

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA**  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
**DEL PERÚ**

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA  
PRODUCIR AGUA ULTRA PURA EN EL LABORATORIO DE  
MANUFACTURA DE LA PUCP**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

**Pedro Daniel Rivas Nieto**

**ASESOR: Ing. Fernando Ezeta Ferrand**

Lima, Abril del 2019



© 2019, Pedro Rivas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A mis padres, por su incondicional apoyo en cada paso de mi vida.

A Fernando, por su amistad y guía durante el desarrollo de este proyecto.



## RESUMEN

El presente trabajo consistió en explorar y encontrar una opción energéticamente y económicamente más eficiente que el proceso de destilación simple para la producción de agua ultra pura en el laboratorio de manufactura de la PUCP. La opción alternativa elegida fue una máquina de ósmosis inversa y deionización de agua suministrada por la red de agua potable.

Esta tesis desarrolló el diseño mecánico de una máquina que utilice los procesos de purificación del agua mediante una membrana de ósmosis inversa y cartuchos de resina iónica, la selección de componentes, la elaboración de los planos necesarios y la estimación de los costos de fabricación, armado y funcionamiento de la máquina.

Para realizar el diseño, primero se definió el caudal y calidad de agua requeridas por el laboratorio y también la calidad y propiedades físicas del agua suministrada por la red. Con esos datos, se procedió a seleccionar una membrana de ósmosis inversa que pudiera producir dicho caudal con una alta tasa de purificación del agua. El siguiente paso fue aplicar la teoría de mecánica de fluidos para calcular las pérdidas de energía del fluido en tuberías y accesorios para el caudal requerido. Una vez conocido el caudal necesario y las pérdidas en el sistema, se procedió a seleccionar una bomba que pudiera cumplir con los requerimientos necesarios de presión y caudal, y que también use la energía eléctrica y el agua potable con la mayor eficiencia posible. A continuación, se aplicaron conceptos químicos de soluciones iónicas, para calcular la vida útil y la composición necesaria de una cama de resina desionizadora mixta que produjera agua ultra pura con un pH neutro, a partir de la composición aproximada del agua producida por la ósmosis inversa.

Una vez dimensionados y seleccionados los componentes, se procedió a desarrollar los planos y calcular los costos de adquisición, armado y operación de la máquina. La bomba seleccionada fue una bomba de desplazamiento positivo tipo diafragma y la membrana de ósmosis inversa una membrana en espiral de poliamidas.

El costo total de adquisición de componentes, diseño y ensamblaje asciende a S/.6500.

## Contenido

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	4
ESTADO DE LA TECNOLOGÍA.....	4
1.1. Problemática.....	4
1.1.1. Calidad química .....	4
1.1.2. Calidad biológica.....	6
1.2. El fenómeno osmótico de difusión a través de una membrana .....	6
1.3. Membrana semipermeable .....	7
1.4. Mecanismo de la ósmosis.....	7
1.5. Ósmosis inversa .....	8
1.6. Algunas aplicaciones de la ósmosis inversa en la industria .....	10
1.7. Destilación vs Ósmosis.....	12
1.8. Estado de la tecnología de los equipos de ósmosis inversa .....	13
1.9. Estado de la tecnología de las membranas semipermeables de ósmosis inversa .....	13
1.9.1. Membranas en espiral.....	14
1.9.2. Membranas de poliamidas .....	15
1.10. Pre-tratamiento del agua.....	16
1.11. Intercambio iónico .....	20
CAPÍTULO 2 .....	24
CONCEPTO DE SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE INGENIERÍA .....	24
2.1. Requerimientos de la máquina .....	24
2.2. Requerimientos de entrada y salida .....	25
.....	25
2.3. Matriz morfológica .....	26

2.4. Concepto óptimo .....	26
2.5. Composición del agua potable .....	29
2.6. Presión osmótica.....	31
2.7. Balance de flujo y masa en la membrana de ósmosis inversa.....	32
2.8. Presión neta en la membrana ( $P_{NET}$ ) .....	33
2.9. Relación de flujo de agua a través de la membrana .....	35
2.10. Relación de flujo de soluto ( $F_s$ ).....	36
2.11. Selección de bombas de agua .....	37
2.12. Capacidad de intercambio iónico.....	42
2.12.1. Concentración mili equivalente .....	42
2.12.2. Capacidad de intercambio de las resinas de intercambio iónico.....	43
2.12.3. Proceso químico de desmineralización.....	44
CAPÍTULO 3 .....	45
DISEÑO MECÁNICO .....	45
3.1. Medición de la presión y caudal de la red.....	45
3.1.1. Presión de la red .....	45
3.1.2. Caudal máximo proporcionado por la red .....	46
3.2. Consideraciones previas .....	46
3.3. Selección de la membrana OI según el caudal requerido.....	47
3.4. Presión neta en la membrana de ósmosis inversa .....	48
3.5. Cálculo de la presión de permeado .....	55
3.6. Cálculo de la presión de alimentación .....	59
3.6.1. Pérdidas en los accesorios.....	60
3.6.2. Pérdidas en las tuberías.....	61
3.6.3. Pérdidas en los elementos de filtrantes .....	62
3.7. Ecuación para el cálculo de la recuperación.....	64
3.8. Selección de la bomba .....	65

3.8.1. Curvas características de las bombas de diafragma .....	65
3.8.2. Cálculo de la recuperación de agua ultra pura.....	67
3.8.3. Cálculo del caudal de permeado producido .....	69
3.8.4. Caudal de agua de rechazo producida .....	71
3.8.5. Eficiencia de las bombas de diafragma .....	71
3.9. Deionización.....	76
3.9.1. Flujo de servicio .....	76
3.9.2. Dureza del agua.....	77
3.9.3. Capacidad de intercambio iónico de las resinas catiónicas y aniónicas .	78
CAPÍTULO 4 .....	81
PLANOS .....	81
CAPITULO 5 .....	82
COSTOS.....	82
5.1. Costos de adquisición .....	82
5.1.1 Costos de adquisición de la máquina de ósmosis inversa .....	82
5.1.2. Costos fijos de la máquina de destilación simple .....	83
5.2. Costos de energía .....	83
5.2.1. Tarifa de energía eléctrica.....	83
5.2.2. Costos de energía de la máquina de ósmosis inversa .....	83
5.2.3. Costos de energía de la máquina de destilación simple .....	84
5.3. Costo del agua .....	85
5.3.1. Tarifa de agua potable.....	85
5.3.2. Costo del agua - Máquina de ósmosis inversa .....	85
5.3.3. Costo del agua - Máquina de destilación simple.....	86
5.4. Costos de partes consumibles.....	87
5.4.1. Costos de partes consumibles de la máquina de ósmosis inversa .....	87
5.4.2. Costos de partes consumibles de la máquina de destilación .....	87

5.5. Resumen de costos de operación .....	87
5.5.1. Costos de operación de la máquina de ósmosis inversa .....	87
5.5.2. Costos de operación de la máquina de destilación .....	88
5.6. Comparación de costos de máquina de destilación y ósmosis inversa .....	88
5.7. Comparación técnico económica de máquinas de ósmosis inversa .....	90
CAPÍTULO 6 .....	92
INSTRUCCIONES DE USO Y MANTENIMIENTO .....	92
6.1. Secuencia de primer arranque .....	93
6.2. Operación de la máquina .....	95
6.3. Cambio del cartucho de filtro de sedimentos .....	96
6.4. Cambio de los filtros de carbón activado .....	96
6.5. Cambio de la membrana semipermeable .....	96
CONCLUSIONES .....	97
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....	98
Bibliografía .....	99



## LISTA DE SÍMBOLOS

$Q_a$	: Caudal de agua de alimentación, en $m^3/s$
$Q_p$	: Caudal de agua de permeado, en $m^3/s$
$Q_r$	: Caudal de agua de rechazo, en $m^3/s$
$Q_{red}$	: Caudal de agua máximo suministrado por la red, en gal/h
$C_a$	: Concentración de solutos en el fluido de alimentación, en mg/L
$C_p$	: Concentración de solutos en el fluido de permeado, en mg/L
$C_r$	: Concentración de solutos en el fluido de rechazo, en mg/L
$C_{eq}$	: Concentración equivalente, en meq/L
$P_a$	: Presión de agua de alimentación, en Pa
$P_p$	: Presión de agua de alimentación, en Pa
$P_r$	: Presión de agua de alimentación, en Pa
$P_i$	: Presión de agua al ingreso de la máquina, en Pa
$P_p$	: Presión del fluido de permeado a la salida de la membrana de ósmosis inversa, en Pa
$Z_p$	: Altura del punto de salida del agua de permeado de la membrana de ósmosis inversa, en m
$V_p$	: Velocidad promedio del fluido de permeado, a la salida de la membrana de ósmosis inversa, en m/s
$Z_s$	: Altura del punto de salida del agua de permeado de la máquina de ósmosis inversa, en m
$V_s$	: Velocidad promedio del fluido de permeado a la salida de la membrana de la máquina, en m/s
$\pi_a$	: Presión osmótica del fluido al ingreso de la membrana, en Pa
$\pi_p$	: Presión osmótica del permeado (agua ultra pura), en Pa
$\pi_r$	: Presión osmótica del fluido de rechazo
$\Delta P_{NET}$	: Presión neta en la membrana de ósmosis inversa, en Pa
$\Delta P$	: Gradiente de presión en la membrana de ósmosis inversa, en Pa
$\Delta \pi$	: Gradiente de presión osmótica en la membrana de ósmosis inversa, en Pa
$\phi$	: Coeficiente osmótico
$i$	: Factor de van't Hoff
$M$	: Molaridad de la solución, en mol/L
$r$	: Recuperación

- $Rej$  : Rechazo, del inglés Rejection  
 $\dot{m}_a$  : Flujo másico de solutos en la alimentación, en mg/s  
 $\dot{m}_p$  : Flujo másico de solutos en el permeado, en mg/s  
 $\dot{m}_r$  : Flujo másico de solutos en el permeado, en mg/s  
 $J$  : Flujo de permeado por unidad de área superficial  
 $A$  : Área superficial de la membrana, en  $m^2$   
 $k_w$  : Coeficiente de transferencia de masa del solvente, en  $L/(m^2 \cdot h \cdot bar)$   
 $k_s$  : Coeficiente de transferencia de masa del soluto  
 $\Delta C_s$  : Gradiente de concentración de soluto  
 $\rho$  : Densidad del fluido, en  $kg/m^3$   
 $g$  : Aceleración de la gravedad, en  $kg/m \cdot s^2$   
 $\Delta P_{p\acute{e}rdidas}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en el sistema, en Pa  
 $\Delta P_{tuberías}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en las tuberías, en Pa  
 $\Delta P_{accesorios}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en los accesorios, en Pa  
 $\Delta P_{p\text{ accesorio}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en los accesorios en el circuito de permeado, en Pa  
 $\Delta P_{a\text{ accesorio}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en los accesorios en el circuito de permeado, en Pa  
 $\Delta P_{p\text{ tubería}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en las tuberías en el circuito de permeado, en Pa  
 $\Delta P_{a\text{ tubería}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en las tuberías en el circuito de alimentación, en Pa  
 $\Delta P_{p\text{ filtro}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en los filtros del circuito de permeado, en Pa  
 $\Delta P_{a\text{ filtro}}$  : Caídas de presión debido a pérdidas de energía en los filtros del circuito de alimentación, en Pa  
 $P_{bomba}$  : Presión suministrada por la bomba, en Pa  
 $P_p$  : Presión del fluido de permeado, en Pa  
 $P_i$  : Presión del fluido al ingreso de la máquina de ósmosis inversa, en Pa  
 $Z_i$  : Altura del punto de ingreso de agua de alimentación a la membrana de ósmosis inversa, en metros  
 $V_p$  : Velocidad promedio del punto de ingreso de agua de alimentación a la membrana de ósmosis inversa, en m/s

- $Z_a$  : Altura del punto de ingreso del agua de alimentación a la membrana de ósmosis inversa, en metros
- $V_s$  : Velocidad promedio del fluido en el punto de ingreso del agua de alimentación a la membrana de ósmosis inversa, en m/s
- $K_{acc}$  : Coeficiente de pérdidas en accesorios
- $H_t$  : Pérdida de presión en el tramo de tubería en metros
- $\lambda$  : Coeficiente de fricción de la tubería
- $L$  : Longitud del tramo de tubería
- $D_i$  : Diámetro interior de la tubería, en m
- $V$  : Velocidad promedio del fluido, en m/s
- $D_h$  : Diámetro hidráulico del fluido, en m
- $\nu$  : Viscosidad cinemática del fluido, en  $m^2/s$
- $\epsilon$  : Rugosidad absoluta de la tubería, en mm
- $w$  : Peso molecular, en g/mol
- $\eta$  : Eficiencia energética de la bomba
- $V$  : Voltaje de operación del motor eléctrico de la bomba de desplazamiento positivo, en Voltios
- $I$  : Corriente eléctrica consumida por el motor eléctrico de la bomba de desplazamiento positivo, en Amperios.
- $\phi$  : Factor de potencia del motor eléctrico de la bomba de desplazamiento positivo
- $Q_{DI}$  : Caudal de agua que circula por la cama de resina deionizadora mixta, en  $m^3/s$
- $V_{DI}$  : Volumen de resina deionizadora mixta contenida en el cartucho, en litros
- $CI$  : Capacidad de intercambio de la resina
- $gph$  : Galones por hora
- $gpm$  : Galones por minutos

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Estación de maquinado CNC .....	2
Figura 1. 2. Máquina de destilación simple.....	2
Figura 1. 3. Balde recolector de agua destilada.....	2
Figura 1. 4. Proceso de la ósmosis .....	7
Figura 1. 5. Proceso de ósmosis y ósmosis inversa .....	8
Figura 1. 6. Tamaño de los poros de la membrana de ósmosis inversa .....	9
Figura 1. 7. Comparación de los procesos de filtración por membrana .....	10
Figura 1. 8. Planta desalinizadora de ósmosis inversa .....	11
Figura 1. 9. Máquina de hemodiálisis con membranas de ósmosis inversa.....	11
Figura 1. 10. Rangos de aplicación de procesos de desalinización (9).....	12
Figura 1. 11. Esquema básico de un sistema de ósmosis inversa.....	13
Figura 1. 12. Diferentes tamaños de membranas de ósmosis inversa.....	13
Figura 1. 13. Ilustración del flujo de agua dentro de una carcasa de ósmosis inversa.	14
Figura 1. 14. Construcción de una membrana en espiral .....	14
Figura 1. 15. Membrana en espiral de poliamidas .....	15
Figura 1. 16. Sustancias problemáticas para las membranas de ósmosis inversa (9) .	16
Figura 1. 17. Estructura de un grano de carbón activado .....	18
Figura 1. 18. Resina de intercambio iónico vista en el microscopio .....	20
Figura 1. 19. Esquema a nivel atómico de resinas catiónica (izq.) y aniónica (der.) <sup>(12)</sup>	21
Figura 1. 20. Sistema de resina catiónica ácido fuerte + aniónica básica débil + aniónica básica fuerte .....	22
Figura 2. 1. Diagrama de caja negra .....	25
Figura 2. 2. Concepto de solución 3.....	28
Figura 2. 3. Esquema del volumen de control de la membrana de ósmosis inversa ....	32
Figura 2. 4. Presiones osmóticas en la membrana.....	34
Figura 2. 5. Efecto de la concentración de solutos del agua de alimentación en el flujo de permeado producido, para varias presiones (7).....	36
Figura 2. 6. Rechazo en función de la concentración de soluto en la alimentación, para varias presiones de alimentación (7) .....	37
Figura 2. 7. Flujo en un tubo.....	38
Figura 2. 8. Ejemplo de planta de bombeo de agua .....	38
Figura 2. 9. Esquema del proceso químico de desmineralización .....	44

Figura 3. 1. Flujo de permeado vs Presión neta en la membrana.....	47
Figura 3. 2. Esquema de las variables involucradas en el análisis .....	49
<b>Figura 3. 3. Configuración de los elementos a la salida del flujo de permeado .....</b>	<b>56</b>
Figura 3. 4. Diagrama del circuito de alimentación de la membrana.....	59
Figura 3. 5. Pérdida de presión vs Caudal para un filtro .....	63
Figura 3. 6. Curvas características de las bombas pre-seleccionadas (Caudal vs Presión).....	66
Figura 3. 7. Curvas características de varios tipos de bombas (Presión vs Caudal) ....	67
Figura 3. 8. Recuperación vs Presión de descarga .....	69
Figura 3. 9. Gráfica del caudal de permeado producido (GPH vs PSI) .....	70
Figura 3. 10. Eficiencia (%) vs Presión (PSI) .....	74
Figura 3. 11. Construcción de códigos de bomba.....	75
Figura 3. 12. Cartucho de resina iónica.....	76
Figura 5. 1. Costos variables de operación (soles/litro de agua purificada producida) .	88
Figura 5. 2. Costos fijos y variables de destilación y ósmosis inversa .....	89
Figura 5. 3. Costo de agua purificada de los equipos de ósmosis inversa domésticos	90
Figura 6. 1. Nomenclatura de válvulas .....	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Prioridades de diseño .....	26
Tabla 2. 2. Valoración de la característica en el concepto de solución .....	26
Tabla 2. 3. Análisis técnico económico.....	27
Tabla 2. 4. Cationes y aniones más comunes en el agua potable, en orden de abundancia .....	30
Tabla 2. 5. Rugosidad absoluta de diversos materiales (14) .....	41
Tabla 2. 6. Fórmulas para calcular el coeficiente de fricción en tuberías (14).....	41
Tabla 2. 7. Coeficiente de pérdidas $k_{acc}$ para distintos accesorios .....	42
Tabla 3. 1. Propiedades del agua a distintas temperaturas .....	46
Tabla 3. 2. Flujo de permeado en función de la presión según el fabricante .....	48
Tabla 3. 3. Cálculo de la presión osmótica del flujo de alimentación de la membrana.	51
Tabla 3. 4. Cálculo de la concentración de solutos en el flujo de permeado.....	52
Tabla 3. 5. Cálculo de la presión osmótica del flujo de permeado .....	53
Tabla 3. 6. Cálculo del factor de pérdidas en tuberías para el circuito de permeado ...	58
Tabla 3. 7. Cálculo del factor de pérdidas en accesorios para el circuito de permeado .....	58
Tabla 3. 8. Cálculo de $K_{a\ acc}$ de cada accesorio .....	60
Tabla 3. 9. Pérdidas en cada tramo de la tubería de alimentación .....	62
Tabla 3. 10. Caudal suministrado por la bomba a distintas presiones según el fabricante .....	65
Tabla 3. 11. Cálculo de la recuperación en varios puntos de operación .....	68
Tabla 3. 12. Caudal de permeado producido por la membrana en distintos puntos de operación .....	70
Tabla 3. 13. Caudal de agua de rechazo producido .....	71
Tabla 3. 14. Corriente eléctrica consumida en distintos puntos de operación.....	72
Tabla 3. 15. Potencia eléctrica consumida en distintos puntos de operación .....	72
Tabla 3. 16. Potencia aplicada al fluido .....	73
Tabla 3. 17. Eficiencia energética en distintos puntos de operación .....	73
Tabla 3. 18. Tabla de códigos para bypass de seguridad.....	75
Tabla 3. 19. Volumen de resina iónica en el cartucho .....	76
Tabla 3. 20. Concentración aproximada de solutos en el agua de permeado.....	77
Tabla 3. 21. Concentración equivalente aproximada de aniones en el permeado .....	79

Tabla 3. 22. Concentración equivalente aproximada de cationes en el permeado .....	79
Tabla 3. 23. Cálculo del volumen de agua que puede tratar el filtro de resina iónica...	79
Tabla 4. 1. Lista de planos .....	81
Tabla 5. 1. Costos fijos de diseño de la máquina de ósmosis inversa .....	82
Tabla 5. 2. Pliego tarifario ENEL – Lima Norte – Tarifa BT2.....	83
Tabla 5. 3. Estructura tarifa vigente - SEDAPAL .....	85
Tabla 5. 4. Costos variables de operación de la máquina de ósmosis inversa .....	87
Tabla 5. 5. Costos variables de operación de la máquina de destilación .....	88
Tabla 5. 6. Comparación técnico económica .....	89
Tabla 5. 7. Análisis técnico económico de las máquinas de ósmosis inversa .....	91
Tabla 6. 1. Posición de las válvulas durante el proceso de enjuague del pre-tratamiento .....	93
Tabla 6. 2. Posición de las válvulas durante el enjuague y purga de la membrana de ósmosis inversa .....	94
Tabla 6. 3. Posición de las válvulas para primer arranque.....	94
Tabla 6. 4. Posición de las válvulas según la función que debe desempeñar la máquina. ....	95

## INTRODUCCIÓN

Desde que se comenzaron a utilizar máquinas herramientas para el corte o mecanizado con arranque de viruta de metales, el calor originado durante dichas operaciones fue un problema presente.

Los filos de las cuchillas experimentan una pérdida de dureza debido al calor y esto a su vez reduce su vida útil. La dilatación térmica de una pieza distorsiona las dimensiones y hace imposible una comprobación precisa de las tolerancias, y en el caso de piezas de longitud considerable, puede deformar permanentemente la misma. Una alta temperatura de las virutas puede representar también un serio riesgo para el operario si no se toman las precauciones necesarias (1).

Esta problemática indujo a los técnicos de manufactura a buscar métodos para refrigerar los filos, piezas y virutas. El agua es un refrigerante muy bueno, debido a su gran calor específico y su buena conductibilidad térmica, pero su tendencia a oxidar el metal y además por su elevada tensión superficial (lo cual implica pobres cualidades mojantes) hicieron necesaria la búsqueda de mejores fluidos de corte. Actualmente en la industria se utiliza aceites emulsionables mezclados con agua para combinar la capacidad refrigerante del agua con la capacidad lubricante y antioxidante del aceite. Estos aceites están compuestos basándose en sulfonatos de petróleo, solubles en los aceites minerales, que los hace fácilmente emulsionables con agua (2).

En el taller de manufactura de la PUCP se utiliza agua destilada para mezclar con el aceite refrigerante del torno CNC, la estación de maquinado y varias otras máquinas



de mecanizado no automatizadas. El aceite refrigerante utilizando es el aceite emulsionable marca VISTONY MUTURROL.



**Figura 1. 1.** Estación de maquinado CNC

La máquina destila agua pura mediante evaporación – condensación a partir del agua de la red.



**Figura 1. 2.** Máquina de destilación simple



**Figura 1. 3.** Balde recolector de agua destilada

La destilación mediante evaporación – condensación implica dos cambios de fase del agua, primero se necesita calentar el agua de la red hasta la temperatura de evaporación y luego enfriar el condensado para recoger la forma líquida. Energéticamente el cambio de fase es un proceso muy costoso, además se necesita agua potable de la red para enfriar el serpentín que conduce el condensado. Este

proceso también es bastante lento, según se ha comprobado, para llenar un depósito de 13 galones se necesita de 8 a 10 horas de funcionamiento de la máquina de destilación. Al dividir esos 13 galones entre 8 y 10 horas, se ubica la capacidad de producción de agua destilada de la máquina en el rango de 1.6 a 1.3 galones por hora, respectivamente.

El propósito de esta tesis es diseñar una máquina que utilice un proceso alternativo a la destilación para producir agua de la misma calidad que la destilada, utilizando menos energía, desperdiciando menos agua, y generando un caudal mayor de agua ultra pura. Se denomina agua ultra pura al agua extremadamente pura, que contiene concentraciones muy bajas (prácticamente nulas) de sales, de componentes orgánicos, pirógenos, sólidos suspendidos y bacterias. El proceso alternativo elegido es el de ósmosis inversa, una tecnología que se utiliza para desalinizar y purificar agua desde 1950.

En el Capítulo 1 se expone la problemática, y el estado de la tecnología de los equipos de ósmosis inversa y la tecnología relacionada.

En el Capítulo 2 se elabora el concepto de solución y se presentan los conceptos teóricos de ingeniería que se usarán para el diseño y selección de componentes.

En el Capítulo 3 se realiza el diseño y selección de componentes del concepto de solución óptimo.

En el Capítulo 4 se presentan los planos para construir la máquina.

En el capítulo 5 se estiman los costos de adquisición de componentes, diseño de ingeniería y los costos variables de operación y reemplazo de partes consumibles.

En el capítulo 6 se detallan las instrucciones para su uso y mantenimiento en el laboratorio.

Finalmente, se exponen las conclusiones, recomendaciones y se lista la bibliografía utilizada.

En los anexos se presentan documentos de consultas adicionales.

## **CAPÍTULO 1**

### **ESTADO DE LA TECNOLOGÍA**

En el presente capítulo se exponen los conceptos fundamentales que serán base para la elaboración del presente trabajo. Primero, se expone la problemática del taller de manufactura de la PUCP, así como los requerimientos del equipo que se necesita. Seguidamente, se expondrán los antecedentes teóricos del fenómeno osmótico y principios básicos de física. Por último, se detalla la tecnología disponible hasta el momento.

#### **1.1. Problemática**

La calidad del agua tiene un marcado efecto en la calidad de la mezcla de agua y aceite emulsionante y su capacidad de lubricación y enfriamiento. Tanto la calidad química y biológica del agua deben ser elegidas para complementar a la mezcla de agua y aceite emulsionante, o viceversa.

##### **1.1.1. Calidad química**

Si el agua con la que mezclamos el aceite de corte tiene disueltas sales alcalino-térreas como sulfatos alcalinos, cloruro de cal o magnesio, etc., no es pura y se dice que tiene demasiada dureza. Un agua dura afectará los agentes emulgentes del aceite de corte, formando precipitados que, a su vez, permitirán la aglomeración de partículas de aceite mineral y destruirán o harán inestable la emulsión (2).

