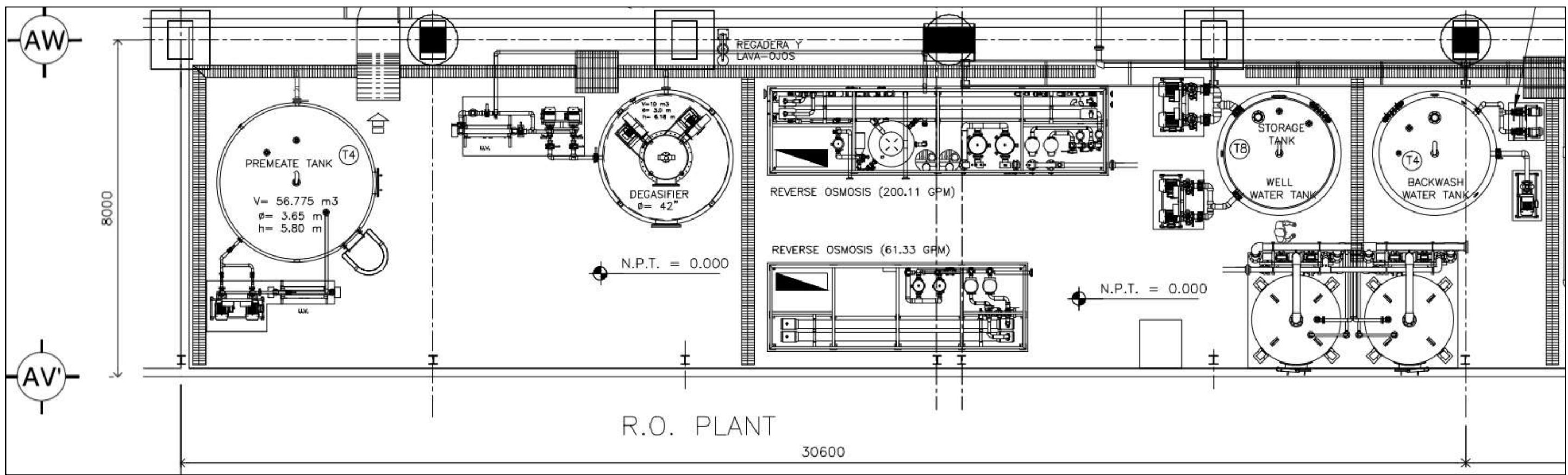
En la Figura 4.8, se observa el arreglo general del sistema de agua desionizada.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.8 Diagrama de proceso del Sistema de Agua Desionizada.

Para la implementación de este proyecto se cuenta con un area de 240 m³ donde se ha realizado la distribución de acuerdo a la Figura 4.9.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.9 Layout de distribución del Sistema de Agua Desionizada

5. RESULTADOS

Posterior al termino del diseño y fabricación se procede a la instalación y puesta en marcha del sistema completo.

Se puede observar la implementación del tanque de agua de alimentación principal construido en acero al carbón como se observa en la Figura 4.10



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.10 Tanque de agua de almacenamiento de agua de pozo.

La implementación del filtro granular y tanque de retrolavado se fabrican en acero al carbón Figura 4.11.



Fuente: Dürr, 2013



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.11 Sistema de filtro granular y retrolavado.

Módulos 1 y 2 de ósmosis inversa, se implementan en bastidores donde se realiza la distribución de todo el equipo requerido para su operación Figuras 4.12 y 4.13.