La ligera dureza del agua potable también puede formar depósitos o incrustaciones de carbonatos u otras sales en las tuberías del sistema de refrigeración de la máquina.

Es posible compensar una ligera dureza del agua mediante una correcta formulación de la mezcla de agua y aceite, pero los costos y el compromiso de mantener un adecuado rendimiento de la emulsión hacen preferible el tratamiento del agua. Cuando la dureza del agua excede 100ppm (100mg/L) su tratamiento se hace obligatorio (3).

El agua potable de Lima puede tener una dureza de hasta 500 mg/L (4).

Existen tres opciones para tratar la dureza del agua:

1. La eliminación de los iones de calcio y magnesio agregando un detergente para formar carbonatos insolubles que se precipiten o procesando el agua a través de un intercambiador iónico de zeolita. En ambos casos la concentración de sodio aumentará y puede provocar formación de espuma.
2. Remover todos los iones por absorción química, es decir agua deionizada equivalente al agua destilada.
3. Utilizar el condensado de un hervidor (destilación).

El agua deionizada y destilada son libres de cloruros, sulfatos y otras sustancias inorgánicas, las cuales pueden afectar la estabilidad de la emulsión o promover la corrosión y colonización por bacterias (3).

Para prevenir la corrosión de los metales, la emulsión de agua y aceite debe mantenerse alcalina con valores de pH de 7 o más, típicamente de 8 a 10. También se agregan aditivos anti corrosivos a los aceites. Una excesiva alcalinidad tampoco se puede tolerar, debido a la irritación de la piel humana y porque el aluminio y magnesio serían atacados (3).

**Lo que podemos concluir de la anterior información, es que para garantizar una mejor calidad química del agua, para la mezcla de aceite emulsionante y agua, ésta debe tener una mínima cantidad de sólidos disueltos menor a 100 mg/L e idealmente lo más cercano a 0, para combinar con el aceite refrigerante, y tener un pH neutro o ligeramente alcalino.**

### 1.1.2. Calidad biológica

El medio acuoso de las emulsiones, combinado con la disponibilidad de nutrientes forma un potencial sustrato de crecimiento de microorganismos como bacterias, moho, hongos y levaduras. Los aceites emulsionables son inmunes a los microorganismos, pero después de ser diluidos en agua el crecimiento de organismos introducidos a través del agua o contacto con los seres humanos, el aire, o pre existentes durante la instalación de la máquina etc., puede ser bastante rápido. Estos microorganismos se multiplican y forman hongos y fermentados que descomponen los ácidos grasos y forman ácidos orgánicos, aumentando el grado de acidez (disminuyendo el pH) y por tanto, el efecto corrosivo del fluido refrigerante. (3)

El peligro de obstrucción de las cañerías del lubricante refrigerador por colonias de hongos filamentosas puede ocurrir también en casos más raros.

Las medidas para evitar la proliferación de microorganismos es una adecuada limpieza y esterilización de la máquina y sus componentes, adición de químicos biocidas al fluido de corte, y la utilización de agua purificada, por ejemplo, deionizada. (5)

**El agua debe estar libre de microorganismos en su totalidad para garantizar la mejor calidad biológica de la mezcla de agua y aceite emulsionante, debe ser estéril.**

Finalmente, según el manual del torno TND 160, el fluido refrigerante de corte debe presentar, en todo momento de su uso, los siguientes valores característicos (6):

**Concentración mínima:** Conforme especificaciones del fabricante. En este caso, el fabricante VISTONY recomienda una proporción de agua y refrigerante de 20:1, pero debido a las altas revoluciones del torno CNC, se utiliza en la práctica una proporción de 10:1.

**Nivel de pH:** El pH de la mezcla debe estar entre 8.3 – 9.3.

**Cantidad de bacterias:** Conforme especificaciones del fabricante (máximo 104 por ml).

**Hongos :** Ninguno.

### 1.2. El fenómeno osmótico de difusión a través de una membrana

La ósmosis es un fenómeno físico relacionado con el movimiento de un solvente a través de una membrana semipermeable. Tal comportamiento supone una difusión

simple a través de la membrana, sin gasto de energía. La ósmosis del agua es un fenómeno biológico importante para el metabolismo celular de los seres vivos.

### 1.3. Membrana semipermeable

Se denomina membrana semipermeable a aquella membrana que contiene poros o agujeros de tamaño molecular, normalmente alrededor de 0.0001 micras. El tamaño de los poros es tan pequeño, que dejan pasar las moléculas pequeñas, pero no las grandes. Por ejemplo, en el caso de una solución de azúcar en agua, deja pasar las moléculas de agua, que son pequeñas, pero no las de azúcar, que son más grandes.

### 1.4. Mecanismo de la ósmosis

Si una membrana como la descrita separa un solvente líquido (por ejemplo agua) en dos compartimentos, uno de solvente con menor concentración de soluto (por ejemplo agua pura) y otro con mayor concentración de soluto (por ejemplo agua salada), se genera un flujo de partículas solventes a través de la membrana hacia la zona de menor concentración de soluto.

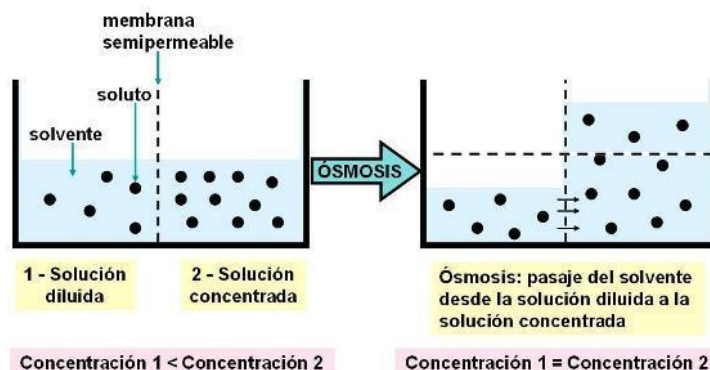


Figura 1. 4. Proceso de la ósmosis<sup>1</sup>

Cuando el agua pasa de la zona de baja concentración a la de alta concentración, hay un flujo neto mayor de moléculas de agua que pasan desde la zona de baja concentración a la de alta. Este flujo de solvente origina un diferencial de presión entre ambos compartimentos, debido a la columna de solvente desplazada. El solvente fluirá hacia el soluto hasta que ambas soluciones alcancen el equilibrio isotónico. A la presión de la columna de solvente desplazada se le da el nombre de presión osmótica.

<sup>1</sup> Imagen extraída de <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/ncarroq/2014/11/09/404/>

## 1.5. Ósmosis inversa

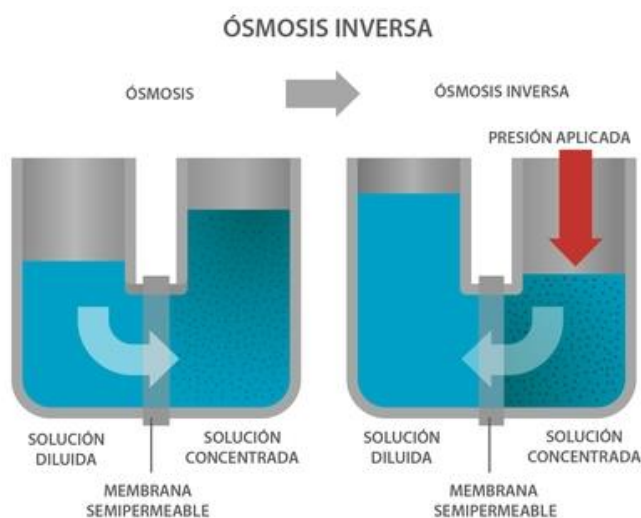


Figura 1. 5. Proceso de ósmosis y ósmosis inversa<sup>2</sup>

Lo descrito hasta ahora ocurre en situaciones normales, en que los dos lados de la membrana estén sometidos a la misma presión externa.

Si se aplica una presión adicional del lado de mayor concentración, como se muestra en el lado derecho de la figura 1.5, puede lograrse que el agua pase desde el lado de alta concentración al de baja concentración de sales. En dicha situación, se está revirtiendo el proceso de ósmosis regular, por eso se le llama ósmosis inversa. Téngase en cuenta que en la ósmosis inversa a través de la membrana semipermeable sólo pasa el solvente. Es decir, el agua de la zona de alta concentración pasa a la de baja concentración (7).

Si la alta concentración es de sal, por ejemplo agua marina, al aplicar presión, solo el agua, no la sal, pasa al otro lado de la membrana. Es decir, el agua se ha desalinizado por ósmosis inversa, y puede llegar a ser potable.

En la siguiente figura se puede ver en perspectiva el tamaño de los poros de las membranas semipermeables utilizadas para realizar el proceso de ósmosis inversa. Estos poros son incluso menores que el tamaño de las moléculas de sal disueltas.

<sup>2</sup> Imagen extraída de <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Membrane-Processes.html>

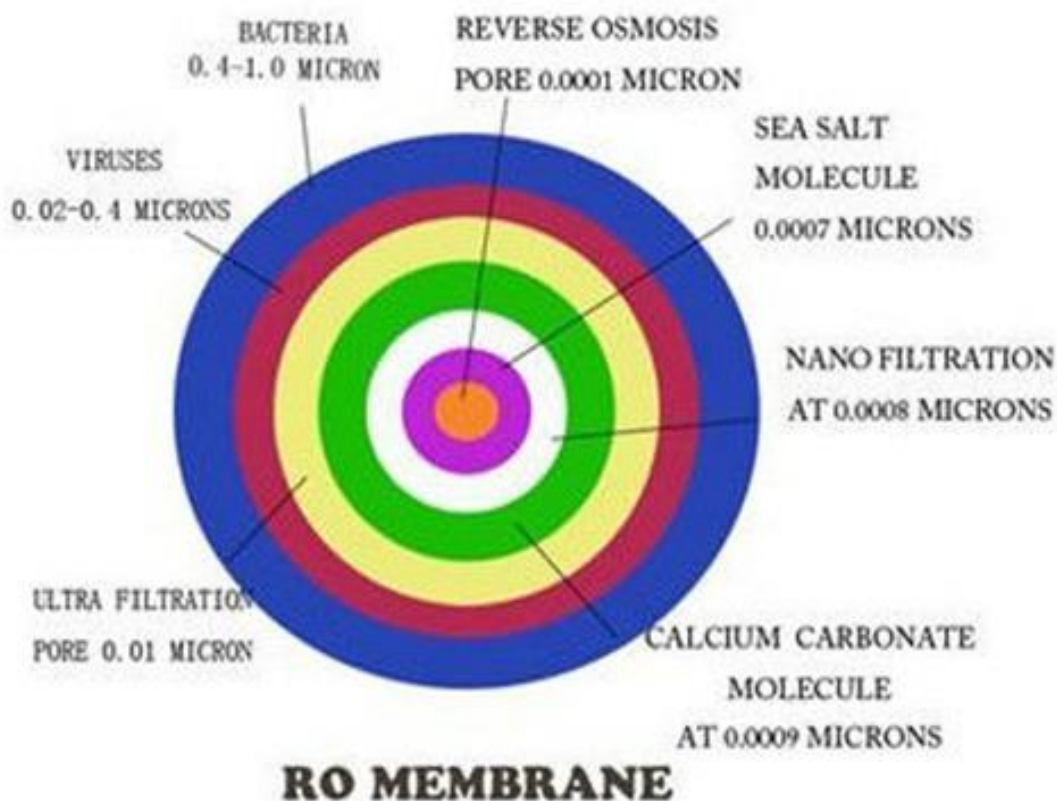


Figura 1. 6. Tamaño de los poros de la membrana de ósmosis inversa<sup>3</sup>

Tampoco permiten el paso de bacterias, virus y otros compuestos disueltos como la sal y los carbonatos de calcio.

En la siguiente imagen podemos comparar la efectividad de la ósmosis inversa con respecto a otros métodos de purificación de agua mediante membrana como la micro, ultra y nano filtración. Solamente mediante la ósmosis inversa es posible llegar al punto de filtrar las sales y otros compuestos disueltos.

<sup>3</sup> Imagen extraída de [http://www.pure-pro.com/purepro\\_membrane.htm](http://www.pure-pro.com/purepro_membrane.htm)



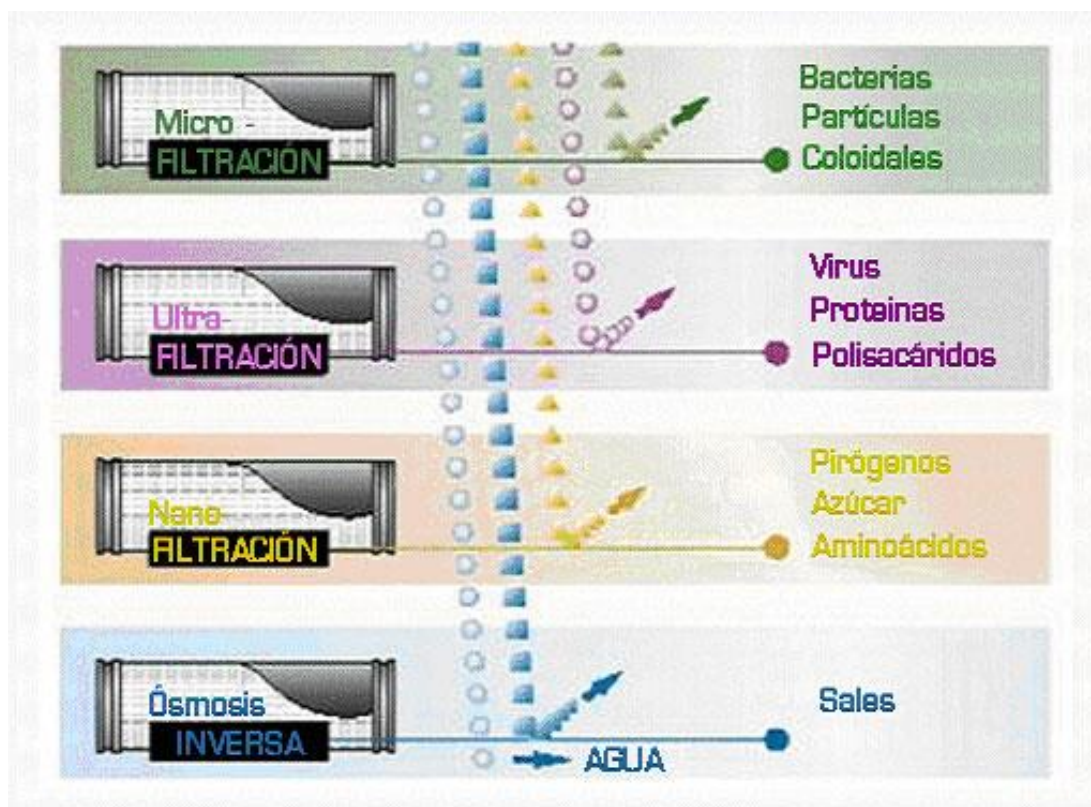


Figura 1. 7. Comparación de los procesos de filtración por membrana<sup>4</sup>

### 1.6. Algunas aplicaciones de la ósmosis inversa en la industria

- **Reducción de la dureza**

Las aguas duras contienen iones de calcio y magnesio que pueden precipitar combinados con iones como carbonatos, sulfatos o hidróxidos estos precipitados se van acumulando (obstruyendo) en las tuberías de distribución, calentadores, etc. Con la ósmosis inversa se reducen estos precipitados. En el caso de equipos industriales muy costosos es muy recomendable un proceso de suavizado por deionización.

- **Desalinización:**

Cada vez es más frecuente el uso de la desalinización mediante ósmosis inversa para producir agua para consumo humano, y la tendencia probablemente continuará conforme aumenta la escasez de agua a causa de las presiones que producen

<sup>4</sup> Imagen extraída [http://www.pure-pro.com/purepro\\_membrane.htm](http://www.pure-pro.com/purepro_membrane.htm)

el crecimiento demográfico, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación de otras fuentes de agua.



Figura 1. 8. Planta desalinizadora de ósmosis inversa<sup>5</sup>

Los sistemas de desalinización actuales están diseñados para tratar el agua costera y marina, como también aguas salobres interiores.

- **Producción de agua ultra pura para laboratorios**

Además de eliminar las sales en el agua y una gran variedad de sustancias orgánicas, también depura microorganismos consiguiendo un agua ultra pura, que se puede utilizar para aplicaciones donde se necesita una altísima pureza, finalizando su desmineralización total con el intercambio iónico.

- **Producción de agua ultra pura para hemodiálisis:**

El agua potable, empleada para consumo humano, no sirve para la fabricación del líquido de diálisis, es necesario purificarla.



Figura 1. 9. Máquina de hemodiálisis con membranas de ósmosis inversa<sup>6</sup>

El elemento fundamental en la mayoría de los tratamientos de agua para hemodiálisis es la ósmosis inversa. Cuando se quiera obtener un agua ultra-pura, será necesario colocar en serie una unidad deionizadora u otro sistema de ósmosis inversa en línea (8).

---

<sup>5</sup> Imagen extraída de [blog.nuestroclima.com/como-funciona-una-planta-desalinizadora/](http://blog.nuestroclima.com/como-funciona-una-planta-desalinizadora/)

<sup>6</sup> Imagen extraída de <http://osmovic.com.ar/tratamiento-de-agua-para-hemodialisis/>

### 1.7. Destilación vs Ósmosis

En el caso de la desalinización, a bajos niveles de sólidos disueltos, la ósmosis inversa es también la mejor opción para la obtención de agua ultra pura y para obtener una reducción aún mayor de sólidos disueltos, se puede combinar con el intercambio iónico.

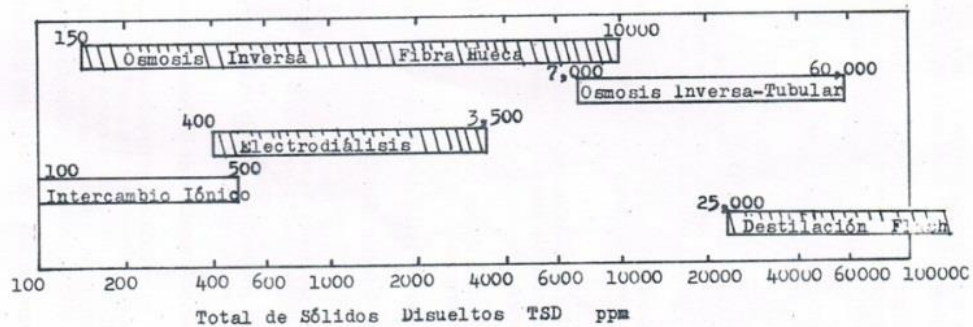
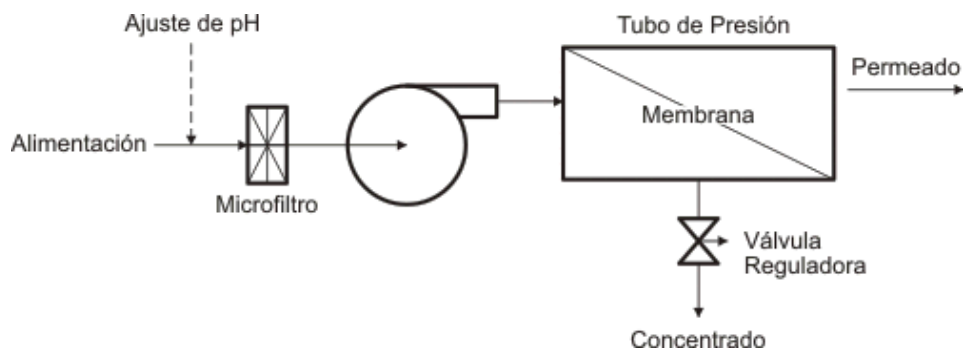


Fig. 5.33 Rangos normales de operación en Procesos de Desalinización

### Figura 1. 10. Rangos de aplicación de procesos de desalinización (9)

La destilación implica un cambio de fase del agua de líquida a gaseosa (evaporación) y después un segundo cambio de fase de gaseosa a líquida (condensación), esto demanda mucha energía. La purificación del agua mediante ósmosis inversa solo utiliza presión relativamente alta para forzar el paso del agua de una disolución concentrada a una menos concentrada a través de una membrana semipermeable. Esta diferencia hace la purificación de agua mediante ósmosis inversa mucho más económica que la destilación. Conforme avance la tecnología de las membranas de ósmosis inversa, este proceso se convertirá en la principal técnica para la desalinización de agua (10).

### 1.8. Estado de la tecnología de los equipos de ósmosis inversa



**Figura 1. 11.** Esquema básico de un sistema de ósmosis inversa<sup>7</sup>

En su forma más simple, una máquina de ósmosis inversa está formada por los siguientes elementos

- La membrana de ósmosis inversa es el corazón de la máquina.
- La primera etapa de pre-tratamiento del agua sirve para proteger la bomba y la membrana de sustancias que puedan ser perjudiciales.
- Una bomba de agua, que bombea el agua de alimentación y genera la presión para que se produzca el fenómeno de ósmosis inversa dentro de la membrana.
- Una válvula reguladora de presión que mantenga la presión dentro de la membrana en el valor deseado.

### 1.9. Estado de la tecnología de las membranas semipermeables de ósmosis inversa

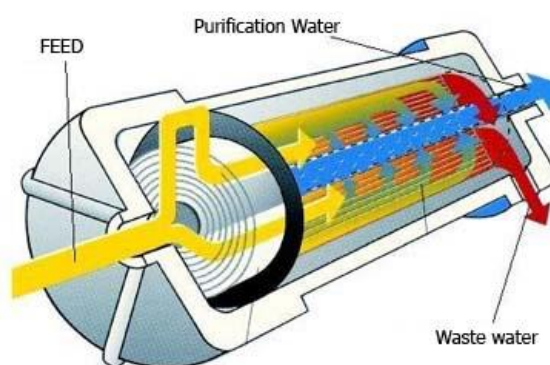


**Figura 1. 12.** Diferentes tamaños de membranas de ósmosis inversa<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Imagen extraída de <http://procesosbio.wikispaces.com/%C3%93smosis+inversa>

<sup>8</sup> Imagen extraída de <http://neoropurifiers.com/product/reverse-osmosis-ro-membranes-commercial/>

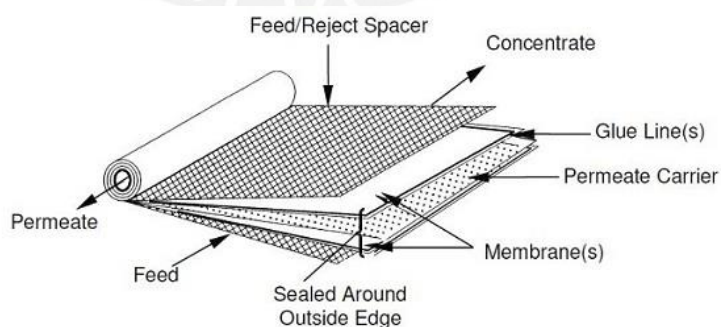
La resistencia al flujo a través de una membrana es inversamente proporcional a su espesor. Para obtener un flujo de agua apreciable, la membrana activa debe ser extremadamente delgada, en el caso de membranas de ósmosis inversa y de nano filtración el rango es de 0.1 a 2  $\mu\text{m}$ . Un material tan delgado carece de integridad estructural, por tanto las membranas están hechas de varias capas, una capa "activa" que provee capacidades de filtración y otras capas más gruesas y porosas que proveen soporte estructural.



**Figura 1. 13.** Ilustración del flujo de agua dentro de una carcasa de ósmosis inversa<sup>9</sup>

### 1.9.1. Membranas en espiral

Las membranas en espiral están construidas de varios elementos en serie. La construcción básica de una membrana en espiral se muestra en la figura a continuación:



**Figura 1. 14.** Construcción de una membrana en espiral<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Imagen extraída de <http://www.osmosisinversafiltroagua.com/la-membrana/>

<sup>10</sup> Imagen extraída de <https://web.utk.edu/~qhe2/MembraneModule/Photos/Membranes-PD3.jpg>

### 1.9.2. Membranas de poliamidas

Las membranas de poliamidas son químicamente y físicamente más estables que las membranas de acetato de celulosa, generalmente inmunes a la degradación bacteriológica, estable en un rango de pH de 3 a 11, y no se hidrolizan con el agua. Bajo condiciones de presión y temperaturas similares, las membranas de poliamidas pueden producir un flujo mayor de agua y un rechazo de sal mayor que las membranas de acetato de celulosa. Sin embargo, las membranas de poliamidas son más hidrofóbicas y susceptibles a la acumulación de materiales en la superficie y consecuente bloqueo de los poros que las membranas de acetato de celulosa y no son tolerantes a los iones de cloro libres en ninguna concentración. Cualquier agente oxidante como los cloruros en el agua de alimentación causará un rápido deterioro de la membrana. Para la mayoría de aplicaciones, una decloración es requerida en la alimentación si el agua contiene cloruros. La decloración puede ser realizada con bisulfato de sodio, dióxido de azufre o carbón activado. Sensores e instrumentación deben ser instalados para monitorear el agua de alimentación para detectar oxidantes que puedan dañar el material y detener el proceso si se detecta agentes oxidantes. Las membranas de poliamidas son normalmente de película delgada y otros materiales como poliésteres de azufre utilizados para la capa de soporte. Ésta es una capa estándar de ultrafiltración y provee una resistencia pequeña al flujo.



**Figura 1. 15.** Membrana en espiral de poliamidas<sup>11</sup>

La membrana lleva una envolvente de poliéster y una capa de PVC pegada a ella por cada lado comprimiendo cada membrana.

---

<sup>11</sup> Imagen extraída de <https://www.alfalaval.com/globalassets/images/products/separelacionn/membranes/spiral-membranes/spiral-membranes-hiw-320.jpg>

### 1.10. Pre-tratamiento del agua

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, las membranas de ósmosis inversa necesitan para su operación un control de las condiciones del agua de alimentación para asegurar su integridad física y su adecuado funcionamiento. La temperatura, pH y la concentración de algunos elementos o iones pueden afectarlas negativamente. Por tanto, toda máquina de ósmosis inversa necesita de un adecuado pre-tratamiento del agua de alimentación de las membranas.

Las sustancias causantes de problemas en las membranas de ósmosis inversa se resumen en el cuadro siguiente:

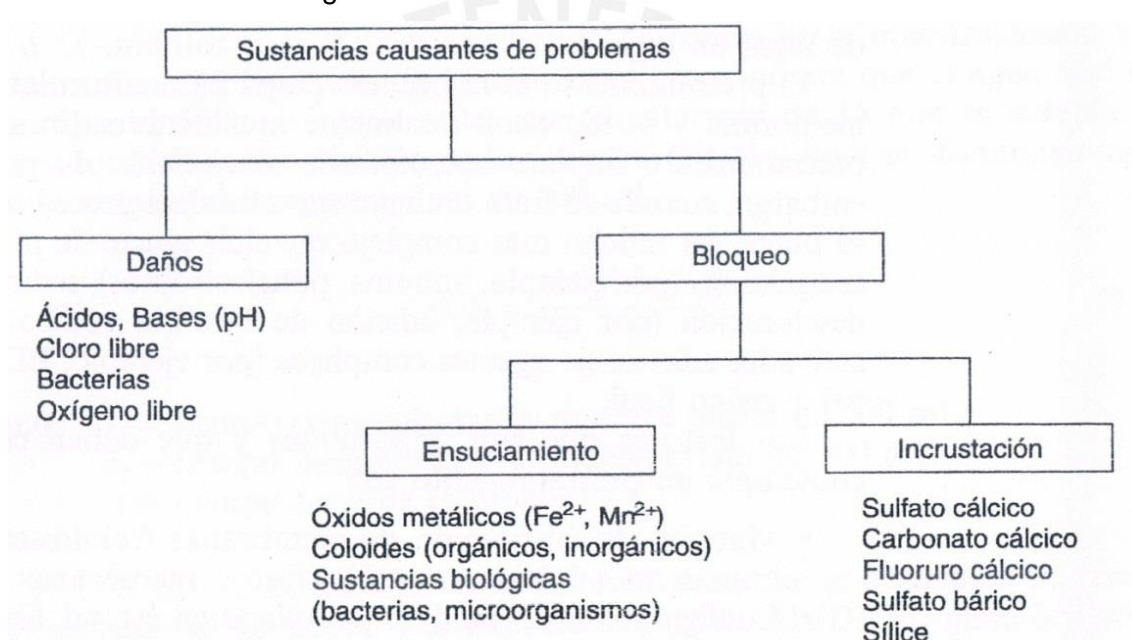


Figura 1. 16. Sustancias problemáticas para las membranas de ósmosis inversa (9)

#### 1.10.1. Pre tratamiento para evitar daños a la membrana:

- **Ácidos/Bases (control del PH):**

Las membranas de poliamidas son estables en un rango de pH de 3 a 11. El agua potable en el Perú tiene un pH del alrededor de 7.5, que es el valor normal casi neutro y no afectará nuestra membrana de ósmosis inversa, por lo tanto, no es necesario un pre-tratamiento para regular el pH del agua.

- **Cloro libre:**

Las membranas de poliamidas no son tolerantes a los iones de cloro libres en ninguna concentración. Una descloración es requerida en la alimentación si el agua contiene

cloruros y puede ser realizada con bisulfato de sodio, dióxido de azufre o carbón activado. Debido a que el agua potable contiene iones cloruro como resultado del tratamiento y sales disueltas, es necesario eliminarlo del agua.

La inyección química de metal bisulfito de sodio puede ser también utilizada para la decoloración, inyectándose a una tasa de dos ppm (partes por millón) por cada ppm de cloro libre.

- **Bacterias:**

Las membranas de poliamidas son generalmente inmunes a la degradación bacteriológica.

### **1.10.2. Pre tratamiento para evitar el bloqueo por acumulación de suciedad**

- **Partículas sólidas**

La acumulación de sedimentos e impurezas sólidas en la membrana la puede dañar físicamente o bloquear si la acumulación es significativa. Para proteger la membrana de partículas sólidas, se colocará un filtro de sedimentos como primera etapa del sistema de pre tratamiento de la máquina de ósmosis inversa.

- **Sustancias biológicas (bacterias, microorganismos):**

La presencia de bacterias en el agua potable de San Miguel no es significativa, pero las membranas de ósmosis inversa sí pueden ver afectado su rendimiento si la acumulación de bacterias es considerable después de un tiempo de funcionamiento prolongado.

Las opciones para lidiar con las sustancias biológicas son:

- Filtro de carbono activado granular
- Lámpara UV
- Lavado de la membrana

### **1.10.3. Filtro de sedimentos y partículas**

Para proteger las membranas y la bomba de cualquier sólido disuelto que pueda haber es necesario tener un filtro de partículas como primera pieza de equipo en el sistema de pre-tratamiento, que sirve además de protección para todos los elementos posteriores de pre-tratamiento del sistema.



Comercialmente se dispone de estos filtros donde la estructura del material filtrante tiene poros o aberturas de un cierto tamaño. Se pueden conseguir filtros de sedimentos en un rango de 1 a 100 micras de diámetro en el poro y el material del elemento filtrante pueden ser fibras de policarbonato o una película de celulosa. También los hay de material de tela y lona, y de aglomerado de celulosa. Necesariamente, se tendrá que cambiar el filtro en cuanto se tengan condiciones cercanas al punto de saturación, o periódicamente de forma preventiva. Se debe monitorear la caída de presión en el filtro, la calidad química del agua a la salida y el aspecto visual del filtro para identificar si existe saturación.

#### 1.10.4. Filtro de carbón activado

El carbón activado es un tipo de carbón que se caracteriza por poseer una cantidad muy grande de micro poros (poros menores a 4 nanómetros de diámetro). Activar un carbón consiste en hacerlo poroso para ampliar su capacidad de absorción (11).

##### Estructura física

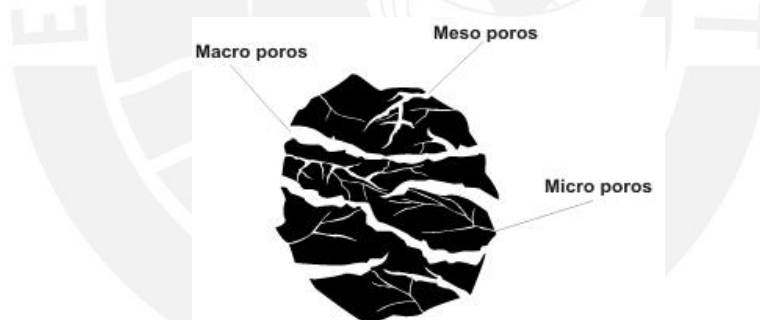


Figura 1. 17. Estructura de un grano de carbón activado<sup>12</sup>

Los carbones activados presentan una distribución polimodal de poros interconectados entre sí, dando lugar a una estructura parecida a una esponja, en la que se distinguen los micro poros (ancho <2nm), meso poros (con ancho entre 2 y 50nm) y macro poros con ancho mayor de 50nm.

---

<sup>12</sup> Imagen extraída <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>

### **Usos del carbón activado**

Los filtros con carbón activado se utilizan generalmente en la purificación de aire, agua y gases, para quitar vapores de aceite, sabores, olores y otros hidrocarburos del aire y de gases comprimidos.

Para su aplicación en tratamiento de agua se requiere 1 a 3 pies cúbicos de carbón activado para tratar 1 millón de litros de agua, siempre y cuando la concentración de cloro libre sea igual o menor a 1 ppm (parte por millón).

Un filtro de carbón activado debe ser reemplazado entre cada 2.800 y 3.750 litros de agua filtrada aproximadamente (11), lo cual es solo un referente pues la capacidad de filtración y vida del filtro dependerán de la calidad del agua que se filtra. El tamaño del poro del carbón activado y el tamaño de las partículas a filtrar también influyen en la vida y capacidad de filtración del filtro de carbón activado.

La única forma de saber si un filtro de carbón activado ha dejado de funcionar es hacer un análisis del agua resultante del filtro, pues ni el sabor, ni el olor, pueden ser un referente certero.

En el caso de un carbón activado térmicamente (sin la presencia de químicos que no sean vapor de agua y gases de combustión) aumenta el pH de los primeros litros de agua que se trata con el mismo. Esto se debe a que todos los vegetales tienen cantidades importantes de sodio, potasio, calcio y otros cationes que, en el proceso de carbonización, permanecen en el carbón en forma de óxidos. Estos óxidos se convierten en hidróxidos al entrar en contacto con el agua, se disuelven en la misma y aumentan su pH.

Cuando no varía el pH de los primeros litros de agua que entran en contacto con un carbón, puede tratarse de un carbón de pH ajustado o de un carbón ultra puro (libre de solubles).

### **Eliminación de cloro libre**

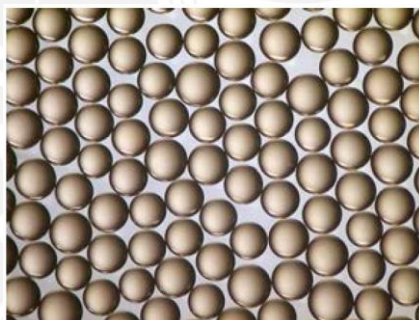
Para este proyecto se usarán membranas de poliamidas en espiral, debido a que necesitan la menor cantidad de pre-tratamiento y son comercialmente las más utilizadas, lo cual reduce su costo y mejora su disponibilidad. Es entonces, indispensable, el uso de filtros de carbón activado para retirar los iones cloruro del agua antes de su paso por la membrana como se expuso anteriormente.

La decoloración habitualmente se lleva a cabo utilizando carbón activado a una tasa de 3.7 gpm (galones por minuto) de caudal de servicio por pie cúbico de carbón (11).

### 1.11. Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso en el cual iones de un material de intercambio insoluble son desplazados por iones de otro material en solución. El uso más generalizado de este proceso es el de suavizar agua. Por ejemplo para dicha aplicación, iones de una resina de intercambio iónico reemplazan los iones de calcio y el magnesio en el agua, reduciendo su dureza. También se pueden utilizar este proceso para lograr la completa desmineralización del agua. El intercambio iónico ha sido usado en aplicaciones de tratamiento de aguas servidas para remover nitrógeno, metales pesados y en general reducir la cantidad de sólidos totales disueltos.

Los materiales utilizados para el proceso de intercambio iónico pueden ser naturales o sintéticos. Los materiales naturales utilizados se llaman zeolitas, y son usados para suavizar el agua y eliminar el amonio disuelto. La mayoría de los materiales sintéticos utilizados son resinas o polímeros fenólicos.



**Figura 1. 18.** Resina de intercambio iónico vista en el microscopio<sup>13</sup>

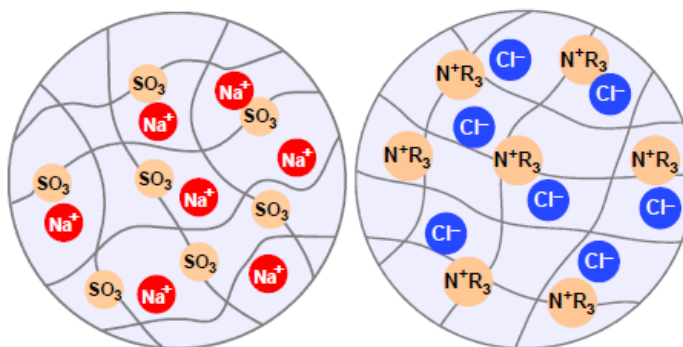
Las resinas de intercambio iónico están compuestas de esferas de plástico muy pequeñas, con un diámetro de aproximadamente 0.6mm. Estas esferas son porosas, y contienen agua invisible dentro de ellas. Dicha cantidad de agua se expresa como “humedad” o “contenido de humedad”.

A nivel microscópico, la estructura de las esferas de resina es un polímero, como todo plástico, al cual se ha fijado un determinado ion de forma permanente. Dicho ion no se puede mover o desplazar, es parte de la estructura. En cambio para preservar la

---

<sup>13</sup> Imagen extraída de <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Ion-Exchange-for-Dummies-RH.pdf>

neutralidad eléctrica de la resina, dicho ion debe ser neutralizado con un ion de carga opuesta. Ese ion de carga opuesta es móvil, y puede ser cedido o absorbido por la resina.



**Figura 1. 19.** Esquema a nivel atómico de resinas catiónica (izq.) y aniónica (der.)<sup>(12)</sup>

En la figura anterior, las líneas representan el esqueleto polimérico de la esfera de resina, es poroso y contiene agua. Los iones fijos de la resina catiónica son  $SO_3^-$ , y los iones móviles son  $Na^+$ . Las resinas catiónicas normalmente se suministran en esta forma.

La resina aniónica tiene un esqueleto similar. El ion fijo es un ion de nitrógeno unido a una molécula de resina, expresado como  $N^+R_3$ , los iones móviles de la resina son iones cloruro. Esta también es la forma más común de resinas aniónicas.

Cuando se sumerge la resina en una solución con iones disueltos, la resina intercambia iones con el agua. Cada ion que es liberado por la esfera, debe ser compensado con la absorción de otro ion de la solución, para mantener la carga neutral. Este proceso es el que se conoce como intercambio iónico. No existe una resina que sea a la vez catiónica y aniónica. En el caso de la deionización de cama mixta, se combinan dos resinas, una catiónica y otra aniónica en un mismo recipiente (12).

Las propiedades importantes de las resinas de intercambio iónico son la capacidad de intercambio, el tamaño de la partícula y la estabilidad. La capacidad de intercambio de una resina se define como la cantidad de un ion intercambiable que puede absorber, se expresa como  $\frac{eq}{L}$  o  $\frac{eq}{kg}$ .

El tamaño de partícula de una resina es importante con respecto a la mecánica de fluidos del tanque o cama de resina, y a la cinética del intercambio de iones. En general, la velocidad de intercambio de iones es proporcional al inverso del área de la

partícula de resina, es decir, mientras más pequeño el diámetro de la partícula de resina, más rápido se produce el intercambio de iones.

La estabilidad de la resina es importante para el funcionamiento a largo plazo del sistema. Cambios estructurales debido a estrés físico, degradación química, y otros pueden limitar la vida útil de la resina.

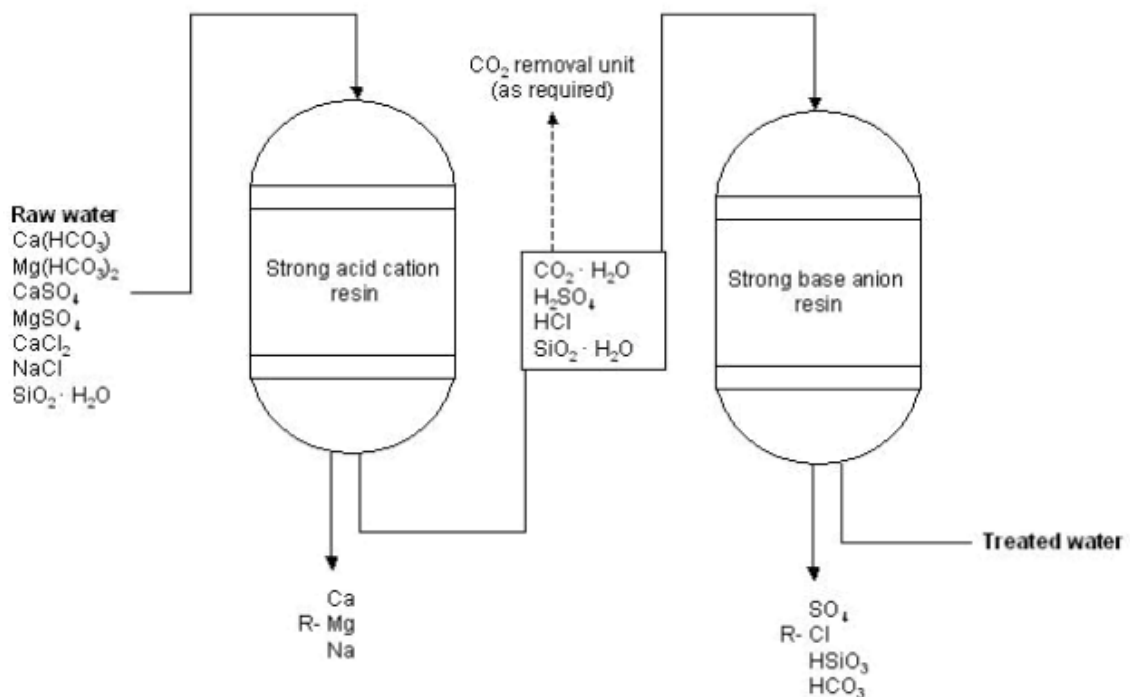


Figura 1. 20. Sistema de resina catiónica ácido fuerte + aniónica básica débil + aniónica básica fuerte<sup>14</sup>

Para la reducción de los sólidos totales disueltos en el agua, se necesita usar resinas aniónicas y catiónicas en conjunto. Este proceso se puede realizar por etapas o en tanques mixtos de resinas.

En los procesos por etapas el agua primero debe pasar por un intercambiador catiónico donde los iones positivamente cargados son reemplazados por iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). El agua resultante pasa entonces por una resina aniónica donde los aniones son reemplazados por iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), que reaccionan con los iones ( $\text{H}^+$ ) y forman agua neutra. La configuración por etapas permite regenerar por separado mediante el uso de agentes regenerativos y restauradores que remueven los

<sup>14</sup> Imagen extraída de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/proceso/desmineralizada/agua-desionizada-desmineralizada.htm>

aniones inorgánicos, efectivamente aumentando la vida útil de la resina, reduciendo costos.

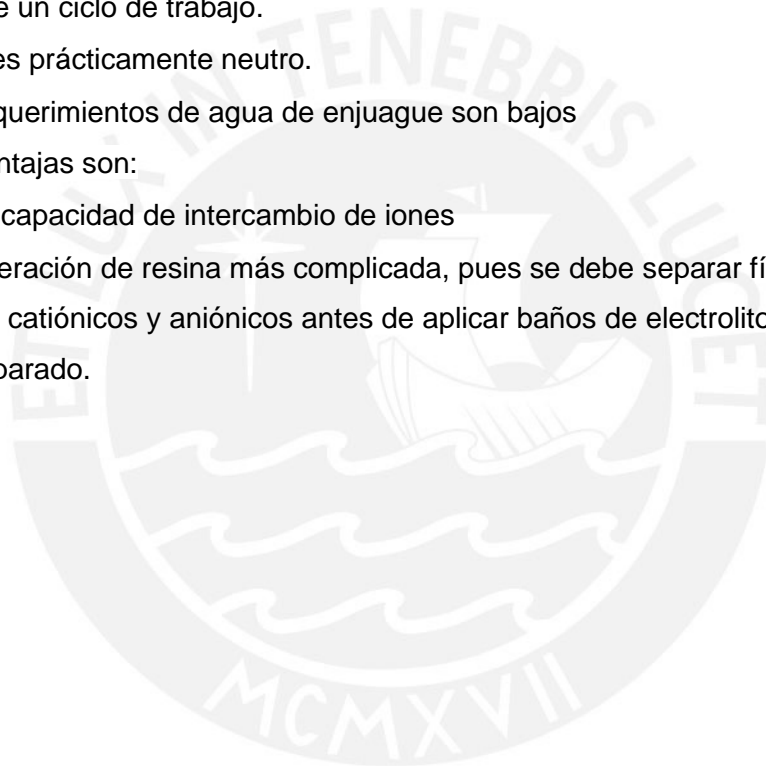
**La configuración de tanque mixto permite alcanzar un nivel de pureza mayor al del proceso por etapas, y se utiliza en aplicaciones de menor caudal de flujo y donde la calidad del agua es especialmente importante (13).**

Las ventajas de la deionización mixta son:

- El agua obtenida es de altísima pureza y su cualidad se mantiene constante durante un ciclo de trabajo.
- El pH es prácticamente neutro.
- Los requerimientos de agua de enjuague son bajos

Las desventajas son:

- Menor capacidad de intercambio de iones
- Regeneración de resina más complicada, pues se debe separar físicamente los granos catiónicos y aniónicos antes de aplicar baños de electrolitos a cada resina por separado.



## CAPÍTULO 2

### CONCEPTO DE SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE INGENIERÍA

En este capítulo se selecciona el concepto de solución óptimo. Para ello, primero estableceremos los requerimientos que necesita cumplir nuestra máquina, los cuales serán plasmados en la lista de requerimientos de diseño. En base a los requerimientos, se realizará la matriz morfológica para obtener los conceptos de solución preliminares. Se elegirá uno de estos conceptos de solución.

#### 2.1. Requerimientos de la máquina

<b>REQUERIMIENTOS DE DISEÑO</b>
<b>Diseño de una máquina de ósmosis inversa para producir agua ultra pura en el laboratorio de manufactura de la PUCP</b>
<p><b>Descripción</b></p> <p>Diseño de una máquina de ósmosis inversa que produzca agua ultra pura para utilizarla como ingrediente del fluido de lubricación y refrigeración de las máquinas de mecanizado del taller de manufactura de la PUCP.</p>
<p><b>Función principal:</b></p> <p>Remover todos los solventes presentes en el agua potable, para obtener un caudal de agua ultra pura de por lo menos 3gph (galones por hora).</p>

<p><b>PUREZA:</b> Es importante obtener la mayor pureza medida en STD (sólidos totales disueltos) los cuales deben ser menores a 100 mg/L, de preferencia 0.</p> <p>El pH de la mezcla de agua y aceite refrigerante debe estar entre 8.3 y 9.3.</p> <p>Hongos: Ninguno</p> <p>Bacterias: Máximo 104/ml, de preferencia 0</p>
<p><b>ENERGÍA:</b> La máquina utilizará energía eléctrica y debe usarla de la manera más eficiente posible pues el objetivo es diseñar una máquina lo más ecológica y económica posible.</p>
<p><b>MATERIA PRIMA:</b> La materia prima será agua potable de la red, la cual debe utilizarse de forma responsable para garantizar que la menor cantidad de este recurso tan importante sea desperdiciado. La eficiencia en el uso del agua potable es crucial para el diseño de la máquina.</p>
<p><b>GEOMETRÍA:</b> La máquina debería ubicarse en el laboratorio de manufactura, cerca de una fuente de agua potable a la cual se pueda conectar mediante una manguera. Las dimensiones máximas serán de largo: 1m, ancho: 1m, alto: 0.5m.</p>
<p><b>FABRICACIÓN:</b> Los componentes podrán ser importados en el caso de que no estén disponibles en el mercado local. Los componentes que tengan que diseñarse, se tendrán que fabricar en talleres locales. Las partes consumibles deberán estar disponibles en el mercado local.</p>
<p><b>USO:</b> Los factores como el nivel de ruido y la contaminación producidos por la máquina no deberán afectar el trabajo del personal del taller de manufactura.</p>

## 2.2. Requerimientos de entrada y salida

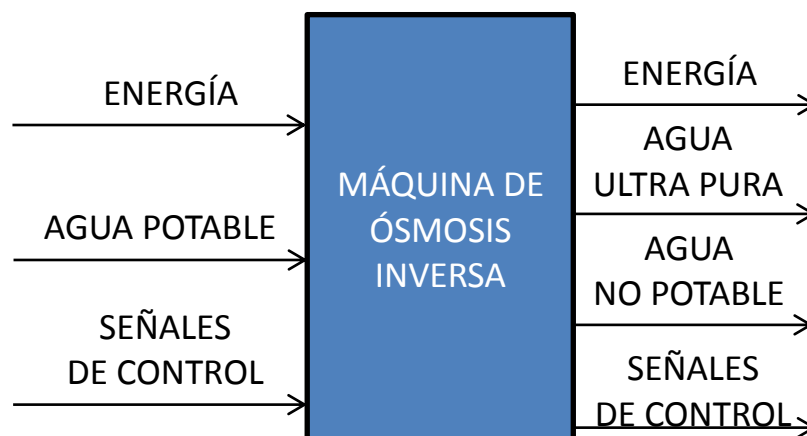


Figura 2. 1. Diagrama de caja negra



### 2.3. Matriz morfológica

La matriz morfológica completa se presenta en el Anexo 8.

### 2.4. Concepto óptimo

Los conceptos de solución se evalúan mediante un formato comparativo en el que se evalúa las ventajas y desventajas en las prioridades de la máquina y los requerimientos.

Los niveles de prioridad son los siguientes:

**Tabla 2. 1.** Prioridades de diseño

Prioridad 1	Normal
Prioridad 2	Importante
Prioridad 3	Muy importante

Además a cada solución se la califica según el siguiente criterio:

**Tabla 2. 2.** Valoración de la característica en el concepto de solución

0=No satisface	1=Aceptable	2=Satisfactorio
3=Muy Satisfactorio	4=Óptimo	

En el siguiente cuadro se registra los cálculos realizados.

En base a los puntajes obtenidos, el concepto de solución óptimo es el Concepto de Solución 3.