Fuente: Dürr, 2013

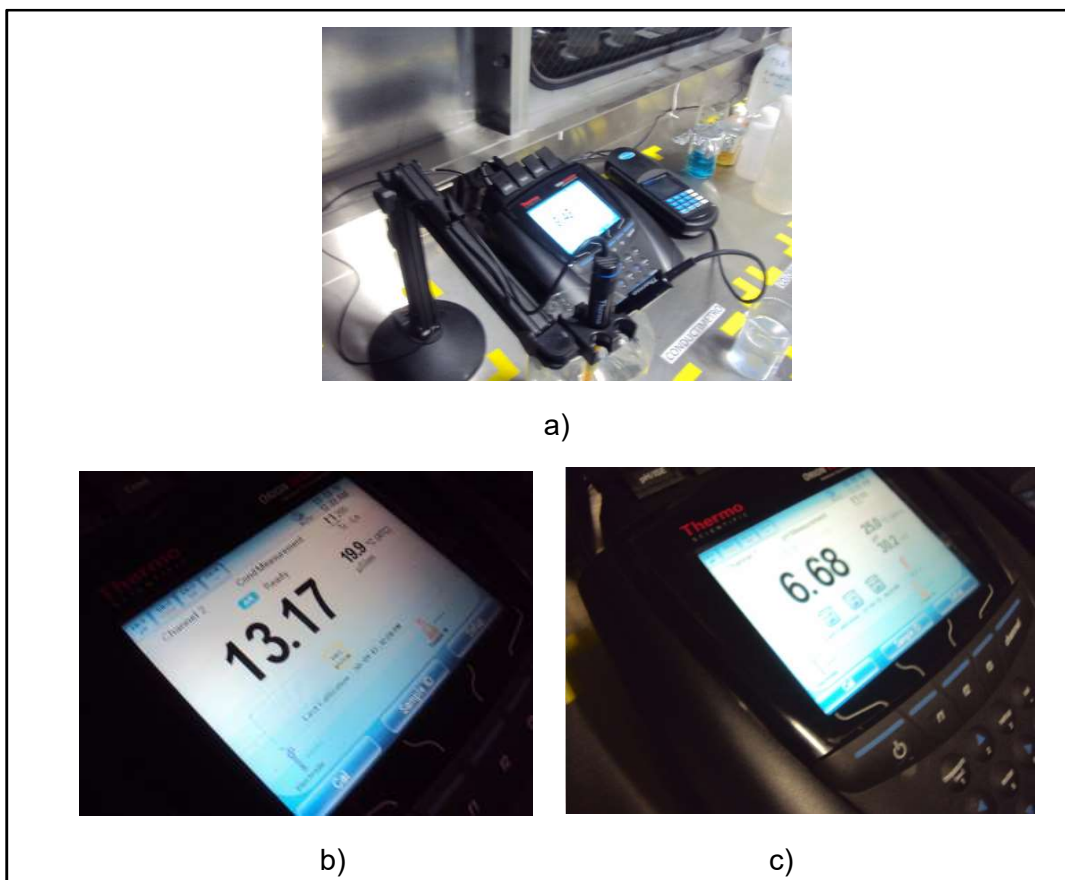
Figura 4.12 Módulos de ósmosis inversa.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.13 Sistema de bombeo y filtrado del módulo de ósmosis inversa.

Posterior del periodo de pruebas y arranque del equipo son tomadas dos muestras de los tanques de desgasificador y permeato, los resultados de conductividad arrojan $13.17 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $6.44 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente como se observa en la Figura 4.14.



Fuente: Dürr, 2013

Figura 4.14 a) Equipo de medición de conductividad, b) Medición de conductividad de agua de proceso, c) Medición de conductividad de agua desionizada.

Como se observan los parámetros de conductividad son aceptados por laboratorio y se inicia la fase de pruebas en los procesos.

6. CONCLUSIONES

Como se analizó en este texto y los resultados finales obtenidos de la ejecución, se puede concluir que la selección del empleo de un sistema de ósmosis inversa fue correcta, así como el conjunto de procesos seleccionados para su pretratamiento, pues se han obtenido los resultados de calidad y cantidad deseados.

Se comprueba que el pretratamiento y el sistema de ósmosis inversa, consiguen la remoción de partículas indeseadas para el proceso de aplicación de pintura lo que permitió tener conductividades por debajo de lo especificado en el proceso, en agua de proceso era requerido un valor $< 25 \mu\text{S}$ y se muestreo $13.17 \mu\text{S}$, en el agua desionizada se especificó un valor $< 10 \mu\text{S}$ obteniendo como resultado del muestreo $6.68 \mu\text{S}$.

La correcta operación y la calidad de los resultados de la planta de agua desionizada, radicará en el continuo monitoreo del pretratamiento, cuidando que las cantidades dosificadas sean las adecuadas para la cloración, ajuste de pH, la dosificación de antiincrustante y remoción de gases presentes en el agua, así como una oportuna limpieza de las membranas.

Cabe mencionar que al emplear las fosas de evaporación se ha reducido a 0 las descargas de agua de desecho, pues al implementar las fosas de evaporación éstas nos permitirán reincorporar el agua a su ciclo natural hidrológico, obteniendo solo como residuo para disposición final las sales producto de la evaporación.

7. RECOMENDACIONES

Debido a que el equipo instalado para la desionización del agua son unidades de ósmosis inversa, se recomienda que durante la operación del equipo, se realicen graficas de operación donde se pueda observar el volumen producto y la presión de operación, esto ayudara a saber al operador el momento en el que es requerido realizar una limpieza de las unidades y no perder su eficiencia, permitiendo alargar la vida del equipo y encontrar la operación optima y el volumen producto promedio que el equipo suministrara de manera constante.

Se recomienda de igual manera mantener un monitoreo de los sistemas de filtrado, para determinar su periodo de limpieza de retrolavado, así como poder realizar el cambio del medio filtrante cuando sea requerido, con esto se asegura la funcionalidad y optima operación de las membranas de ósmosis inversas.

Es importante se lea el manual del proveedor de membranas para conocer el procedimiento al dejar detenidas las unidades de ósmosis inversa por largos periodos de tiempo sin operación, ya que se debe recordar que el agua al quedarse estancada puede provocar crecimiento bacteriano, contaminación que puede dañar por completo la membrana o generarse incrustaciones de materiales que puedan ser fácilmente solubles al momento de realizar una limpieza de la membrana y pueda provocar su daño irreparable.