Tabla 2. 3. Análisis técnico económico

N°	Criterios técnicos y económicos	Prioridad	Proyectos									
			Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución ideal	Prioridad x Solución 1	Prioridad x Solución 2	Prioridad x Solución 3	Solución ideal		
1	Seguridad	3	2	2	3	4	6	6	6	9	9	12
2	Estabilidad	3	3	2	3	4	9	9	6	6	9	12
3	Geometría	2	0	2	3	4	0	0	4	4	6	8
4	Uso	2	3	2	3	4	6	6	4	4	6	8
5	Ahorro energético	3	2	2	3	4	6	6	6	6	9	12
6	Ecología	3	1	3	3	4	3	3	9	9	9	12
6	Calidad del producto	3	2	3	2	4	6	6	9	9	6	12
6	Capacidad de Producción	1	3	2	1	4	3	3	2	2	1	4
6	Costo tecnología	2	1	1	3	4	2	2	2	2	6	8
6	Facilidad de montaje	2	1	1	3	4	2	2	2	2	6	8
6	Costo de operación	3	1	1	2	4	3	3	3	3	6	12
6	Innovación	2	1	3	0	4	2	2	6	6	0	8
<b>TOTAL</b>			<b>48</b>	<b>59</b>	<b>73</b>	<b>116</b>	<b>48</b>	<b>59</b>	<b>73</b>	<b>116</b>	<b>73</b>	<b>116</b>

0 = No satisface 1 = Aceptable 2 = Satisfactorio  
 3 = Muy Satisfactorio 4 = Óptimo

El concepto de solución óptimo se expone a continuación:

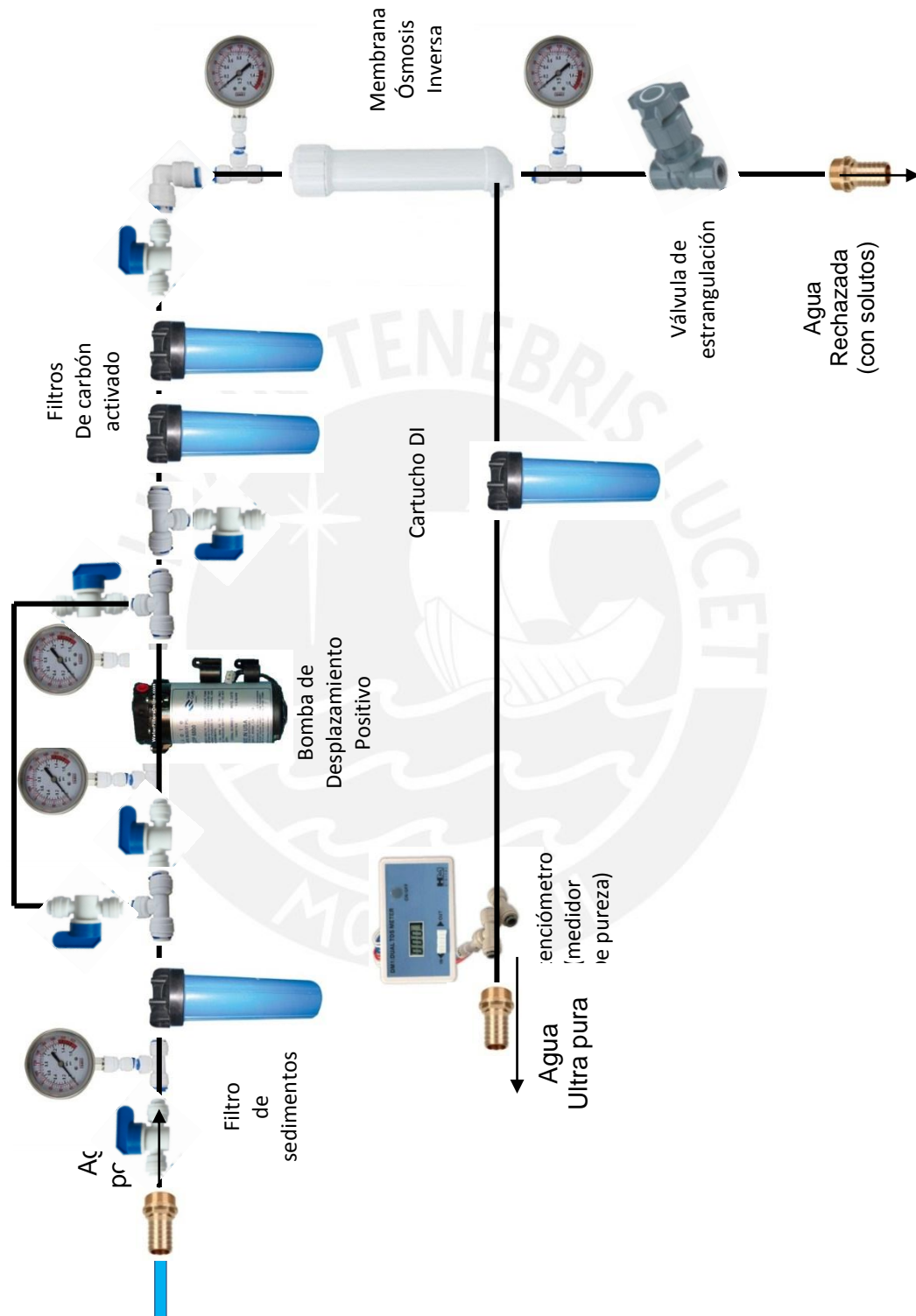
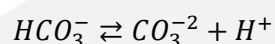
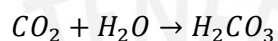


Figura 2. 2. Concepto de solución 3

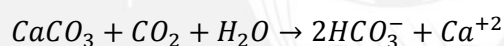
## 2.5. Composición del agua potable

En el agua es posible encontrar gases disueltos como oxígeno  $O_2$ , nitrógeno  $N_2$ , óxidos de nitrógeno  $NO_x$ , pero de todos estos gases el que tiene mayor impacto en las propiedades químicas del agua es el dióxido de carbono  $CO_2$ , el cual se encuentra en el aire en cantidades relativamente abundantes y es altamente soluble en agua, formando ácido carbónico.

El bióxido de carbono o  $CO_2$  presente en la atmósfera se disuelve fácilmente en el agua y produce ácido carbónico, bicarbonatos y carbonatos a través de las siguientes reacciones.



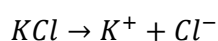
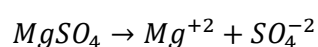
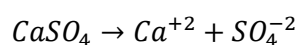
El agua al fluir por superficie terrestre entra en contacto con minerales de caliza (carbonato de calcio) y ocurre la disolución del mineral.



De esta manera el carbonato de calcio, que no es soluble en agua, puede pasar a formar parte de ella por la acción del dióxido de carbono disuelto. Esta reacción del agua con el carbonato de calcio puede efectuarse hasta la saturación, si el agua está el tiempo necesario para llevar a cabo la disolución de la caliza.

El resultado de lo anterior es agua con un alto contenido de carbonato de calcio disuelto, que se presenta en forma de iones calcio  $Ca^{+2}$  y carbonato  $CO_3^-$ .

Pueden llevarse a efecto otras reacciones de disolución del agua con ciertos minerales como por ejemplo el yeso o sulfato de calcio, el sulfato de magnesio, el cloruro de sodio, el cloruro de potasio y otros. Estos se integran al agua por disolución simple ya que son solubles en agua.



También pueden integrarse al agua en pequeñas cantidades algunos metales, como: bario, estroncio, arsénico, mercurio, manganeso, hierro, cobre y algunos otros aniones como: fluoruros, nitritos, nitratos, fosfatos, etc.

La mineralización del agua depende de la zona geológica con la cual se encuentra en contacto. El grado de saturación en compuestos solubles depende de la naturaleza de la zona donde se encuentra el agua así como del tiempo que dura en contacto el agua con los minerales en su estado natural.

El total de los compuestos que se integran al agua a través del mencionado proceso de disolución se le llama contenido de sólidos disueltos y se mide cualitativamente por medio de la conductividad, ya que estas partículas en solución están cargadas positivamente o negativamente, y por lo tanto son capaces de conducir la corriente eléctrica. Cuanto mayor es la cantidad de partículas disueltas mayor es la conductividad de una solución, en este caso del agua.

Durante el tratamiento de las fuentes de agua naturales para el consumo humano, se logra remover la mayor parte de los sólidos disueltos y agentes patógenos, sin embargo siempre quedan residuos de su paso por la tierra. Los niveles máximos permisibles de los parámetros químicos orgánicos e inorgánicos y parámetros microbiológicos son fijados por el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano, del Ministerio de Salud.

**Tabla 2. 4.** Cationes y aniones más comunes en el agua potable, en orden de abundancia

<i>CATIONES</i>	<i>ANIONES</i>
Calcio $\text{Ca}^{+2}$	Bicarbonato $\text{HCO}_3^-$
Magnesio $\text{Mg}^{+2}$	Cloruro $\text{Cl}^-$
Sodio $\text{Na}^+$	Sulfato $\text{SO}_4^{-2}$
Potasio $\text{K}^+$	Nitrato $\text{NO}_3^-$

### **Dureza**

La dureza se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas ambas en miligramos por litro de carbonato cálcico (mg/L). Para calcular la dureza a partir de las concentraciones de calcio y magnesio, debemos convertir

primero estas concentraciones a mili equivalentes por litro (meq/L). Esta conversión en términos de concentración permite considerar juntos al calcio y al magnesio.

## 2.6. Presión osmótica

La presión osmótica de un soluto se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$\text{Presión osmótica de un soluto en agua} = \pi = \phi i M R T \quad (2.1)$$

Dónde:

$\pi$  = presión osmótica, Pa

$\phi$  = coeficiente osmótico, adimensional

$i$  = factor de van't Hoff, adimensional

$M$  = Molaridad de la solución, mol/L

$T$  = Temperatura, en Kelvin

La presión osmótica es una propiedad coligativa de las disoluciones. Por tanto, el método para calcularla varía si el soluto es un electrolito o no. Cuando se disuelve una unidad de un compuesto de un electrólito se separa en dos o más partículas, por ejemplo, al agregar 1 mol de NaCl al agua, se producen 2 moles de iones en la solución,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , duplicando la presión osmótica a comparación de un soluto que no se disocia, para explicar este efecto, se utiliza el factor de van't Hoff, que está dado por:

$$i = \frac{\text{número real de partículas en la disolución después de la disociación}}{\text{número de unidades fórmula disueltas inicialmente en la disolución}} \quad (2.2.1)$$

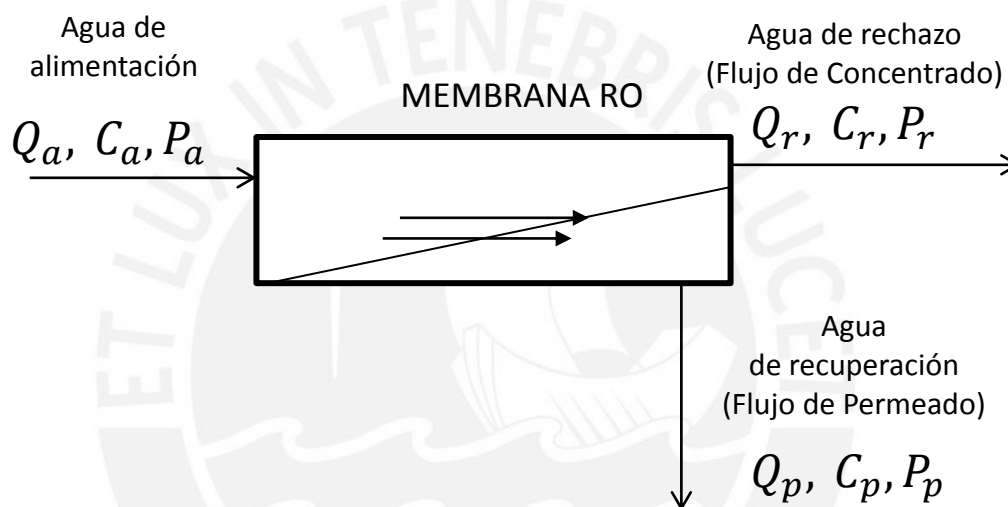
La ecuación para la presión osmótica no contiene términos identificando el soluto. La presión osmótica es estrictamente una función de la concentración y fracción molar del soluto. Los solutos reducen la fracción molar del agua y el efecto de distintos solutos es aditivo porque cada uno reduce la fracción molar de agua para un determinado volumen.

Por tanto la presión osmótica de una solución es la suma de las presiones osmóticas de los solutos (10):

$$\text{Presión osmótica de una solución de agua} = \sum_i^n \pi_i = \sum_i^n \phi_i MRT \quad (2.2.2)$$

## 2.7. Balance de flujo y masa en la membrana de ósmosis inversa

A continuación aplicaremos un balance de flujo y masa al volumen de control de la membrana de ósmosis inversa. En el siguiente esquema se grafican los flujos que ingresan y salen de la membrana:



**Figura 2. 3.** Esquema del volumen de control de la membrana de ósmosis inversa

Donde:

$Q_i$  = Flujo de agua

$C_i$  = concentración de solutos en el fluido

$P_i$  = Presión del fluido

La recuperación de permeado ( $r$ ), también expresada como porcentaje, se define como la relación entre el agua de permeado producida y el caudal de agua alimentado a la membrana:

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (2.3)$$

Donde

$Q_p$  = Caudal de permeado

$Q_a$  = Caudal de alimentación

La recuperación depende tanto de las características propias de cada membrana como de la presión de alimentación de la membrana, la presión osmótica del fluido, etc.

El rechazo se define como la diferencia en concentraciones de la alimentación y el permeado, dividido por la concentración de solutos en la alimentación.

$$Rej = \frac{C_a - C_p}{C_a} \quad (2.4)$$

El valor del rechazo depende de las características propias de cada membrana semipermeable, de la presión y la magnitud del flujo de agua de alimentación, la concentración de solutos, etc.

Consideramos que no hay fugas de fluido a través de la membrana, por tanto en el balance de flujo consideramos que la suma de los caudales que salen de la membrana (rechazo y permeado) es igual al caudal de alimentación que ingresa.

$$Q_a = Q_p + Q_r \quad (2.5)$$

Paso siguiente, consideramos que el flujo másico de solutos que entra y salen de la membrana, también son iguales.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad (2.6)$$

Si definimos el flujo másico de soluto como el flujo de agua por la concentración de soluto en el fluido

$$\dot{m} = QC \quad (2.7)$$

Deducimos la siguiente fórmula reemplazando la ecuación 2.7 en la ecuación 2.6:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_r C_r \quad (2.8)$$

De las ecuaciones anteriores se puede obtener que la siguiente ecuación para la concentración del agua del rechazo

$$C_r = C_a \times \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right] \quad (2.9)$$

## 2.8. Presión neta en la membrana ( $P_{NET}$ )

La presión es el mecanismo activador por el cual la ósmosis inversa funciona, es la fuerza primaria por la cual el agua fluye a través de la membrana.



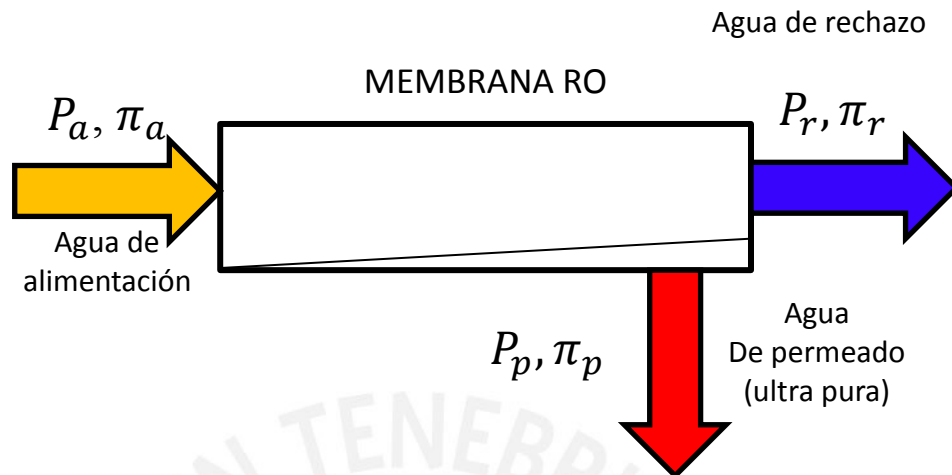


Figura 2. 4. Presiones osmóticas en la membrana

$P_a$  = Presión del fluido al ingreso de la membrana (alimentación)

$P_r$  = Presión del fluido de rechazo

$P_p$  = Presión del flujo de permeado (agua ultra pura)

$\pi_a$  = Presión osmótica del fluido al ingreso de la membrana

$\pi_p$  = Presión osmótica del permeado (agua ultra pura)

$\pi_r$  = Presión osmótica del fluido de rechazo

La presión neta en la membrana es la diferencia entre el gradiente de presión de la membrana y la diferencia entre las presiones osmóticas de alimentación y permeado.

$$\Delta P_{NET} = \Delta P - \Delta \pi \quad (2.10)$$

Los gradientes según la bibliografía se definen como

El gradiente de presión en la membrana:

$$\Delta P = \left( \frac{P_a + P_c}{2} \right) - P_p \quad (2.11)$$

El gradiente de presión osmótica:

$$\Delta \pi = \pi_{promedio\ a-r} - \pi_p = \left( \frac{\pi_a + \pi_r}{2} \right) - \pi_p \quad (2.12)$$

## 2.9. Relación de flujo de agua a través de la membrana

El flujo de agua a través de la membrana se define como

$$Q_p = JA \quad (2.13)$$

Donde

$J$  = flujo de permeado por unidad de área superficial

$A$  = Área superficial de la membrana

El flujo por unidad de área superficial es una función de la presión neta en la membrana y el coeficiente de transferencia de masa del solvente.

$$J = k_w \Delta P_{NET} = k_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.14)$$

Donde,

$k_w$  = Coeficiente de transferencia de masa del solvente

De esta ecuación, se puede concluir entonces, que el flujo de agua a través de la membrana y por tanto la recuperación depende de la presión neta en la membrana y el área superficial total de la membrana semipermeable.

Combinando la ecuación 2.13 y la ecuación 2.14 podemos entonces obtener una expresión para calcular el flujo de agua ultra pura producida por la membrana.

$$Q_p = JA = Ak_w \Delta P_{NET} = Ak_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.15)$$

En la siguiente gráfica, se puede apreciar cómo la concentración de solutos en la alimentación afecta la producción de agua de permeado, a mayor concentración de solutos, mayor gradiente de presión osmótica y por tanto, menor presión neta en la membrana, en consecuencia, menor producción de agua de permeado.

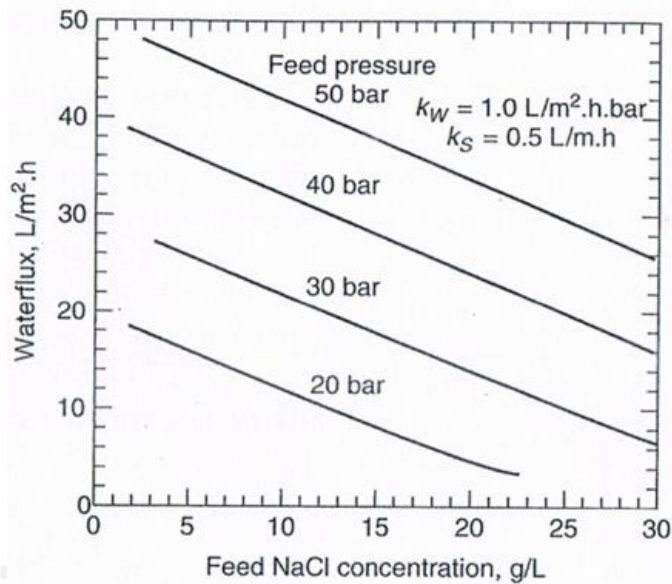


Figura 2. 5. Efecto de la concentración de solutos del agua de alimentación en el flujo de permeado producido, para varias presiones (7)

### 2.10. Relación de flujo de soluto ( $F_s$ )

Un poco de soluto pasa a través de la membrana durante el proceso de ósmosis inversa. La fuerza impulsora de dicho proceso es el gradiente de concentración de soluto. La relación de flujo de soluto puede ser expresado mediante la siguiente fórmula:

$$F_s = k_s \Delta C_s = \frac{\dot{m}_p}{A} \quad (2.16)$$

Donde,

$k_s$  = Coeficiente de transferencia de masa del soluto

$\Delta C_s$  = Gradiente de concentración de soluto

$A$  = Área superficial de la membrana

El gradiente de concentración del soluto se calcula de la siguiente manera:

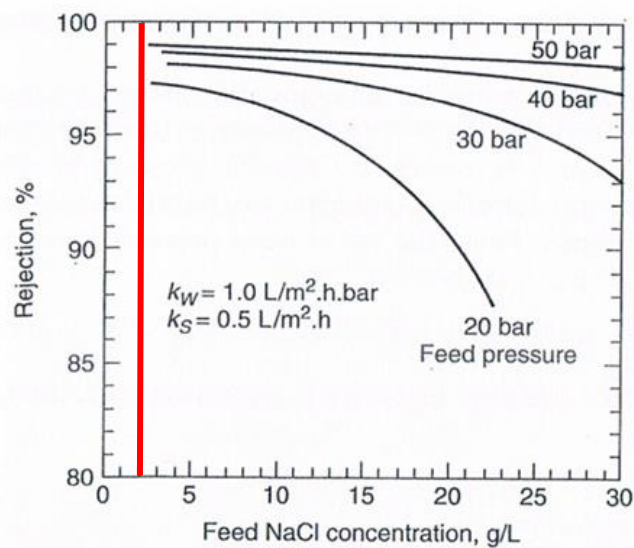
$$\Delta C_s = \left( \frac{C_a + C_r}{2} \right) - C_p \quad (2.17)$$

Se ordena la ecuación 2.16 para expresarla como el flujo de soluto a través de la membrana:

$$\dot{m}_p = Q_p C_p = A k_s \Delta C_s \quad (2.18)$$

Al igual que con la ecuación 2.15, los valores del área ( $A$ ) y el coeficiente de transferencias de masa de soluto ( $k_s$ ) se pueden suponer constantes para una misma membrana.

En el siguiente gráfico se pueden apreciar los valores de rechazo en función de distintas concentraciones de soluto para una membrana genérica.



**Figura 2. 6.** Rechazo en función de la concentración de soluto en la alimentación, para varias presiones de alimentación (7)

Como se puede ver, si se trabaja con agua potable de la red, con concentraciones de solutos totales en la alimentación menores a 1 g/l, el rechazo de sales de una membrana se puede suponer constante para distintas presiones y estará alrededor del 98% con un 1% de desviación máximo.

## 2.11. Selección de bombas de agua

### 2.11.1. Ecuación de Bernoulli

Un fluido ideal es un fluido incompresible y de nula viscosidad. En un flujo ideal no existe rozamiento y por tanto, no existe transformación de la energía cinética del flujo en energía térmica. En el caso del flujo ideal en un tubo, la energía mecánica del flujo entre dos puntos se conserva.

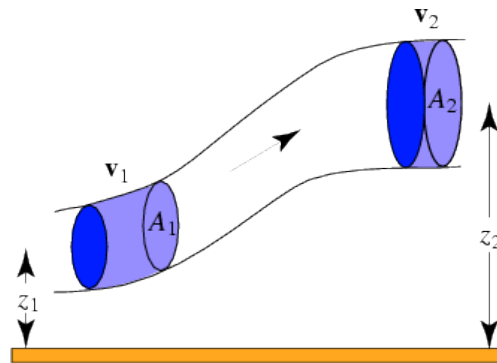


Figura 2. 7. Flujo en un tubo<sup>15</sup>

La ecuación de Bernoulli para el flujo ideal mostrado en la figura 2.7 se escribe así:

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \rho g z_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (2.19)$$

### 2.11.2. Flujo ideal y real en una instalación

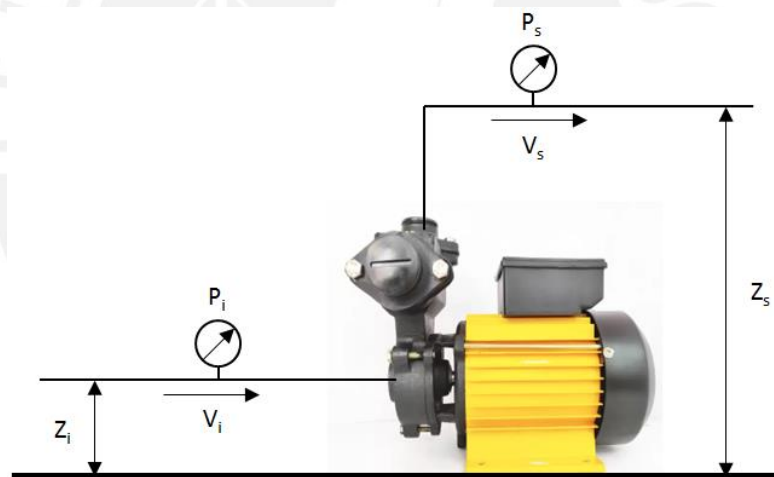


Figura 2. 8. Ejemplo de planta de bombeo de agua

Para asegurar que la bomba seleccionada sea la adecuada, la presión requerida para un flujo de diseño debe ser calculada. Si aplicamos la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales al sistema representado en la figura 2.8 y añadimos la energía mecánica entregada por la bomba al fluido, la ecuación resultante es:

$$P_i + \rho g z_i + \frac{\rho V_i^2}{2} + P_{bomba} = P_s + \rho g z_s + \frac{\rho V_s^2}{2} \quad (2.20)$$

<sup>15</sup> Imagen extraída de <http://scienceworld.wolfram.com/physics/BernoullisLaw.html>

Se trata de una ecuación de conservación de la energía para un fluido no viscoso e incompresible donde la energía mecánica se transforma de una clase a otra, pero se mantiene constante.

Reordenamos la ecuación 2.21 para obtener una expresión que nos permita definir la presión que la bomba debe suministrar al sistema, para lograr las condiciones de operación necesarias.

$$P_{bomba} = (P_s - P_i) + \rho g(Z_s - Z_i) + \rho \frac{(V_s^2 - V_i^2)}{2} \quad (2.21)$$

En el flujo real se producen pérdidas en la instalación por fricción del fluido con la superficie de las tuberías y accesorios. En ese caso, se sigue la formulación de flujo ideal, añadiendo un término de pérdidas. Aunque no aparece en la ecuación, cabe mencionar que las pérdidas producirán un incremento de la energía interna del fluido. Este calentamiento del fluido es despreciable y no se suele tener en consideración.

$$P_{bomba} = (P_s - P_i) + \rho g(Z_s - Z_i) + \rho \frac{(V_s^2 - V_i^2)}{2} + \Delta P_{pérdidas} \quad (2.22)$$

Donde  $\Delta P_{pérdidas}$  son las pérdidas de presión en la instalación

$$\Delta P_{pérdidas} = \Delta P_{tuberías} + \Delta P_{accesorios} \quad (2.23)$$

### 2.11.3. Cálculo de pérdidas de presión en tuberías

Las pérdidas de presión o altura en las tuberías rectas (pérdidas primarias) se suelen calcular como altura de columna de agua:

$$\Delta P_{tuberías} = \lambda \cdot \frac{L\rho}{2D_i} V^2 = \lambda \cdot \frac{L\rho}{2D_i} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 = \lambda \cdot \frac{L\rho}{2A^2 D_i} Q^2 \quad (2.24)$$

Donde:

$\Delta P_{tuberías}$  = Pérdida de presión en el tramo de tubería en metros, en Pa

$\lambda$  = Coeficiente de fricción de la tubería

L = longitud del tramo de tubería

$D_i$  = diámetro interior de la tubería

$\rho$  = densidad

$g$  = aceleración debida a la gravedad

$V$  = velocidad promedio del fluido

$Q$  = Caudal

El coeficiente adimensional  $\lambda$  es una función del número de Reynolds.

El número de Reynolds se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (2.25)$$

Donde:

$V$  = velocidad promedio del fluido

$D_h$  = Diámetro hidráulico del fluido

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido

El diámetro hidráulico para tuberías de sección transversal circular se puede considerar igual al diámetro interior de la tubería.

De acuerdo al número de Reynolds calculado para un flujo y diámetro de tuberías dado, se clasifica este flujo en laminar o turbulento. Según la bibliografía, en el caso del flujo laminar ( $Re < 2320$ ), el coeficiente  $\lambda$  se considera independiente de la rugosidad de la tubería, debido a la capa de flujo laminar. El caso flujo turbulento ( $2320 < Re < 10^5$ ), debemos también analizar si la tubería en las condiciones de funcionamiento son hidráulicamente suaves, rugosas o están en el rango intermedio.

La rugosidad hidráulica se calcula a partir de la rugosidad absoluta del material de la tubería, el número de Reynolds y el diámetro mediante la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de rugosidad de la tubería} = Re \frac{\varepsilon}{D_i} \quad (2.26)$$

Tabla 2. 5. Rugosidad absoluta de diversos materiales (14)

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	$\epsilon$ (mm)	Material	$\epsilon$ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

En la siguiente tabla se resumen las fórmulas para el cálculo del coeficiente de fricción de las tuberías para varias condiciones de flujo.

Tabla 2. 6. Fórmulas para calcular el coeficiente de fricción en tuberías (14)

Flujo laminar $Re < 2320$	Flujo turbulento		
	$2320 < Re < 10^5$		
	Tuberías hidráulicamente lisas	Tuberías hidráulicamente rugosas	Tuberías en el rango de transición
	$Re \frac{\epsilon}{D_i} < 65$	$Re \frac{\epsilon}{D_i} > 130$	$65 < Re \frac{\epsilon}{D_i} < 130$
Fórmula para $\lambda$ $\lambda = \frac{64}{Re}$ $\lambda = \frac{64\nu}{VD_i}$	a) Fórmula de Blasius para el rango de $2320 < Re < 10^5$ $\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$ b) Fórmula de Nikuradse para el rango de $10^5 < Re < 5 \times 10^5$ $\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237}$ c) Fórmula Prandtl y von Kármán para el rango $Re > 10^5$ $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8$	Fórmula de Nikuradse para $\lambda$ $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log\left(\frac{D_i}{\epsilon}\right) + 1.14$	Fórmula de Prandtl-Colebrook: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\epsilon}{D_i} 0.269 \right]$

#### 2.11.4. Pérdidas en accesorios

Las pérdidas de presión en los accesorios suelen determinarse proporcionalmente a la energía cinética del flujo.



$$\Delta P_{acc} = k_{acc} \frac{\rho V^2}{2} = k_{acc} \frac{\rho Q^2}{2A^2} = k_{acc} \frac{\rho}{2A^2} Q^2 \quad (2.27)$$

En la bibliografía se pueden encontrar ecuaciones, tablas o curvas para determinar el coeficiente  $k_{acc}$  para codos, “Tés”, reducciones, etc. En algunas ocasiones, las pérdidas por accesorios se expresan como una longitud equivalente de pérdidas en tubos. La ecuación de pérdidas en accesorios resultará:

$$H_{acc} = \lambda \frac{\rho L_{eq}}{2DA^2} Q^2 \quad (2.28)$$

Donde la longitud equivalente de pérdidas en accesorios se determinará a partir de datos experimentales en forma de tablas, curvas o ábacos disponibles en la bibliografía.

**Tabla 2. 7.** Coeficiente de pérdidas  $k_{acc}$  para distintos accesorios

<b>VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES</b>		
<b>Condición</b>	<b>K</b>	<b>L/D</b>
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

## 2.12. Capacidad de intercambio iónico

### 2.12.1. Concentración mili equivalente

La capacidad de intercambio de las resinas frecuentemente es expresada en términos de gramos de carbonato cálcico por metro cúbico de resina ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) o gramos equivalentes por metro cúbico ( $\text{g-eq}/\text{m}^3$ ).

La concentración en mili equivalentes por litro (meq/L), es otra forma de expresar la concentración que se usa cuando los electrolitos están disueltos y disociados.

Primero, debemos calcular el peso molecular equivalente según la siguiente expresión.

$$\text{peso molecular eq} = \frac{\text{peso molecular}}{\text{valencia}} \quad (2.29)$$

Por ejemplo en el caso de del calcio:

$$\text{peso molecular}_{Ca^{2+} \text{ eq}} = \frac{40.08 \frac{g}{mol}}{2 \frac{eq}{mol}} \quad (2.30)$$

El valor se puede expresar como gramos por equivalente o mili gramos por mili equivalente.

$$\text{peso molecular}_{Ca^{2+} \text{ eq}} = 20.04 \frac{g}{eq} = 20.04 \frac{mg}{meq} \quad (2.31)$$

Finalmente, utilizamos este valor para convertir la concentración de mg/L a meq/L mediante la siguiente ecuación:

$$C_{eq} = \frac{C}{\text{peso molecular eq}} \quad (2.32)$$

Por ejemplo, en el caso de una concentración de 100mg/L de Ca<sup>2+</sup>:

$$C_{eq} = \frac{100 \frac{mg}{L}}{20.04 \frac{mg}{meq}} = 4.99 \frac{meq}{L} \quad (2.33)$$

### 2.12.2. Capacidad de intercambio de las resinas de intercambio iónico

La capacidad de intercambio de las resinas es la capacidad total que tienen por unidad de peso o volumen, para intercambiar iones en términos de grupos funcionales intercambiables, se expresa en equivalentes por litro o kilogramo de resina (eq/L<sub>resina</sub> o eq/kg<sub>resina</sub>).

Las resinas sintéticas comerciales tienen una capacidad de intercambio en el rango de 2 a 10  $\frac{eq}{kg \text{ de resina}}$ .

Físicamente, esto quiere decir que cada resina tiene una capacidad de intercambio iónico limitada, y nos permite calcular la cantidad de iones equivalentes tratados, antes

que la resina pierda sus propiedades por saturación de iones y sea necesario un cambio o la regeneración.

La capacidad de intercambio difiere para distintos polímeros y también varía si la resina es catiónica o aniónica y por tanto se debe analizar los cationes y aniones del agua a tratar por separado. Normalmente la capacidad nominal viene dada por el fabricante, y en la práctica se considera un 10% a 40% adicional dependiendo de las condiciones de trabajo.

### 2.12.3. Proceso químico de desmineralización

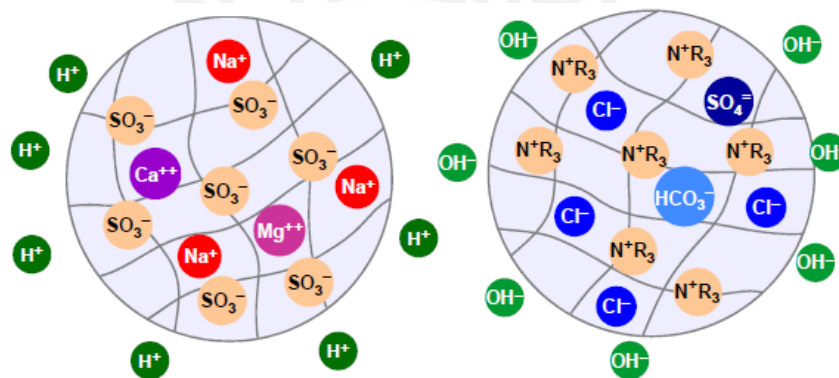
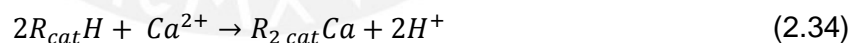


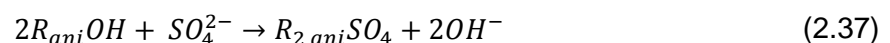
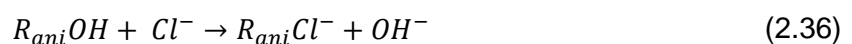
Figura 2. 9. Esquema del proceso químico de desmineralización

Para lograr la desmineralización completa se necesita usar una resina catiónica que tenga al ion móvil  $\text{H}^+$  y una resina aniónica que tenga como ion móvil al ion  $\text{OH}^-$ .



Donde  $R_{cat}$  representa la resina catiónica.

Del mismo modo, en la resina aniónica:



## CAPÍTULO 3 DISEÑO MECÁNICO

### 3.1. Medición de la presión y caudal de la red



Primero se procedió a medir la presión y caudal que puede entregar la red.

#### 3.1.1. Presión de la red

En esta medición se conectó un manómetro a la salida de una cañería en un momento en el que no había agua siendo usada en el laboratorio, para medir la presión del fluido en las tuberías.

La presión manométrica medida fue de 18 psi (1.24 bar, 124.1 kPa).

Necesitamos entonces la presión absoluta de agua al ingreso de la máquina,

$$P_{abs\ ingreso} = P_{man} + P_{atm} \quad (3.1)$$

$$P_i = 18 + 14.7\ psi = 32.7\ psi = 225.46\ kPa \quad (3.2)$$

### 3.1.2. Caudal máximo proporcionado por la red

El caudal se calculó midiendo el tiempo que demora en llenarse un balde de 5 galones con el agua que sale del grifo. El tiempo medido fue de 1 minuto 34 segundos (1.57 min)

$$Q_{red} = \frac{Volumen}{\Delta t} = \frac{5 \text{ gal}}{1.57 \text{ min}} = 3.19 \text{ GPM} = 76.56 \text{ GPH} \quad (3.3)$$

### 3.2. Consideraciones previas

Considerando una temperatura de funcionamiento igual a 20° C, obtenemos las propiedades del agua según la tabla 3.1:

**Tabla 3. 1.** Propiedades del agua a distintas temperaturas

	Densidad	Viscosidad absoluta	Viscosidad cinemática
Temperatura	$\rho$	$10^3 \mu$	$10^6 \nu$
°C	kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	m <sup>2</sup> /s
0	999.9	1.792	1.792
5	1000.0	1.519	1.519
10	999.7	1.308	1.308
20	998.2	1.005	1.007
40	992.2	0.656	0.661
60	983.2	0.469	0.477
80	971.8	0.357	0.367
100	958.4	0.284	0.296

- Presión de la red: 32.7 psi
- Densidad del agua = 998.2 kg/m<sup>3</sup> (a 20°C)
- Viscosidad cinemática = 1.007x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s
- Viscosidad dinámica = 1,102 · 10<sup>-3</sup> N·s/m<sup>2</sup> (Temperatura = 20° C)
- Diámetro interno de las tuberías: 3/16" = 4.76 mm = 4,76x10<sup>-3</sup> m
- Área de sección transversal de las tuberías = 1,78 x10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>
- Tuberías de PVC, por tanto la rugosidad absoluta aproximada  $\epsilon = 0.002$  mm

### 3.3. Selección de la membrana OI según el caudal requerido

Para este proyecto se necesita una membrana que nos permita producir 3 galones por hora de agua ultra pura. Las membranas elegidas por ser las más económicas, accesibles y comunes en el mercado local son las membranas Filmtec. La membrana elegida de acuerdo al caudal requerido es la membrana Filmtec TW30-1812-75.

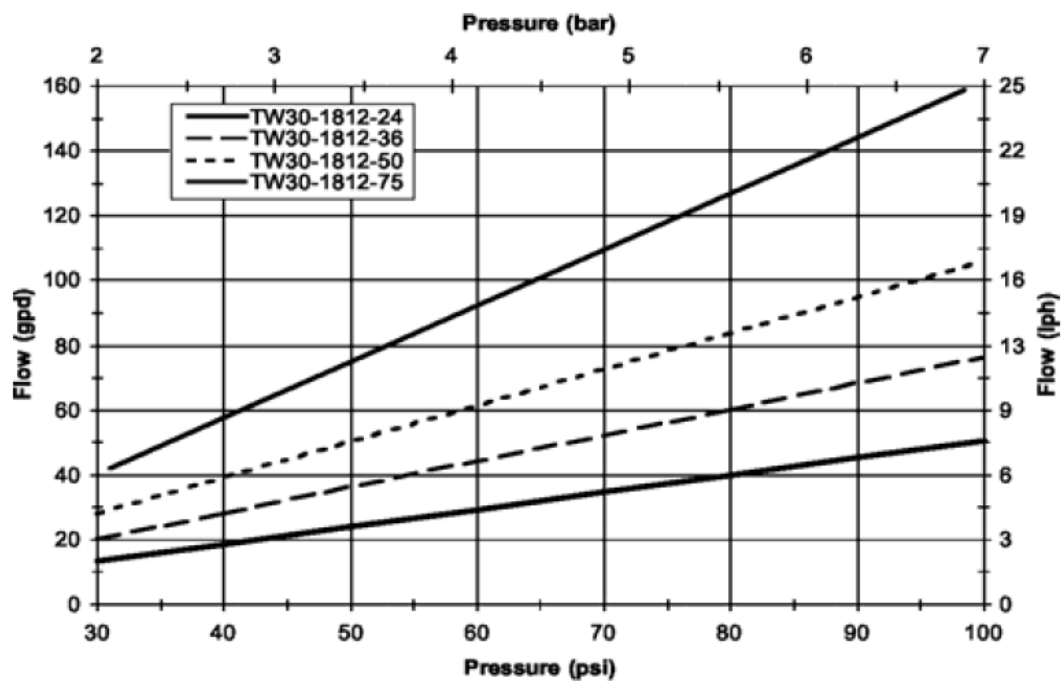


Figura 3. 1. Flujo de permeado vs Presión neta en la membrana<sup>16</sup>

En la siguiente tabla se resumen numéricamente los valores de la gráfica anterior, en distintas unidades:

<sup>16</sup> Ver Hoja Técnica en el Anexo 1

**Tabla 3. 2.** Flujo de permeado en función de la presión según el fabricante

Presión NETA	Presión NETA	Caudal permeado $Q_p$	Caudal permeado $Q_p$	Caudal permeado $Q_p$
psi	Pa	GPD	GPH	m <sup>3</sup> /s
0	0.00E+00	0	0	0.00E+00
10	6.89E+04	15	1	7.89E-07
20	1.38E+05	30	1	1.58E-06
30	2.07E+05	45	2	2.37E-06
40	2.76E+05	60	3	3.16E-06
50	3.45E+05	75	3	3.95E-06
60	4.14E+05	90	4	4.73E-06
70	4.83E+05	105	4	5.52E-06
80	5.52E+05	120	5	6.31E-06
90	6.21E+05	135	6	7.10E-06
100	6.89E+05	150	6	7.89E-06

Reordenamos la ecuación 2.10:

$$Q_p = JA = k_w(\Delta Pa - \Delta\pi)A = Ak_w \cdot \Delta P_{NET} \quad (3.3)$$

Al usar nosotros la misma membrana, el valor del área superficial se mantiene constante. Del mismo modo, el coeficiente de transferencia de masa del solvente  $k_w$  se puede considerar no variará para nuestras condiciones de operación, pues usaremos la misma membrana, con condiciones de agua de alimentación similares (agua potable suavizada). Por tanto podemos expresar el flujo de permeado como:

$$Q_p = Ak_w \cdot \Delta P_{NET} = Z \cdot \Delta P_{NET} \quad (3.4)$$

$$Q_p = 1.14 \times 10^{-11} \Delta P_{NET} \quad (3.5)$$

Donde  $Q_p$  está en m<sup>3</sup>/s y  $P_{NETA}$  en pascales.

Lo que podemos concluir, es que la presión neta en la membrana debe ser entonces, de por lo menos 50 psi o 344.74 kPa, para generar los 3GPH mínimos de permeado que fueron definidos previamente.

$$\Delta P_{NET} > 3.45 \times 10^5 Pa \quad (3.6)$$

### 3.4. Presión neta en la membrana de ósmosis inversa

La membrana requiere mínimo 50 psi de presión neta y la red nos entrega apenas 34.7 psi de presión absoluta.

Además, es ideal tener una presión mayor para aumentar la recuperación de la membrana, lo cual aumenta el porcentaje del agua de la red que se convierte en agua ultra pura, reduciendo el desperdicio de agua potable. Esto lo lograremos utilizando una bomba de agua que aumente la presión del fluido.

En el siguiente esquema se pueden apreciar las variables involucradas en calcular la presión neta de la membrana.

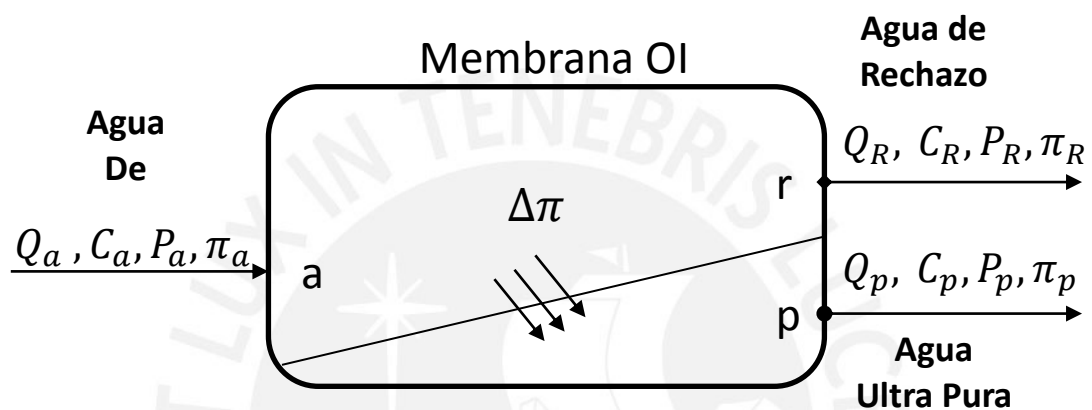


Figura 3. 2. Esquema de las variables involucradas en el análisis

Según la fórmula 2.10 tenemos entonces:

$$\Delta P_{NET} = \Delta P - \Delta\pi$$

Procederemos a calcular ambos gradientes de presión.

### 3.4.1. Gradiente de presión en la membrana

Para comenzar calcularemos el gradiente de presión en la membrana asumiendo que debido a la corta longitud de la membrana, la presión a la entrada del agua y a la salida del flujo de rechazo es aproximadamente la misma.

Por tanto

$$P_a = P_r \quad (3.7)$$

Reemplazamos en la ecuación 2.11:

$$\Delta P = \left( \frac{P_a + P_r}{2} \right) - P_p = P_a - P_p \quad (3.8)$$

La fórmula de la presión neta en la membrana quedaría entonces como:

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \Delta\pi \quad (3.9)$$



La presión neta se puede entender entonces como la presión de alimentación de la membrana menos la contrapresión del flujo de permeado y menos el gradiente de presión osmótica en la membrana.

### 3.4.2. Gradiente de presión osmótica en la membrana ( $\Delta\pi$ )

A continuación, calcularemos el gradiente de presión osmótica en la membrana. Para ello, utilizaremos la fórmula 2.12.

$$\Delta\pi = \left( \frac{\pi_a - \pi_r}{2} \right) - \pi_p$$

La presión osmótica de una solución se calcula según la ecuación 2.1.

$$\text{Presión osmótica de una solución} = \sum_i^n \pi_i = \sum_i^n \phi_i M_i RT$$

### Gradiente de presión osmótica de alimentación

La presión osmótica promedio en la membrana se puede calcular a partir de la concentración de solutos promedio en la membrana, utilizaremos entonces la fórmula 2.2:

$$\text{Presión osmótica de una solución de agua} = \sum \phi_i M_a RT$$

Para efectuar el análisis de la presión osmótica, asumiremos un escenario donde el agua suministrada por la red llegue con los valores máximos permisibles de sólidos disueltos según el Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano del Ministerio de Salud, esto para ponernos en el escenario más exigente posible para la máquina y tener un factor de seguridad respecto de las condiciones de operación normal. Solamente se han considerado los componentes más significativos y cuya concentración máxima permitida contribuya de forma significativa a elevar la presión osmótica del agua potable.

La presión osmótica de alimentación calculada es de 71 205.571 kPa.

En la tabla siguiente se exponen los solutos considerados así como las concentraciones máximas permitidas en el agua potable en el Perú.

**Tabla 3. 3.** Cálculo de la presión osmótica del flujo de alimentación de la membrana

Cálculo de la presión osmótica en la alimentación									
Compuesto	Fórmula	Coefficiente osmótico	Concentración volumétrica MÁXIMA*	Peso molecular	Concentración molar MÁXIMA	Número de iones	Constante de Boltzmann	Temperatura	Presión osmótica alimentación
Símbolo		$\phi$	$C_a$	w	$M_a = C_a / (w \cdot 1000)$	i	R	T	$\pi_a = \phi i M_a RT$
Unidades			mg/L	g/mol	mol/L	(mol ion/mol compuesto)	L kPa/mol K	K	kPa
<b>Dureza total**</b>	CaCO3	0.95	500	100.869	0.00496	2	8.3145	293	24.151
<b>Sodio</b>	Na+	0.95	200	22.9898	0.00870	1	8.3145	293	21.193
<b>Cloruros</b>	Cl-	0.95	250	35.5	0.00704	1	8.3145	293	17.156
<b>Sulfato</b>	SO4-	0.95	250	96.1	0.00260	1	8.3145	293	6.338
<b>Nitratos</b>	NO3-	0.95	50	62.005	0.00081	1	8.3145	293	1.964
<b>Amoniaco</b>	NH3	0.95	1.5	17.031	0.00009	1	8.3145	293	0.215
<b>Zinc</b>	Z	0.95	3	65.38	0.00005	1	8.3145	293	0.112
<b>Cobre</b>	Cu	0.95	2	63.546	0.00003	1	8.3145	293	0.077

Presión osmótica total (kPa) 71.206  
 Presión osmótica total (Pa) 71.205.571

\*Fuente: Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA / (39-40)

\*\* La dureza total es la concentración total de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , normalmente se expresa como una concentración equivalente de CaCO3

### 3.4.3. Presión osmótica del permeado

La presión osmótica del permeado se puede calcular considerando el rechazo de la membrana 98% según lo que indica el fabricante.

$$\text{Rechazo} = \text{Rej} = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 0.98 \quad (3.10)$$

$$C_p = (1 - \text{Rej})C_a = 0.02C_a \quad (3.11)$$

**Tabla 3. 4.** Cálculo de la concentración de solutos en el flujo de permeado

<b>Concentración de solutos en el permeado</b>				
Compuesto	Fórmula	Concentración en la alimentación	Rechazo	Concentración aproximada en el permeado
		$C_a$	$\text{Rej} = 1 - C_p/C_a$	$C_p = (1 - \text{Rej})C_a$
<b>Unidades</b>		mg/L		mg/L
Dureza del agua*	CaCO <sub>3</sub>	500	98%	10.00
Sodio	Na <sup>+</sup>	200	98%	4.00
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250	98%	5.00
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	250	98%	5.00
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	98%	1.00
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	1.5	98%	0.03
Zinc	Z	3	98%	0.06
Cobre	Cu	2	98%	0.04

Una vez calculadas las concentraciones de sales en el permeado, se procede a calcular la presión osmótica.