8. FUENTES CONSULTADAS

1. Aptel, Philippe, Buckley, ChrisA., (1998), Capítulo 2 Tipos de operaciones de membranas., Mallevialle, Joël, Odendaal, Peter E. y Wiesner, Mark R. (Eds.), *Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones.*, pp. 13-40, México, McGraw-Hill, ISBN:84-481-1206-7
2. Barrenechea, Ada, (2004), Capítulo 1 Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del agua., de Vargas, Lidia (Coord.), *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*, pp. 3-49, Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
3. Barrenechea, Ada, (2004), Capítulo 4 Coagulación, de Vargas, Lidia (Coord.), *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*, pp. 153-218, Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
4. Chang, Raymond (2002), Química, 7ª. Ed. McGraw-Hill, México. ISBN 0-07-365601-1, Pag. 625
5. CRANE (1992). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. 1ra Ed. McGraw-Hill, México. ISBN 968-451-846-3
6. Diccionario de la Real Academia Española, Ed. 23ª, 2004.
7. Dürr Systems GmbH., Paint and Final Assembly Systems, 2012, EPS, Project Drawings Overview, México
8. Dürr Systems GmbH., Paint and Final Assembly Systems, 2016, Wet Systems Standars, Alemania.
9. Dürr Systems GmbH., Paint and Final Assembly Systems, 2015, APT Systems Standars, Alemania.
10. Dürr Systems GmbH., Paint and Final Assembly Systems, 2013, EPS, Project Quality Assurance, México.
11. Gaskell, D.R (1996), Physical Metallurgy, Vol. I, 2nd edn, Elsevier Science, BV, Chapter Metallurgical Thermodynamics, pp413-469
12. Guerrero L., Manuel (2012), El agua. 5ª.Ed. Fondo de Cultura Económica, México. ISBN 978-968-16-8011-4. Pág. 30

13. Grupo Banco Mundial, Estadística de crecimiento económico (12 de Octubre, 2017)
Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>
14. Grupo Banco Mundial, Estadística de Crecimiento poblacional (12 de Octubre, 2017)
Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?page=3>
15. Grupo Banco Mundial, Estadística de Disponibilidad de agua dulce (15 de Octubre, 2017)
Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.INTR.PC?view=chart>
16. INEGI, Datos de General Cepeda (15 de Octubre, 2017) Recuperado de:
<https://www.inegi.org.mx/temas/practicas/>
17. INEGI, Precipitación pluvial en el noreste del país (15 de Octubre, 2017) Recuperado de:
<https://www.inegi.org.mx/temas/agua/>
18. Maldonado, Víctor, (2004), Capítulo 9 Filtración, de Vargas, Lidia (Coord.), *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*, pp. 83-144, Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
19. Mallevialle, Joël, Odendaal, Peter E. y Wiesner, Mark R. (Eds.), (1998), Capítulo 1 La incidencia de las membranas en el tratamiento del agua y de las aguas residuales., *Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones.*, pp. 1-12, México, McGraw-Hill, ISBN:84-481-1206-7
20. Medina San Juan, José Antonio. (2000). Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa. 1ª. Ed. Ediciones Mundi Prensa. España. ISBN 84-7114-849-8
21. Millán, Fernando (2003), Estudio Comparativo de la Dureza del Agua en el Estado Mérida y algunas localidades del Centro y Occidente de Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería Vol.24 No.1. pag40
22. Ministro de Sanidad y Política Social (2009) Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Composiciones Rali S.A., España.
23. Levine, Ira N. (2004) Fisicoquímica Volumen 1. 5ª Ed. McGraw-Hill. España. ISBN 84-481-3786.8
24. Ortega, Juan Manuel. (Agosto, 2001). La ósmosis inversa como proceso de potabilización de España. Trabajo presentado en el XXII Congreso de Centroamérica y Panamá de Ingeniería

Sanitaria y Ambiental “Superación Sanitaria y Ambiental: El Reto”, Tegucigalpa, Honduras.
Pág.2

25. Koch Membrane Systems, Inc. (2017) Super-Cor Ultrafiltration Modules: Ultrafiltration Multitube Modules for Juice Processing. Rev. 17-01, Massachusetts, USA.
26. Ramalho, Rubens S. (1990) Tratamiento de aguas residuales. 1ª Ed. Reverte S.A., México.
Pág 13.
27. Rigola, Manuel (1990) Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y aguas residuales. 1ª. Ed. Editorial Marcombo. Colombia.
28. Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S.,... Sanz, J. (2006) Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. 1ª Ed. Confederación Empresarial de Madrid, España.
29. Schoeman, Japie y Thompson, Mark, (1998), Capítulo 12 Electrodialisis, Mallevalle, Joël, Odendaal, Peter E. y Wiesner, Mark R. (Eds.), *Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones.*, pp. 293-375, México, McGraw-Hill, ISBN:84-481-1206-7
30. Tylor, James y Jacobs, Ed, (1998), Capítulo 9 Ósmosis Inversa y Nanofiltración., Mallevalle, Joël, Odendaal, Peter E. y Wiesner, Mark R. (Eds.), *Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones.*, pp. 293-375, México, McGraw-Hill, ISBN:84-481-1206-7