Tabla 3. 5. Cálculo de la presión osmótica del flujo de permeado

Cálculo de la presión osmótica en el permeado									
Compuesto	Fórmula	Coefficiente osmótico	Concentración volumétrica MÁXIMA*	Peso molecular	Concentración molar MÁXIMA	Número de iones	Constante de Boltzmann	Temperatura	Presión osmótica alimentación
Símbolo		$\phi$	$C_p$	w	$M_p = C_p/(w*1000)$	i	R	T	$\pi_p = \phi i M_p R T$
Unidades			mg/L	g/mol	mol/L	(mol ion/mol compuesto)	L kPa/mol K	K	kPa
Dureza del agua*	CaCO <sub>3</sub>	0.95	10	100.869	9.91385E-05	2	8.3144598	293	0.458878324
Sodio	Na+	0.95	4	22.9898	0.00017399	1	8.3144598	293	0.40267073
Cloruros	Cl-	0.95	5	35.5	0.000140845	1	8.3144598	293	0.325961956
Sulfato	SO4	0.95	5	96.1	5.20291E-05	1	8.3144598	293	0.120412585
Nitratos	NO3	0.95	1	62.005	1.61277E-05	1	8.3144598	293	0.037324891
Amoniaco	NH3	0.95	0.03	17.031	1.76149E-06	1	8.3144598	293	0.004076678
Zinc	Z	0.95	0.06	65.38	9.17742E-07	1	8.3144598	293	0.002123888
Cobre	Cu	0.95	0.04	63.546	6.29465E-07	1	8.3144598	293	0.00145679

Presión osmótica total (kPa) 1.3529  
 Presión osmótica total (Pa) 1.352.906

Por tanto

$$\pi_p = 1354.15 \text{ Pa}$$

#### 3.4.4. Presión osmótica del flujo de rechazo

La presión osmótica del flujo de rechazo depende, tanto del rechazo propio de la membrana, como de la cantidad de agua producida por el permeado. A mayor cantidad de permeado producido para un mismo flujo de alimentación, el flujo de rechazo será menor y la concentración aumentará para una cantidad de solutos dada.

De acuerdo a la ecuación 2.9:

$$C_R = C_a \times \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right]$$

Si asumimos que proporción relativa de solutos se mantiene igual, es decir, todos los solutos disminuyen en la misma proporción, entonces podemos reemplazar la ecuación 2.9 en la ecuación 2.1:

$$C_R \phi iRT = C_a \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right] \phi iRT \quad (3.12)$$

Entonces podemos concluir que la presión osmótica del rechazo es función de la presión osmótica del agua de alimentación, la recuperación del sistema y el rechazo de la membrana:

$$\pi_r = \pi_a \times \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right] \quad (3.13)$$

$$\Delta P_{NET} = \Delta P_a - \Delta \pi = P_f - P_p - \Delta \pi \quad (3.14)$$

Paso siguiente reemplazaremos la ecuación 2.12 en la ecuación 3.8:

$$P_{NET} = \Delta P_a - \Delta \pi = P_a - P_p - \left[ \left( \frac{\pi_a + \pi_R}{2} \right) - \pi_p \right] \quad (3.15)$$

Expresamos la presión osmótica en función de las concentraciones

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \left[ \left( \frac{C_a + C_R}{2} \right) - C_p \right] i\phi RT \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \left( \frac{C_a + C_R}{2} \right) i\phi RT + C_p i\phi RT \quad (3.17)$$

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \frac{C_a}{2} i\phi RT - \frac{C_R}{2} i\phi RT + C_p i\phi RT \quad (3.18)$$

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \frac{\pi_a}{2} + \pi_p - \frac{C_R}{2} i\phi RT \quad (3.19)$$

Reemplazamos la ecuación 3.12 en la ecuación 3.19:

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \frac{\pi_a}{2} + \pi_p - \frac{C_a}{2} \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right] i\phi RT \quad (3.20)$$

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \frac{\pi_a}{2} + \pi_p - \frac{C_a}{2} \left[ \frac{1 - (1 - Rej)r}{1 - r} \right] i\phi RT \quad (3.21)$$

Si consideramos que  $Rej = 0.98$

$$\Delta P_{NET} = P_a - P_p - \frac{\pi_a}{2} + \pi_p - \frac{\pi_a}{2} \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.22)$$

Colocaremos la presión neta también en función de la recuperación. Para ello modificaremos la ecuación 3.5 para que exprese

$$Q_p = 1.14 \times 10^{-11} \Delta P_{NET} \quad (3.23)$$

reemplazaremos la ecuación 2.3 en la ecuación 3.23:

$$Q_p = 1.14 \times 10^{-11} \Delta P_{NET} = rQ_a \quad (3.24)$$

$$\Delta P_{NET} = 8.74 \times 10^{10} rQ_a \quad (3.25)$$

Paso siguiente, reemplazamos la ecuación 3.25 en la ecuación 3.22

$$8.74 \times 10^{10} rQ_a = P_a - P_p - \frac{\pi_a}{2} + \pi_p - \frac{\pi_a}{2} \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.26)$$

Finalmente, reemplazaremos los valores numéricos de la presión osmótica en la ecuación 3.26:

$$\pi_p = 1352.91 Pa$$

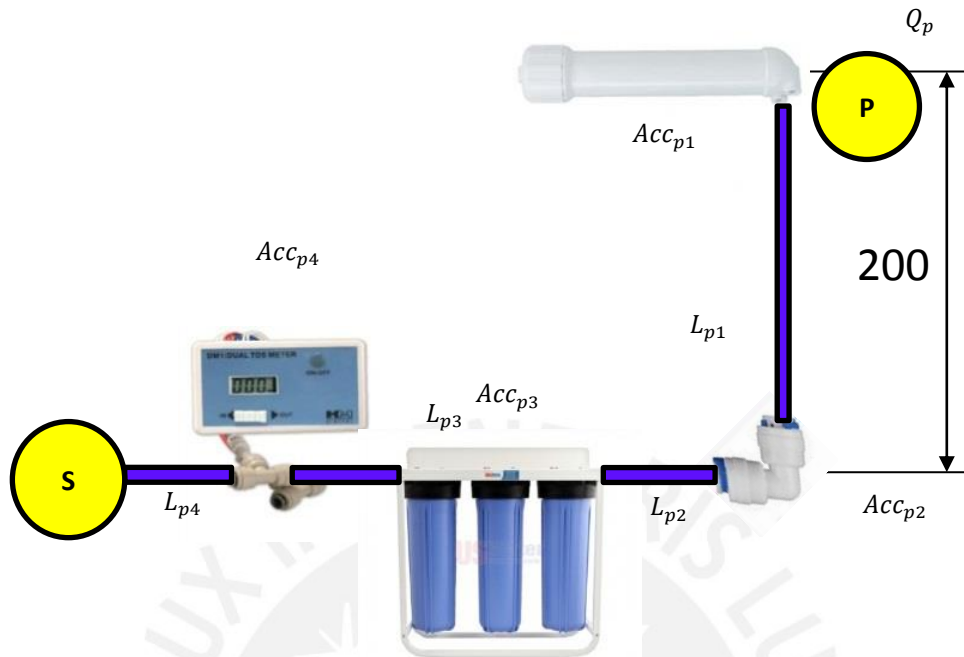
$$\pi_a = 71\,205.57 Pa$$

$$8.74 \times 10^{10} rQ_a = P_a - P_p - 35602.79 + 676.46 - 35602.79 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.27)$$

A continuación, calcularemos la presión de alimentación y la contra presión de permeado.

### 3.5. Cálculo de la presión de permeado

Para calcular la presión de permeado, utilizaremos la ecuación de Bernoulli entre los puntos P (salida del permeado) y el punto S (salida del fluido).



**Figura 3. 3.** Configuración de los elementos a la salida del flujo de permeado

$$P_p + \rho g Z_p + \frac{\rho V_p^2}{2} = P_s + \rho g Z_s + \frac{\rho V_s^2}{2} + \Delta P_{p \text{ tubería}} + \Delta P_{p \text{ accesorio}} + \Delta P_{p \text{ filtro}} \quad (3.28)$$

Asumimos entonces lo siguiente:

$$P_s = P_{\text{atm}} = 101,325 \text{ Pa}$$

$$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ kg m/s}^2$$

$$Z_p = 0.2\text{m}$$

$$Z_s = 0\text{m}$$

$$V_s \approx V_p$$

Reemplazamos estos valores en la ecuación 3.25:

$$P_p + \rho g 0.2\text{m} + \frac{V_p^2}{2g} = 101325 + 0 + \frac{V_s^2}{2g} + \Delta P_{p \text{ tubería}} + \Delta P_{p \text{ accesorio}} \quad (3.29)$$

Y operamos

$$P_p = 99366.53 \text{ Pa} + \Delta P_{p \text{ tubería}} + \Delta P_{p \text{ accesorio}} \quad (3.30)$$

### 3.5.1. Pérdidas en tuberías

De acuerdo a la teoría presentada, primero calcularemos el número de Reynolds según la fórmula 2.26, para saber qué tipo de flujo tenemos. Sabemos que:

$$Q_p = 3 \text{ gal/h}$$

$$A = 1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$D_h = 4,76 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Viscosidad cinemática } \nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q_p = 3 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \cdot \frac{0.00378541 \text{ m}^3}{\text{gal}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 3.15 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.31)$$

$$V = \frac{Q_p}{A} = \frac{1.05 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.32)$$

$$Re = \frac{D_h \cdot V}{\nu} = \frac{4.76 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.007 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 850.84 \quad (3.33)$$

Este valor ubica a nuestro sistema en el rango de flujo laminar el siguiente paso es determinar si la tubería es hidráulicamente lisa o rugosa mediante la ecuación:

$$Re \frac{\varepsilon}{D_i} = 850.84 \frac{0.002 \text{ mm}}{4.76 \text{ mm}} = 0.36 \quad (3.34)$$

Este valor indica que la tubería es hidráulicamente lisa, por tanto usaremos la fórmula de Blasius para calcular el coeficiente de fricción

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{850.84} = 0.075 \quad (3.35)$$

Expresaremos las pérdidas en las tuberías como una función del caudal de permeado usando la ecuación 2.25:

$$\Delta P_{p \text{ tubería}} = \lambda \frac{L\rho}{2A^2 D_i} Q^2 = K_{p \text{ tubería}} Q_p^2 \quad (3.36)$$

En la siguiente tabla calcularemos el valor de K para el sistema de tuberías del permeado sumando los valores individuales de K de cada tramo de tubería.



**Tabla 3. 6.** Cálculo del factor de pérdidas en tuberías para el circuito de permeado

No.	L	Di	A	$\rho$	lambda	$K_{p \text{ tubería}}$
	m	m	m <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$	
1	0.2	0.00476	1.8E-05	998.2	0.075	4.97E+12
2	0.05	0.00476	1.8E-05	998.2	0.075	1.24E+12
3	0.05	0.00476	1.8E-05	998.2	0.075	1.24E+12
4	0.1	0.00476	1.8E-05	998.2	0.075	2.48E+12
$K_{p \text{ tubería}}$						9.93E+12

Reemplazaremos este valor en la ecuación 3.32:

$$\Delta P_{Lp} = 9.93 \times 10^{12} Q_p^2 \quad (3.37)$$

Y reemplazaremos la ecuación 2.3. en la ecuación 3.33:

$$\Delta P_{p \text{ tubería}} = 9.93 \times 10^{12} r^2 Q_a^2 \quad (3.38)$$

### 3.5.2. Pérdidas en accesorios

Las pérdidas de presión en los accesorios se suelen determinar proporcionalmente a la energía cinética del flujo.

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} = \sum k_{acc} \frac{\rho V^2}{2} = \sum k_{acc} \frac{\rho Q^2}{2A^2} = K_{p \text{ acc}} Q_p^2 \quad (3.39)$$

**Tabla 3. 7.** Cálculo del factor de pérdidas en accesorios para el circuito de permeado

No.	ACCESORIO	k	$\rho$	A	$K_{p \text{ acc}}$
			kg/m <sup>3</sup>	m/s	
1	CODO 90°	0.9	998.2	1.78E-05	1.42E+12
2	CODO 90°	0.9	998.2	1.78E-05	1.42E+12
4	T	1.8	998.2	1.78E-05	2.84E+12
$K_{p \text{ acc}} \text{ total}$					5.67E+12

Reemplazaremos este valor en la ecuación 3.35:

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} = 5.67 \times 10^{12} Q_p^2 \quad (3.40)$$

Y reemplazaremos la ecuación 2.3. en la ecuación 3.36:

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} = 5.67 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 \quad (3.41)$$

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} = 1.2 \times 5.67 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 \quad (3.42)$$

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} = 6.8 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 \quad (3.43)$$

Al igual que las pérdidas en las tuberías, las pérdidas en los accesorios son muy pequeñas y pueden despreciarse. En el caso del filtro de resina deionizadora, se lo puede considerar como un accesorio adicional y por tanto se despreciará también sus pérdidas relacionadas.

Finalmente

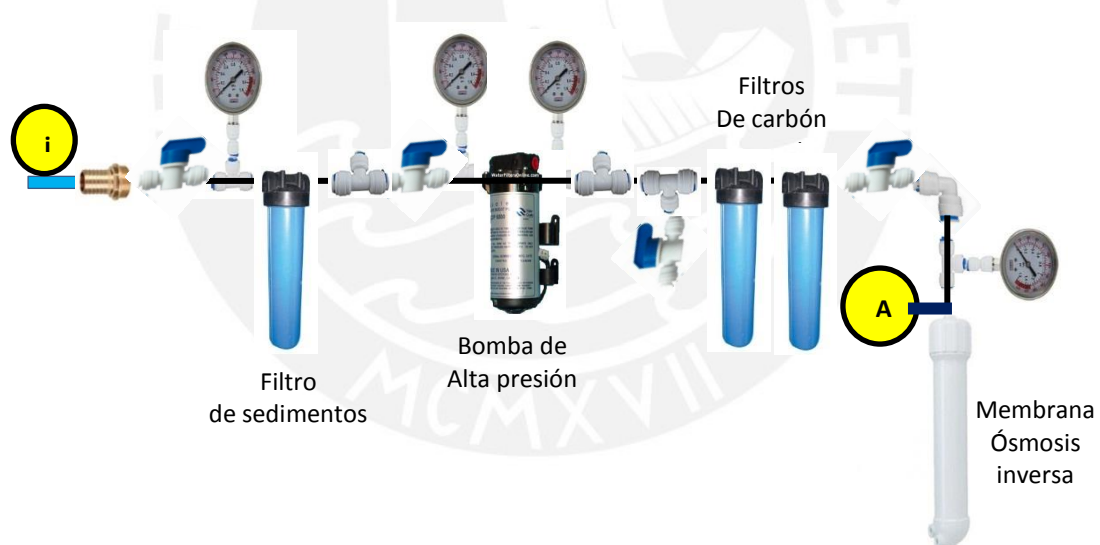
$$P_p = 99366.53 \text{ Pa} + \Delta P_{p \text{ tubería}} + \Delta P_{p \text{ accesorio}} \quad (3.44)$$

$$P_p = 99366.53 \text{ Pa} + 9.93 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 + 6.80 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 \quad (3.45)$$

$$P_p = 99366.53 \text{ Pa} + 9.93 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 + 5.67 \times 10^{12} r^2 Q_p^2 \quad (3.46)$$

$$P_p = 99366.53 \text{ Pa} + 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_p^2 \quad (3.47)$$

### 3.6. Cálculo de la presión de alimentación



**Figura 3. 4.** Diagrama del circuito de alimentación de la membrana

Plantearemos la ecuación de Bernoulli entre el ingreso de agua de la red a la máquina y el punto de alimentación a la membrana.

$$P_i + \rho g Z_i + \frac{\rho V_i^2}{2} + P_{bomba} \quad (3.48)$$

$$= P_a + \rho g Z_a + \frac{\rho V_a^2}{2} + \Delta P_{a \text{ tubería}} + \Delta P_{a \text{ accesorio}} + \Delta P_{a \text{ filtro}}$$

Consideramos que,

$$P_i = 225\,458.65 \text{ Pa}$$

$$Z_i = Z_a$$

$$V_i = V_a, \text{ por continuidad}$$

Reemplazamos los valores en la ecuación 3.42:

$$P_i + P_{bomba} = P_a + \Delta P_{a \text{ tubería}} + \Delta P_{a \text{ accesorio}} \quad (3.49)$$

$$P_a = P_i + P_{bomba} - \Delta P_{a \text{ tubería}} - \Delta P_{a \text{ accesorio}} \quad (3.50)$$

$$P_a = 225\,458.65 + P_{bomba} - \Delta P_{a \text{ tubería}} - \Delta P_{a \text{ accesorio}} \quad (3.51)$$

Falta calcular entonces las pérdidas de presión en las tuberías y accesorios.

### 3.6.1. Pérdidas en los accesorios

Utilizaremos la ecuación 2.27 para calcular el valor  $k_{a \text{ acc}}$  individual de cada accesorio

**Tabla 3. 8.** Cálculo de  $K_{a \text{ acc}}$  de cada accesorio

No.	ACCESORIO	k	$\rho$	A	$K_{a \text{ acc}}$
	tipo		kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	m
1	válvula de bola	10	998.2	1.78E-05	1.58E+13
2	T	1.8	998.2	1.78E-05	2.84E+12
3	válvula de bola	10	998.2	1.78E-05	1.58E+13
4	válvula de bola	10	998.2	1.78E-05	1.58E+13
5	T	1.8	998.2	1.78E-05	2.84E+12
6	válvula de bola	10	998.2	1.78E-05	1.58E+13
7	T	1.8	998.2	1.78E-05	2.84E+12
8	T	1.8	998.2	1.78E-05	2.84E+12
9	válvula de bola	10	998.2	1.78E-05	1.58E+13
<b><math>K_{p \text{ acc}}</math> total</b>					<b>9.02E+13</b>

$$\Delta P_{a \text{ accesorio}} = \sum k_i \frac{\rho V^2}{2} = \sum k_i \frac{\rho Q^2}{2A^2} = K_{a \text{ acc}} Q_a^2 \quad (3.52)$$

$$\Delta P_{a \text{ accesorio}} = 9.02 \times 10^{13} Q_a^2 \quad (3.53)$$

### 3.6.2. Pérdidas en las tuberías

De acuerdo a la teoría presentada, primero calcularemos el número de Reynolds, para saber si el flujo en el caudal de alimentación es laminar o turbulento.

Tomaremos un flujo de aproximado de alimentación para calcular un factor de pérdidas aproximado.

$$Q_p = 20 \text{ gal/h}$$

$$A = 1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$D_h = 4,76 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Viscosidad cinemática  $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Q_p = 20 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \cdot \frac{0.00378541 \text{ m}^3}{\text{gal}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2.1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.54)$$

$$V = \frac{Q_p}{A} = \frac{2.1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 1.18 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.55)$$

$$Re = \frac{D_h \cdot V}{\nu} = \frac{4.76 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.007 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 5578 \quad (3.56)$$

El valor anterior ubica a nuestro sistema en el rango de **flujo turbulento**.

$$Re \frac{\varepsilon}{D_i} = 5578 \frac{0.002 \text{ mm}}{4.76 \text{ mm}} = 2.34 \quad (3.57)$$

Este valor indica que las tuberías bajo estas condiciones son **hidráulicamente lisas**.

Para este caso la bibliografía indica utilizar la ecuación de Blasius:

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} = 0.037 \quad (3.58)$$

Una vez calculado el coeficiente de fricción, podemos calcular el valor de las pérdidas en cada tramo de tubería mediante la ecuación 2.27.

$$\Delta P_{a \text{ tubería}} = \lambda \sum \frac{\rho L_i}{2D_i A^2} Q^2$$

**Tabla 3. 9.** Pérdidas en cada tramo de la tubería de alimentación

No.	L	Di	A	$\rho$	lambda	$K_{p\text{ tubería}}$
	m	m	m <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>		
1	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
2	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
3	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
4	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
5	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
6	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
7	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
8	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
9	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
10	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
11	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
12	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
13	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
14	0.05	0.00476	1.78E-05	998.2	0.037	6.13E+11
<b><math>K_{p\text{ tubería}} \text{ TOTAL}</math></b>						<b>8.58E+12</b>

Ahora podemos pasar a graficar entonces las pérdidas.

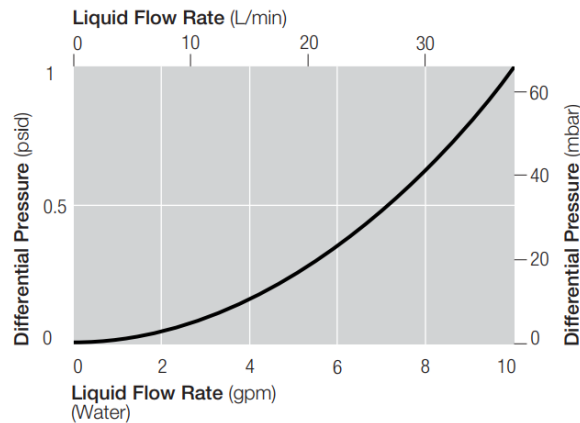
$$\Delta P_{p\text{ tubería}} = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i V^2}{D_i 2g} = K_{p\text{ tubería}} Q_a^2 \quad (3.59)$$

$$\Delta P_{p\text{ tubería}} = 8.58 \times 10^{12} Q_a^2 \quad (3.60)$$

### 3.6.3. Pérdidas en los elementos de filtrantes

Respecto a las pérdidas debido al efecto de los elementos filtrantes, podemos usar como referencia el catálogo del fabricante, en el Anexo 2.

### Pressure Drop vs. Liquid Flow Rate<sup>3</sup>



<sup>3</sup> For liquids other than water, multiply the pressure drop by the specific gravity of the fluid.

**Figura 3. 5.** Pérdida de presión vs Caudal para un filtro<sup>17</sup>

De acuerdo a lo indicado, para un caudal de 20 gph (0.33 gpm) la pérdida de presión es prácticamente nula, por tanto no se considerará.

Sin embargo, debe monitorearse el estado de saturación del filtro para evitar que se genere un diferencial de presión significativo debido a la suciedad acumulada.

Para considerar el efecto de la carcasa de los filtros y agregar un factor de seguridad debido a la eventual saturación de los elementos filtrantes contenidos en los cartuchos, usaremos un factor de seguridad de 1.2 a las pérdidas de presión por cada filtro en los accesorios del permeado y alimentación.

Por tanto, en la alimentación, que tiene 3 filtros, agregaremos un 60% de pérdidas y en el permeado un 20% de pérdidas.

$$\Delta P_{a \text{ accesorio}} + \Delta P_{a \text{ filtro}} = 1.6 \cdot \Delta P_{a \text{ accesorio}}$$

$$\Delta P_{p \text{ accesorio}} + \Delta P_{p \text{ filtro}} = 1.2 \cdot \Delta P_{p \text{ accesorio}}$$

Reemplazaremos los valores encontrados mediante las ecuaciones 3.47 y 3.54:

$$\Delta P_{a \text{ accesorio}} = 9.02 \times 10^{13} Q_a^2$$

$$\Delta P_{a \text{ accesorio}} + \Delta P_{a \text{ filtro}} = 1.6 \cdot \Delta P_{a \text{ accesorio}} = 1.6 \times 9.02 \times 10^{13} Q_a^2 = 1.44 \times 10^{14} Q_a^2$$

$$\Delta P_{a \text{ tubería}} = 8.58 \times 10^{12} Q_a^2$$

<sup>17</sup> Ver Anexo 2

En la ecuación 3.45:

$$P_a = P_{bomba} + 225\,458.65 Pa - \Delta P_{a\,tubería} - \Delta P_{a\,accesorio} - \Delta P_{a\,filtro} \quad (3.61)$$

$$P_a = 225\,458.65 Pa + P_{bomba} - 8.58 \times 10^{12} Q_a^2 - 1.44 \times 10^{14} Q_a^2 \quad (3.62)$$

$$P_a = P_{bomba} + 225\,458.65 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 \quad (3.63)$$

### 3.7. Ecuación para el cálculo de la recuperación

Para poder tener todos los términos de la ecuación en función de la recuperación, y presión y caudal suministrados por la bomba. Reemplazaremos los valores obtenidos en las ecuaciones 3.43 y 3.59:

$$P_p = 99366.53 Pa + 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_p^2$$

$$P_a = P_{bomba} + 225\,458.65 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2$$

Trabajamos ahora con la ecuación 3.25:

$$8.74 \times 10^{10} r Q_a = P_a - P_p - 353 + 13.12 - 353 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.64)$$

Simplificamos la ecuación:

$$8.74 \times 10^{10} r Q_a = P_a - P_p - 339.88 - 353 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.65)$$

Primero calcularemos el valor de  $P_a - P_p$ :

$$P_a - P_p = P_{bomba} + 225\,458.65 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 - 99\,366.53 Pa - 1.56 \times 10^{13} r^2 Q_a^2 \quad (3.66)$$

$$P_a - P_p = P_{bomba} + 126\,092.12 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 - 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_a^2 \quad (3.67)$$

Reemplazaremos la ecuación 3.61 en la ecuación 3.59:

$$\begin{aligned} 8.74 \times 10^{10} r Q_a &= P_a - P_p \\ &= P_{bomba} + 126\,092.12 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 - 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_a^2 \\ &\quad - 34\,249.88 - 35\,602.79 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned}
 & 8.74 \times 10^{10} r Q_a \\
 & = P_{bomba} + 91\,842.24 Pa - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 - 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_a^2 \\
 & - 35\,602.79 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right]
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

Debido a que tanto la presión suministrada por la bomba y el caudal de alimentación proporcionado están definidos según la curva característica de la bomba, para cada punto de operación de cada bomba podemos despejar la recuperación ( $r$ ) y con ello seleccionar una bomba para el punto de operación.

### 3.8. Selección de la bomba

#### 3.8.1. Curvas características de las bombas de diafragma

En la siguiente tabla se resumen, según los manuales del fabricante (Ver Anexos 3 y 4), el caudal suministrado por varios modelos de bombas en función de la presión de descarga de la bomba, como frecuentemente se representa en la literatura técnica en el caso de las bombas de desplazamiento positivo.

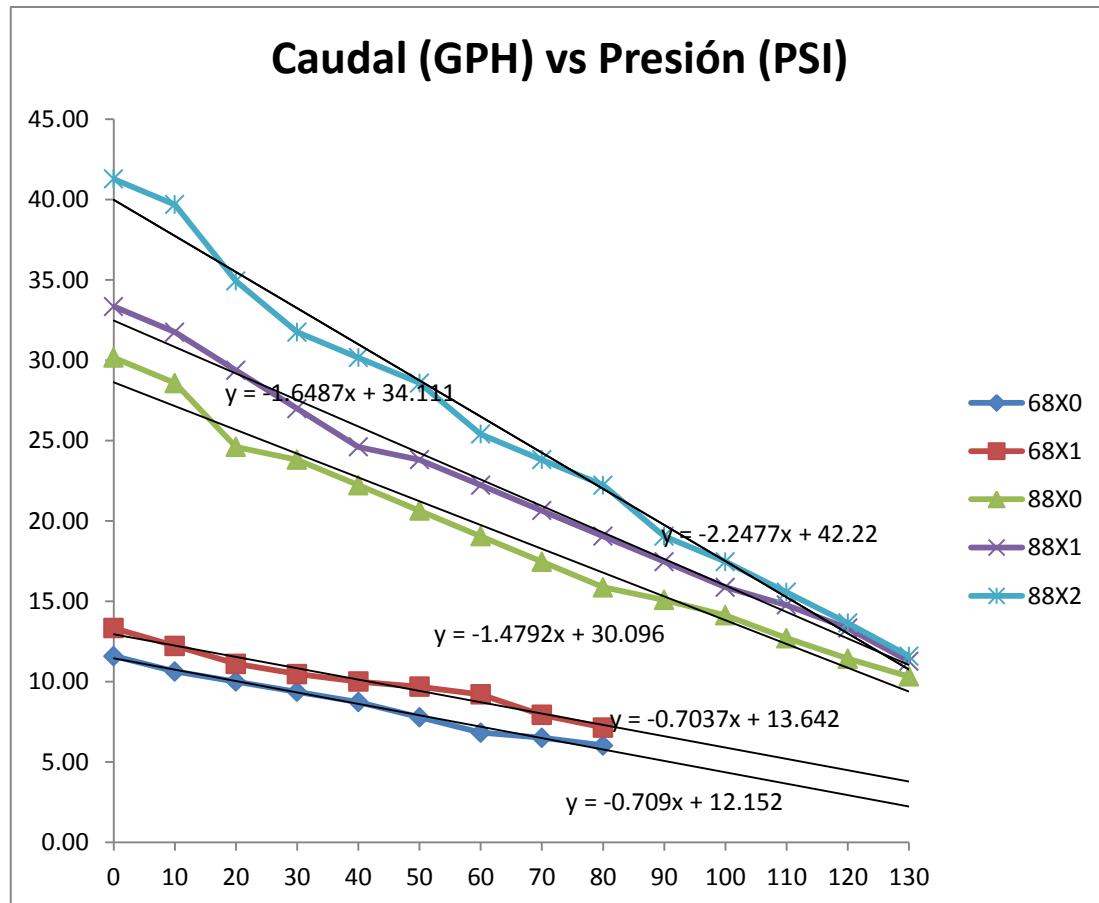
**Tabla 3. 10.** Caudal suministrado por la bomba a distintas presiones según el fabricante<sup>18</sup>

Presión de descarga	Caudal proporcionado por la bomba				
	Q <sub>a</sub>	Q <sub>a</sub>	Q <sub>a</sub>	Q <sub>a</sub>	Q <sub>a</sub>
P <sub>b</sub>	GPH	GPH	GPH	GPH	GPH
PSI	68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	11.59	13.33	30.16	33.33	41.27
10	10.63	12.22	28.57	31.75	39.68
20	10.00	11.11	24.60	29.37	34.92
30	9.37	10.48	23.81	26.98	31.75
40	8.73	10.00	22.22	24.60	30.16
50	7.78	9.68	20.63	23.81	28.57
60	6.83	9.21	19.05	22.22	25.40
70	6.51	7.94	17.46	20.63	23.81
80	6.03	7.14	15.87	19.05	22.22
90			15.08	17.46	19.05
100			14.13	15.87	17.46
110			12.70	14.76	15.56
120			11.43	13.33	13.65
130			10.32	11.27	11.59

<sup>18</sup> Ver Anexo 3 y Anexo 4

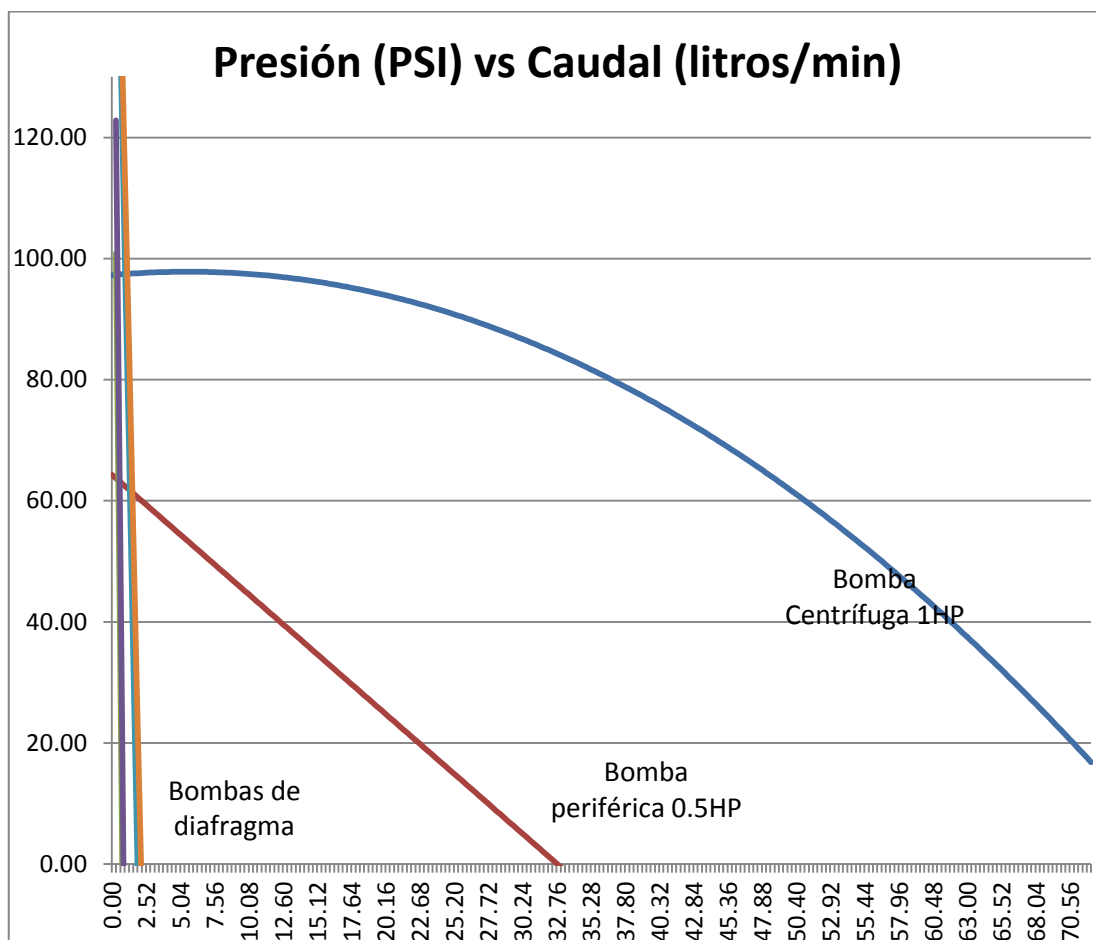


Si graficamos los valores se puede observar que las curvas características se puede aproximar a una línea recta horizontal, se realizó una aproximación lineal para tener una ecuación que represente a cada una de las curvas.



**Figura 3. 6.** Curvas características de las bombas pre-seleccionadas (Caudal vs Presión)

Luego, se puede graficar las curvas con los ejes invertidos (Presión vs Caudal) y comparar con dos bombas rotativas comunes en el mercado, la bomba periférica y la bomba centrífuga.



**Figura 3. 7.** Curvas características de varios tipos de bombas (Presión vs Caudal)

Cuando se comparan las curvas de estos tres tipos de bombas, se hace evidente que las curvas de las bombas de desplazamiento positivo son prácticamente una línea vertical a comparación de las curvas de las bombas centrífugas o periféricas.

También es evidente que para el flujo de agua de alimentación que nosotros necesitamos, entre cero y un litro por minuto, trabajar con bombas rotativas no es viable pues estaríamos extremadamente alejados del punto de máxima eficiencia de la bomba. Nuestra elección de utilizar una bomba de desplazamiento positivo es la única viable para las condiciones de operación requeridas.

### 3.8.2. Cálculo de la recuperación de agua ultra pura

El siguiente paso es calcular cuál es la recuperación de la máquina de ósmosis inversa para cada punto de operación de la bomba.

Los valores de la presión suministrada por la bomba ( $P_b$ ) y el caudal suministrado ( $Q_a$ ) los reemplazaremos en la ecuación 3.63 y luego despejaremos la recuperación para cada punto de funcionamiento. Este proceso se realizó mediante métodos numéricos computacionales.

$$8.74 \times 10^{10} r Q_a = P_{bomba} + 91842.24 Pa - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 - 1.67 \times 10^{13} r^2 Q_a^2 - 35602.79 \left[ \frac{1 - 0.02r}{1 - r} \right] \quad (3.70)$$

Los resultados se exponen en la figura siguiente.

**Tabla 3. 11.** Cálculo de la recuperación en varios puntos de operación

Presión		Recuperación				
$P_b$		r				
PSI	Pa	%				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	0.00	3.0%	2.1%	-3.5%	-4.3%	-7.0%
10	68,947.60	10.4%	8.6%	-0.5%	-1.5%	-4.8%
20	137,895.20	18.4%	16.3%	4.0%	1.8%	-1.4%
30	206,842.80	27.3%	24.2%	7.5%	5.5%	2.1%
40	275,790.40	37.2%	32.4%	11.9%	10.0%	5.3%
50	344,738.00	49.8%	40.5%	16.9%	13.7%	8.8%
60	413,685.60	63.8%	49.7%	22.7%	18.5%	14.1%
70	482,633.20	73.0%	63.9%	29.4%	24.0%	18.7%
80	551,580.80		75.1%	37.3%	30.3%	24.0%
90	620,528.40			44.0%	37.6%	33.2%
100	689,476.00			51.8%	46.1%	41.1%
110	758,423.60			62.4%	54.2%	51.7%
120	827,371.20			72.9%	64.4%	65.1%
130	896,318.80			81.8%	77.9%	76.5%

Los valores negativos indican que la presión neta en la membrana es menor que la presión osmótica, físicamente esto se interpreta como una recuperación igual a cero. En la siguiente gráfica se ilustran los valores de recuperación positivos en porcentaje, versus la presión de descarga de la bomba en psi.

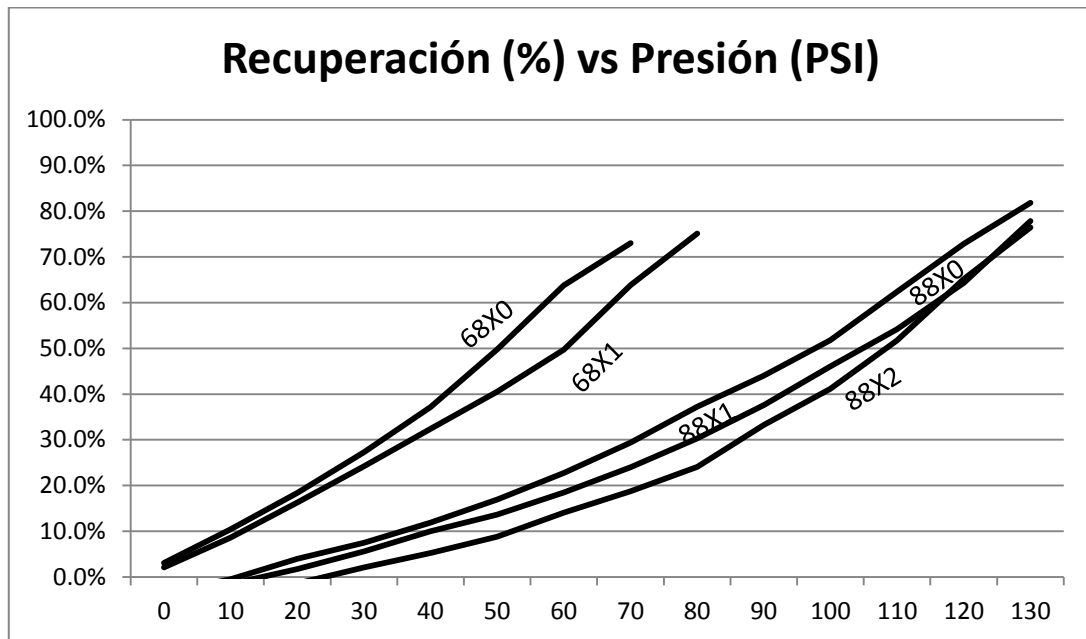


Figura 3. 8. Recuperación vs Presión de descarga

Esto confirma la parte teórica: a mayor presión, mayor recuperación obtenida por la membrana.

### 3.8.3. Cálculo del caudal de permeado producido

Una vez calculada la recuperación, aplicaremos la ecuación 2.3 para obtener los valores de caudal de permeado para cada punto de operación.

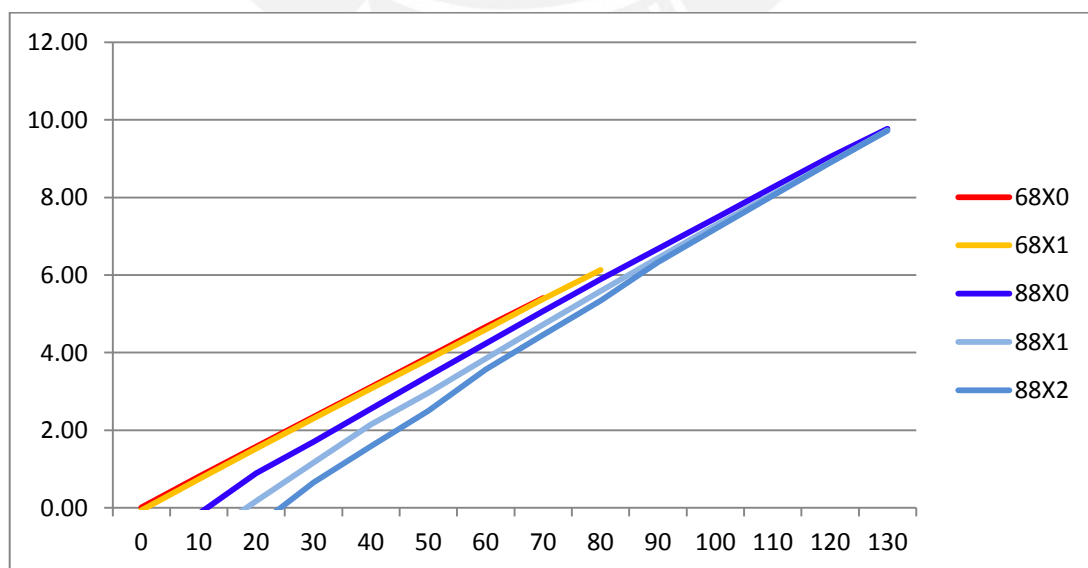
$$Q_p = Q_a r \quad (3.71)$$

**Tabla 3. 12.** Caudal de permeado producido por la membrana en distintos puntos de operación

Presión de descarga		Caudal de permeado producido por la membrana				
$P_b$		$Q_p$				
PSI	Pa	GPH				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	0.00	0.35	0.28	-1.05	-1.42	-2.88
10	68.95	1.11	1.05	-0.14	-0.49	-1.89
20	137.90	1.84	1.81	0.98	0.52	-0.48
30	206.84	2.56	2.54	1.79	1.50	0.66
40	275.79	3.24	3.24	2.65	2.45	1.59
50	344.74	3.87	3.93	3.50	3.25	2.51
60	413.69	4.35	4.58	4.33	4.11	3.57
70	482.63	4.75	5.07	5.14	4.95	4.46
80	551.58		5.37	5.91	5.77	5.34
90	620.53			6.63	6.56	6.33
100	689.48			7.32	7.31	7.18
110	758.42			7.92	8.00	8.05
120	827.37			8.33	8.58	8.89
130	896.32			8.44	8.77	8.86

Los valores negativos, corresponden a los puntos de operación donde la presión neta en la membrana es menor a la presión osmótica; físicamente, esto quiere decir, que el caudal de permeado es nulo: no hay paso de agua a través la membrana.

Se resaltaron con amarillo todos los caudales de permeado mayores o iguales a tres galones por hora, con lo cual concluimos que la bomba de agregar presión a partir de 40 psi o 276 kPa para obtener el caudal que necesitamos de la máquina.

**Figura 3. 9.** Gráfica del caudal de permeado producido (GPH vs PSI)

### 3.8.4. Caudal de agua de rechazo producida

Es necesario analizar la cantidad de agua de rechazo producida, pues es agua que, si bien puede ser útil para algunas aplicaciones, no es potable.

Calcularemos el caudal de agua de rechazo con la ecuación 2.5:

$$Q_r = Q_a - Q_p \quad (3.72)$$

**Tabla 3. 13.** Caudal de agua de rechazo producido

Presión de descarga		Caudal de agua de rechazo				
P <sub>b</sub>		Q <sub>r</sub>				
PSI	kPa	GPH				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	0.00	11.23	13.06	31.21	34.75	44.15
10	68.95	9.53	11.17	28.71	32.23	41.57
20	137.90	8.16	9.30	23.62	28.85	35.41
30	206.84	6.81	7.94	22.02	25.49	31.09
40	275.79	5.49	6.76	19.57	22.15	28.57
50	344.74	3.91	5.76	17.14	20.55	26.07
60	413.69	2.47	4.63	14.72	18.11	21.83
70	482.63	1.76	2.87	12.32	15.68	19.35
80	551.58		1.78	9.96	13.28	16.88
90	620.53			8.45	10.90	12.72
100	689.48			6.80	8.56	10.28
110	758.42			4.78	6.77	7.51
120	827.37			3.10	4.75	4.76
130	896.32			1.88	2.50	2.73

El modelo de bomba que produce la menor cantidad de desperdicio de agua es la línea 68X0, la bomba 88X0 produce más agua ultra pura, pero también desperdicia mucha más agua.

### 3.8.5. Eficiencia de las bombas de diafragma

Solo falta analizar la eficiencia con la que operaría la bomba según la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Energía aplicada al fluido}}{\text{Energía absorbida por la bomba}} = \frac{\text{Potencia aplicada al fluido}}{\text{Potencia eléctrica}} = \frac{\rho g Q H}{V I \cos \phi} \quad (3.73)$$

En la siguiente tabla se resumen los valores de corriente absorbidos por cada modelo de bomba a distintas presiones.

**Tabla 3. 14.** Corriente eléctrica consumida en distintos puntos de operación

Presión	Voltaje	Corriente (Amperios)				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	24	0.23	0.23	0.53	0.58	0.70
10	24	0.27	0.28	0.60	0.64	0.75
20	24	0.33	0.36	0.72	0.77	0.91
30	24	0.38	0.43	0.82	0.89	1.02
40	24	0.43	0.49	0.90	0.99	1.17
50	24	0.49	0.56	0.98	1.10	1.29
60	24	0.53	0.61	1.06	1.19	1.43
70	24	0.58	0.67	1.14	1.29	1.55
80	24	0.62	0.72	1.20	1.40	1.65
90	24			1.28	1.48	1.78
100	24			1.34	1.58	1.90
110	24			1.41	1.67	2.02
120	24			1.47	1.77	2.13
130	24			1.53	1.83	2.20

Luego, se calcula en Watts la potencia según la fórmula de potencia eléctrica para corriente alterna  $P = VI \cos \phi$ . Para este estudio consideraremos un factor de potencia de 0.8.

**Tabla 3. 15.** Potencia eléctrica consumida en distintos puntos de operación

Presión	Voltaje	Pot = V*I*0.8 (Watts)				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	24	4.42	4.42	10.18	11.14	13.44
10	24	5.18	5.38	11.52	12.29	14.40
20	24	6.34	6.91	13.82	14.78	17.47
30	24	7.30	8.26	15.74	17.09	19.58
40	24	8.26	9.41	17.28	19.01	22.46
50	24	9.41	10.75	18.82	21.12	24.77
60	24	10.18	11.71	20.35	22.85	27.46
70	24	11.14	12.86	21.89	24.77	29.76
80	24	11.90	13.82	23.04	26.88	31.68
90	24			24.58	28.42	34.18
100	24			25.73	30.34	36.48
110	24			27.07	32.06	38.78
120	24			28.22	33.98	40.90
130	24			29.38	35.14	42.24

Una vez calculada la potencia eléctrica, pasaremos a calcular la potencia aplicada al fluido por la bomba mediante la fórmula

$$Potencia = \rho g H Q \quad (3.74)$$

La cual podemos expresar también como:

$$Pot = P_b Q_a \quad (3.75)$$

Donde la presión está en Pascales y el caudal en metros cúbicos por segundo.

**Tabla 3. 16.** Potencia aplicada al fluido

Presión de la bomba		Potencia aplicada al fluido				
$P_b$		$Pot = \rho g Q H = P_b Q$				
PSI	Pa	W				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	68,947.60	0.77	0.89	2.07	2.30	2.88
20	137,895.20	1.45	1.61	3.57	4.26	5.07
30	206,842.80	2.04	2.28	5.18	5.87	6.91
40	275,790.40	2.53	2.90	6.45	7.14	8.75
50	344,738.00	2.82	3.51	7.48	8.63	10.36
60	413,685.60	2.97	4.01	8.29	9.67	11.05
70	482,633.20	3.30	4.03	8.87	10.48	12.09
80	551,580.80	3.50	4.14	9.21	11.05	12.89
90	620,528.40			9.84	11.40	12.43
100	689,476.00			10.25	11.51	12.66
110	758,423.60			10.13	11.78	12.41
120	827,371.20			9.95	11.61	11.88
130	896,318.80			9.73	10.63	10.93

Finalmente, analizaremos la eficiencia de las bombas para encontrar el punto de funcionamiento óptimo de la bomba y al mismo tiempo garantice la mejor eficiencia energética de la máquina de ósmosis inversa.

**Tabla 3. 17.** Eficiencia energética en distintos puntos de operación

Presión suministrada por la bomba		Eficiencia de la motobomba				
$P_b$		$\eta$				
PSI	Pa	%				
		68X0	68X1	88X0	88X1	88X2
0	0.00	0%	0%	0%	0%	0%
10	68,947.60	15%	16%	18%	19%	20%
20	137,895.20	23%	23%	26%	29%	29%
30	206,842.80	28%	28%	33%	34%	35%
40	275,790.40	31%	31%	37%	38%	39%
50	344,738.00	30%	33%	40%	41%	42%
60	413,685.60	29%	34%	41%	42%	40%
70	482,633.20	30%	31%	41%	42%	41%
80	551,580.80	29%	30%	40%	41%	41%
90	620,528.40			40%	40%	36%
100	689,476.00			40%	38%	35%
110	758,423.60			37%	37%	32%
120	827,371.20			35%	34%	29%
130	896,318.80			33%	30%	26%

A continuación se graficarán los valores numéricos obtenidos.



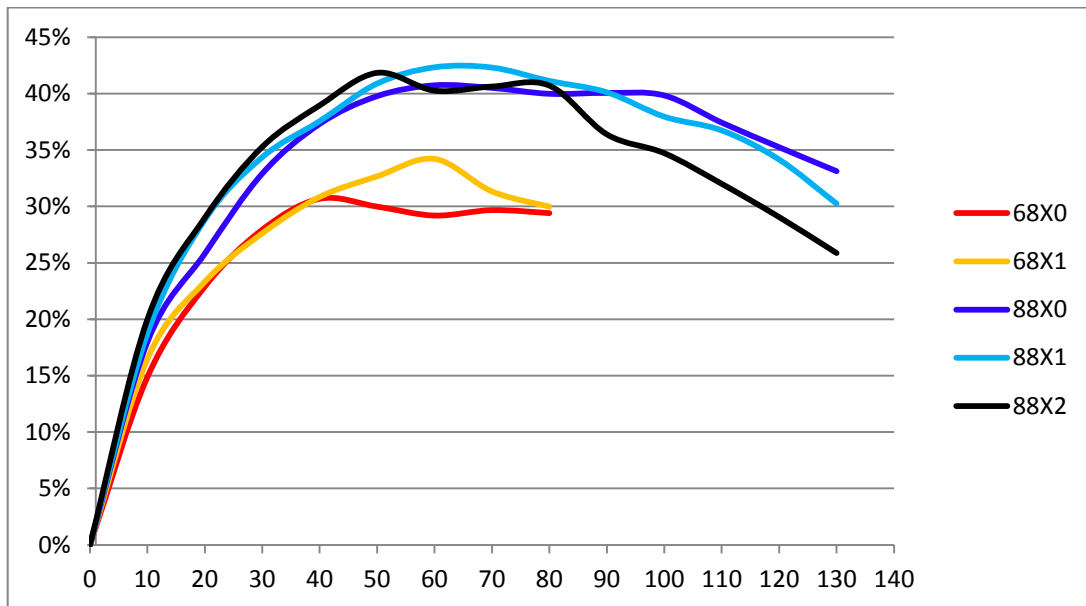


Figura 3. 10. Eficiencia (%) vs Presión (PSI)

Esto nos indica que la eficiencia es máxima es aproximadamente 40% para la línea 88X0 y 30% para la línea 66X0.

Tomaremos entonces 50 psi como la presión de trabajo de la bomba, pues es el punto donde logramos un 49.8% de recuperación de agua y una eficiencia energética de 30%.

Ahora que sabemos a qué presión trabajaría la bomba y el caudal de alimentación (7.78 GPH), podemos calcular la presión de alimentación que de la membrana según la ecuación 3.57:

$$P_a = P_{bomba} + 225\,458.65 - 1.53 \times 10^{14} Q_a^2 \quad (3.76)$$

$$P_a = 344,738.00 + 225\,458.65 - 1.53 \times 10^{14} \times 0.000009825^2 \quad (3.77)$$

$$P_a = 570196.65 - 14,769.19 \quad (3.78)$$

$$P_a = 555,427.46 \text{ Pa} \quad (3.79)$$

$$P_a = 80.56 \text{ psi} \quad (3.80)$$

La presión de alimentación necesaria para la membrana será aproximadamente **80 PSI**.

Con esta información podemos pasar ahora a seleccionar exactamente el modelo de bomba de agua según el catálogo del fabricante:

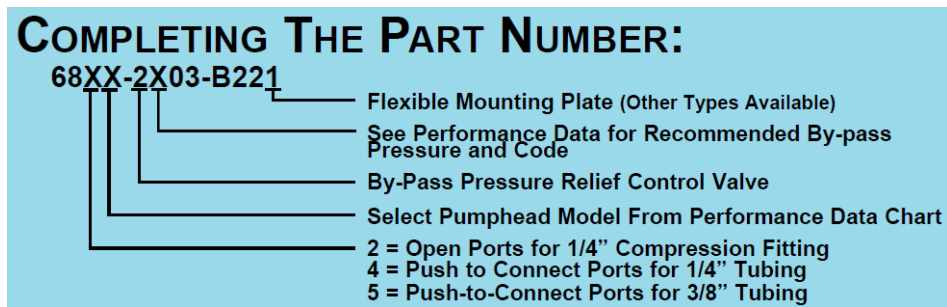


Figura 3. 11. Construcción de códigos de bomba<sup>19</sup>

En nuestro caso, elegimos los números:

2: Para conectar tubos de 1/4" mediante junta de compresión

0: Es el código para el modelo seleccionado de acuerdo al flujo y presión requeridos.

El control de by-pass lo elegiremos siguiendo las indicaciones del fabricante de la siguiente tabla

Tabla 3. 18. Tabla de códigos para bypass de seguridad<sup>20</sup>

RECOMMENDED BY-PASS PRESSURE	
PSI	CODE
110	J
100	I
90	H
80	G
70	F
60	E
50	D
40	B
30	A

J: Elegimos un modelo de bomba con by-pass de seguridad de 110 psi, que concuerda con los valores máximos de presión que toleran los componentes de la máquina a 20°C, de acuerdo a los fabricantes.

**La bomba seleccionada es la bomba marca AQUATEC modelo 6820-2J01-B221.**

<sup>19</sup> Ver Anexo 2

<sup>20</sup> Ver Anexo 2

### 3.9. Deionización

#### 3.9.1. Flujo de servicio

En este proyecto, usaremos resina deionizadora Lewatit. De acuerdo al fabricante, el flujo recomendado de operación es de 2 a 5 galones por minuto por pie cúbico de resina (Ver Anexo 5 y 6).

El volumen de resina vendrá dado por el volumen del cartucho que contendrá la resina. El cartucho que utilizaremos tendrá dimensiones de 2.5 pulgada de diámetro y 11 pulgadas de largo el cual puede contener un volumen de 0.8 litros de resina.



Figura 3. 12. Cartucho de resina iónica<sup>21</sup>

El volumen de resina contenida en un cartucho y el rango de operación para el volumen de resina contenido en el cartucho se calcula en la siguiente tabla.

Tabla 3. 19. Volumen de resina iónica en el cartucho

	Rango de operación recomendado		Dimensiones del cartucho	Flujo de agua desionizada
	$\frac{Q_{DI}}{V_{DI}}$		$V_{DI}$	$Q_{DI}$
	$\frac{gal}{min \cdot ft^3}$	$\frac{gal}{h \cdot m^3}$	$m^3$	GPH
mín	2	4237.77	8.00E-04	3.39
máx	5	10594.42	8.00E-04	8.48

Según lo calculado anteriormente, trabajaremos con un flujo de permeado de 3.87 GPH, por tanto un único filtro será suficiente para tratar el flujo de permeado producido.

<sup>21</sup> Imagen extraída de <http://www.purewatersite.com/25x10-c-refillable-inline-filter-mixed-bed-di-resin.html>

### 3.9.2. Dureza del agua

De acuerdo a la metodología expuesta en el anterior capítulo, convertiremos las concentraciones de cationes y aniones a meq/L. Primero, consideraremos los principales cationes y aniones presentes en el agua de permeado producida por la membrana de ósmosis inversa.

**Tabla 3. 20.** Concentración aproximada de solutos en el agua de permeado

<b>Concentración de solutos en el permeado</b>		
<b>Compuesto</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Concentración aproximada en el permeado</b>
		$C_p=(1-Re_j)C_a$
<b>Unidades</b>		mg/L
Dureza del agua*	CaCO <sub>3</sub>	10.00
Sodio	Na <sup>+</sup>	4.00
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	5.00
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	5.00
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.00
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	0.03

Como sabemos, la dureza del agua es la suma de las concentraciones de iones de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> sumadas y convertidas a concentración de CaCO<sub>3</sub>, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Dureza (M)} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \quad (3.81)$$

Sin embargo, es muy frecuente que esta dureza se determine o se indique como masa de carbonato cálcico en miligramos por cada litro de disolución, es decir, mg CaCO<sub>3</sub>/L

$$\begin{aligned} \text{Dureza} \left( \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right) &= 10 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \\ &= \left( A \frac{\text{meq Ca}^{+2}}{\text{L}} + B \frac{\text{meq Mg}^{+2}}{\text{L}} \right) 50.05 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{meq}} \end{aligned} \quad (3.82)$$

El magnesio, por lo general, corresponde aproximadamente a una tercera parte de la dureza total (15). Para simplificar el cálculo, reemplazaremos A por 2x y B por x solamente.

$$10 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} = 3x \cdot 50.05 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{meq}} \quad (3.83)$$

En el caso del magnesio consideramos x y calculamos la concentración en mg/L.

$$0.0667 \frac{\text{meq}}{\text{L}} = x \quad (3.84)$$

$$0.0667 \frac{\text{meq Mg}^{+2}}{\text{L}} \cdot \frac{1 \text{ mol Mg}^{+2}}{2 \text{ eq}} \cdot 24.305 \frac{\text{g}}{\text{mol Mg}^{+2}} = 0.809 \frac{\text{mg Mg}^{+2}}{\text{L}} \quad (3.85)$$

En el caso del calcio, consideramos 2x y calculamos la concentración en mg/L

$$0.133 \frac{\text{meq}}{\text{L}} = 2x \quad (3.86)$$

$$0.133 \frac{\text{meq Ca}^{+2}}{\text{L}} \cdot \frac{1 \text{ mol Ca}^{+2}}{2 \text{ eq}} \cdot 40.078 \frac{\text{g}}{\text{mol Ca}^{+2}} = 2.669 \frac{\text{mg Ca}^{+2}}{\text{L}} \quad (3.87)$$

### 3.9.3. Capacidad de intercambio iónico de las resinas catiónicas y aniónicas

La bibliografía indica que la concentración de bicarbonato en el agua potable puede llegar a 340 mg/L, la concentración del permeado será aproximadamente el 2% (6.8 mg/L.).

Del mismo modo la concentración máxima de potasio debe ser de 10mg/L, por tanto en el permeado habría aproximadamente 0.2mg/L.

El siguiente paso es calcular la concentración equivalente aproximada de aniones y cationes en el agua de permeado.

Tabla 3. 21. Concentración equivalente aproximada de aniones en el permeado

		Concentración	Peso molecular	Valencia	Peso molecular equivalente	Concentración equivalente
		$C_p$	w		w eq	$C_{eq}$
ANIONES		mg/L <sub>solución</sub>	g/mol	eq/mol	g/eq = mg/meq	meq/L <sub>solución</sub>
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	5	35.450	1	35.450	0.14104
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5	96.060	2	48.030	0.10410
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	62.005	1	62.005	0.01613
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.8	61.017	1	61.017	0.11144
<b>TOTAL</b>						<b>0.37272</b>

Tabla 3. 22. Concentración equivalente aproximada de cationes en el permeado

		Concentración	Peso molecular	Valencia	Peso molecular equivalente	Concentración equivalente
		$C_p$	w		w eq	$C_{eq}$
CATIONES		mg/L <sub>solución</sub>	g/mol	eq/mol	g/eq = mg/meq	meq/L <sub>solución</sub>
Sodio	Na <sup>+</sup>	4	22.9898	1	22.9898	0.17399
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	2.669	40.078	2	20.039	0.13319
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	0.809	24.305	2	12.1525	0.06657
Potasio	K <sup>+</sup>	0.2	39.083	1	39.083	0.00512
<b>TOTAL</b>						<b>0.37887</b>

Con los valores anteriores podemos calcular la proporción de resina aniónica/catiónica que necesitamos en el filtro y también calcular cuántos litros de agua tratar, antes de que la resina pierda su capacidad.

En la tabla siguiente se resumen los cálculos.

Tabla 3. 23. Cálculo del volumen de agua que puede tratar el filtro de resina iónica

RESINA	Capacidad de intercambio de la resina		Volumen de resina	Porcentaje de resina	Capacidad de intercambio del volumen de resina del filtro	Concentración		Capacidad volumétrica de tratamiento
	Cl		V <sub>DI</sub>	V <sub>DI</sub> /V <sub>Filtro</sub>	Cl/V <sub>DI</sub>	C <sub>eq</sub>		(Cl/V <sub>DI</sub> )/C <sub>eq</sub>
	eq/L	meq/L <sub>resina</sub>	L <sub>resina</sub>	%	meq	meq/L <sub>permeado</sub>		L <sub>permeado</sub>
ANIÓNICA	1.3	1300	0.482	60%	626.340	0.37272 aniones		1680
CATIÓNICA	2	2000	0.318	40%	636.400	0.37887 cationes		1680
<b>VOLUMEN TOTAL</b>			<b>0.800</b>					

De los cálculos anteriores podemos concluir que debido a la menor capacidad de intercambio de la resina aniónica, necesitamos una mezcla de aproximadamente 60%

de resina aniónica y 40% de resina catiónica en volumen en nuestro filtro para que ambas tengan la misma vida útil.

En la práctica, es común considerar que un 10 a un 40% de la capacidad de la resina permanecerá sin usarse (13), por lo mencionado y para tener un factor de seguridad adicional, consideraremos que solo el 60% de la capacidad de intercambio de la resina será utilizado. Considerando esa capacidad modificada, tendremos que la capacidad volumétrica final será de 1008 litros. Esto quiere decir que debemos cambiar la resina cada 1000 litros de agua de permeado tratada. Para llevar un control, debe llevarse un registro de la cantidad de galones producidos por la máquina y controlar la calidad del agua de permeado producida mediante el monitor de sólidos totales disueltos.



## CAPÍTULO 4

### PLANOS

En este capítulo se muestra la simbología y descripción de los planos de la máquina de ósmosis inversa.

#### 4.1. Simbología y lista de planos

Tabla 4. 1. Lista de planos

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
RO-ENS01-A1	Plano de ensamble de la máquina de ósmosis inversa
RO-ENS02-A1	Plano explosionado de la máquina de ósmosis inversa
RO-DES01-A2	Plano de despiece de la base de chapa metálica
RO-DES02-A3	Conexiones eléctricas
RO-DES03-A3	Nomenclatura de válvulas para operación



## CAPITULO 5 COSTOS

En este capítulo se analizan los costos fijos y variables de operación de la máquina de ósmosis.

### 5.1. Costos de adquisición

#### 5.1.1 Costos de adquisición de la máquina de ósmosis inversa

Los costos de los componentes que se necesitan adquirir para construir la máquina de ósmosis inversa y deionización diseñada en este trabajo se resumen en el Anexo 7.

Los honorarios por el trabajo de diseño de ingeniería de la máquina de ósmosis inversa y deionización serán de 3200 soles, que equivale a 160 horas de trabajo con una tarifa de 20 soles por hora.

**Tabla 5. 1.** Costos fijos de diseño de la máquina de ósmosis inversa

Costos fijos	
Costos de adquisición	S/. 3,300.00
Costos de diseño e ingeniería	S/. 3,200.00
<b>Costo fijo total</b>	<b>S/. 6500.00</b>

### 5.1.2. Costos fijos de la máquina de destilación simple

Se cotizó una máquina igual a la misma utilizada actualmente en el laboratorio de manufactura, con el mismo proveedor. El precio cotizado es de S/9900.00 incluido IGV.

## 5.2. Costos de energía

### 5.2.1. Tarifa de energía eléctrica

El costo de la energía eléctrica depende de la tarifa que paga la universidad por energía eléctrica, la cual puede ser BT2, BT3, BT4. Las diferencias no son significativas a niveles de energía tan bajos, por lo tanto, se eligió como referencia la tarifa BT2.

El tarifario BT2 se muestra en la figura siguiente.

**Tabla 5. 2.** Pliego tarifario ENEL – Lima Norte – Tarifa BT2<sup>22</sup>

TARIFAS PARA SUMINISTROS CON ALIMENTACION A TENSIONES NOMINALES EN BAJA TENSION		
<b>TARIFA BT2 :</b>	<b>TARIFA HORARIA CON MEDICION DOBLE DE ENERGIA Y CONTRATACION O MEDICION DE DOS POTENCIAS .- 2E2P</b>	
Cargo Fijo mensual	S./cliente	5.12
Cargo por Energía activa en horas de punta	Cent.S./kW.h	29.85
Cargo por Energía activa en horas fuera de punta	Cent.S./kW.h	25.03
Cargo por potencia activa de generación en horas de punta	S./kW-mes	64.00
Cargo por potencia activa por uso redes distribución en horas de punta	S./kW-mes	55.01
Cargo por exceso de potencia en horas fuera de punta	S./kW-mes	39.12
Cargo por energía reactiva que exceda del 30% del total de la energía activa	Cent.S./kvarh	5.24

Al elegir la tarifa se considera que las máquinas no funcionan en horas punta (18:00 a 23:00 horas) y que no producen energía reactiva en exceso.

La tarifa de energía eléctrica es entonces  $\frac{S/0.2503}{kW-h}$ .

### 5.2.2. Costos de energía de la máquina de ósmosis inversa

La bomba de desplazamiento positivo necesita de 24 voltios para operar y el consumo de corriente estará dado por la presión que genere la bomba. En el anexo 4 está la hoja técnica de la bomba, donde indica que para una presión de 50 psi (presión que entregará la bomba al fluido), el motor de la bomba consumirá 0.49 amperios.

<sup>22</sup> <https://www.enel.pe>

Para convertir esta potencia a kilowatts, primero necesitamos multiplicar el voltaje por la corriente en amperios para obtener la potencia aparente en voltio-amperios (vatios). Luego, para obtener la potencia real, se multiplica dicha potencia aparente por el factor de potencia (Se considera 0.8) y dividirlo entre 1000 para convertir a kW.

$$\text{Potencia real (kW)} = \frac{S \times FP}{1000} = \frac{24V \times 0.49 \times 0.8}{1000} = 0.0094 \text{ kW} \quad (5.1)$$

Por lo tanto, podemos calcular el costo horario de operación de la máquina

$$\frac{S/0.25}{\text{kW} - \text{h}} \cdot 0.0094 \text{ kW} = \frac{S/0.00235}{h} \quad (5.2)$$

Sabemos que la capacidad de producción de agua ultra pura la máquina es de

$$\text{Producción de agua} = Q_p = 3.87 \text{ GPH} = \frac{14.65 \text{ l}}{h} \quad (5.3)$$

Con estos valores podemos entonces calcular el costo de la energía por litro de agua purificada producida incluido IGV es:

$$\text{Costo de energía eléctrica} = \frac{\frac{S/0.00235}{h}}{\frac{14.65 \text{ l}}{h}} = \frac{S/1.604 \cdot 10^{-4}}{h} \quad (5.4)$$

$$\frac{S/1.604 \cdot 10^{-4}}{h} \cdot 1.18 = \frac{S/1.893 \cdot 10^{-4}}{h} \quad (5.5)$$

### 5.2.3. Costos de energía de la máquina de destilación simple

La máquina de destilación simple del laboratorio tiene una potencia de 4400 Watts.

$$\text{Potencia} \times \text{Precio} = 4.4 \text{ kW} \times \frac{S/0.2503}{\text{kW} - \text{h}} = \frac{S/1.1013}{h} \quad (5.6)$$

Si consideramos una capacidad de producción de 1.6 galones por hora o 6.14 litros por hora, podemos calcular el costo energético de cada litro de agua destilada producida incluido IGV es:

$$\text{Costo de energía eléctrica por destilación} = \frac{\frac{S/1.1}{h}}{\frac{6.14 \text{ l}}{h}} \cdot 1.18 = \frac{S/0.212}{l} \quad (5.7)$$

### 5.3. Costo del agua

#### 5.3.1. Tarifa de agua potable

En la siguiente tabla vemos la estructura tarifaria vigente según SEDAPAL.

**Tabla 5. 3.** Estructura tarifa vigente - SEDAPAL<sup>23</sup>

CLASE CATEGORIA	RANGOS DE CONSUMOS	Tarifa (S/ / m <sup>3</sup> )	
	m <sup>3</sup> /mes	Agua Potable	Alcantarillado <sup>(1)</sup>
<b>RESIDENCIAL</b>			
Social	0 a más	1.255	0.575
Doméstico Subsidiado	0 - 10	1.255	0.575
	10 - 20	1.400	0.668
	20 - 50	1.478	0.901
	50 a más	5.360	2.499
Doméstico No Subsidiado	0 - 20	1.478	0.901
	20 - 50	2.098	1.262
	50 a más	5.360	2.499
<b>NO RESIDENCIAL</b>			
Comercial	0 a 1000	5.360	2.499
	1000 a más	5.751	2.680
Industrial	0 a más	5.751	2.680
Estatal	0 a más	3.525	1.591

Se considerará la tarifa de agua comercial con un consumo de 1000 m<sup>3</sup> o más al mes para la universidad: S/ 5.751/m<sup>3</sup>.

#### 5.3.2. Costo del agua - Máquina de ósmosis inversa

El caudal de alimentación de agua utilizado por la máquina de ósmosis inversa será de

$$\frac{7.78 \text{ gal}}{h} = \frac{0.0295 \text{ m}^3}{h} \quad (5.8)$$

El consumo de agua en soles de la máquina de ósmosis inversa será de aproximadamente:

<sup>23</sup> <http://www.sedapal.com.pe>

$$\frac{0.0295m^3}{h} \cdot \frac{S/5.751}{m^3} = \frac{S/0.17}{h} \quad (5.9)$$

El flujo de agua ultra pura producida (permeado) según los cálculos del capítulo 3 es

$$\frac{3.87gal}{h} = \frac{14.65l}{h}$$

Con dicha información se calcula el costo en soles por litro de agua ultra pura producida

$$\frac{S/0.17}{h} / \frac{14.65l}{h} = \frac{S/0.0116}{l} \quad (5.10)$$

Finalmente, lo multiplicamos por 1.18 para sumar el IGV:

$$\frac{S/0.0116}{l} \cdot 1.18 = \frac{S/0.0137}{l} \quad (5.11)$$

### 5.3.3. Costo del agua - Máquina de destilación simple

La máquina de destilación consume aproximadamente 1 metro cúbico de agua por cada litro de agua destilada producida. Sabemos, que la máquina de destilación produce 49.21 litros (13 galones) cada 8 horas, por lo tanto, el consumo de agua de la máquina de destilación se ubica en 49.21 metros cúbicos de agua cada 8 horas. Al dividir el consumo entre el tiempo, se obtiene un flujo de consumo  $6.15 m^3/h$ .

El consumo de agua en soles de nuestra máquina será de aproximadamente

$$\frac{6.15 m^3}{h} \cdot \frac{S/5.751}{m^3} = \frac{S/35.37}{h} \quad (5.12)$$

Con dicha información se calcula el costo en soles por litro de agua ultra pura producida

$$\frac{S/35.37}{h} / \frac{6.15l}{h} = \frac{S/5.75}{l} \quad (5.13)$$

Finalmente lo multiplicamos por 1.18 para sumar el IGV.

$$\frac{S/5.75}{l} \cdot 1.18 = \frac{S/6.79}{l} \quad (5.14)$$

## 5.4. Costos de partes consumibles

### 5.4.1. Costos de partes consumibles de la máquina de ósmosis inversa

Las partes consumibles de la máquina son el elemento filtrante de sedimentos, los elementos filtrantes de carbón activado, la membrana de ósmosis inversa y la resina deionizadora. En anexo 9 se resumen los costos de las piezas consumibles en soles por litro de agua ultra pura producida.

### 5.4.2. Costos de partes consumibles de la máquina de destilación

La máquina de destilación simple del laboratorio necesita un mantenimiento periódico a cargo del proveedor de la máquina, el cual cuesta 800 soles cada 3 meses (120 horas aprox.). El costo de mantenimiento de la máquina de destilación asciende entonces a S/ 6.67/h. Con una capacidad de producción de 6.14 litros de agua ultra pura por hora, el costo del mantenimiento es de S/ 1.09/hora

## 5.5. Resumen de costos de operación

Una vez calculados los costos variables asociados a la operación de ambas máquinas, se suman para obtener el costo de operación total en de cada una de las máquinas, en soles por litro de agua ultra pura producida y así poder compararlas.

### 5.5.1. Costos de operación de la máquina de ósmosis inversa

A continuación se resumen costos de operación en soles por litro de agua ultra pura producida por la máquina de ósmosis inversa diseñada.

Tabla 5. 4. Costos variables de operación de la máquina de ósmosis inversa

Costos variables (soles / litro de agua ultra pura)	
Costo de energía eléctrica	0.00016
Costo de agua	0.01370
Costos de piezas consumibles	0.20700
<b>Costo variable total (soles / l)</b>	<b>0.221</b>

### 5.5.2. Costos de operación de la máquina de destilación

Tabla 5. 5. Costos variables de operación de la máquina de destilación

Costos variables (soles / litro de agua destilada)	
Costo de energía eléctrica	0.212
Costo de agua	6.790
Costo de mantenimiento	1.090
<b>Costo variable total (soles / l)</b>	<b>8.092</b>

### 5.6. Comparación de costos de máquina de destilación y ósmosis inversa

En la siguiente figura se graficaron los costos variables calculados para las máquinas de destilación por ósmosis inversa y por destilación simple, se incluye el costo variable de la compra de agua destilada a un proveedor como referencia.

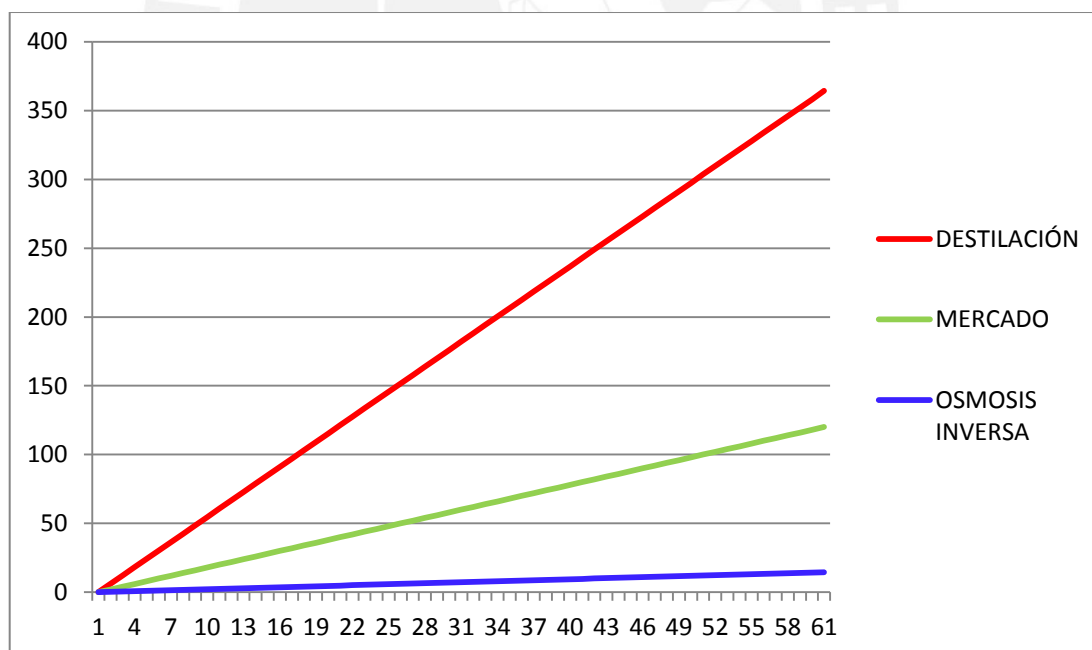


Figura 5. 1. Costos variables de operación (soles/litro de agua purificada producida)

A continuación, se grafica los costos fijos y variables de la máquina de destilación y de ósmosis inversa (soles vs litros de agua purificada producida).

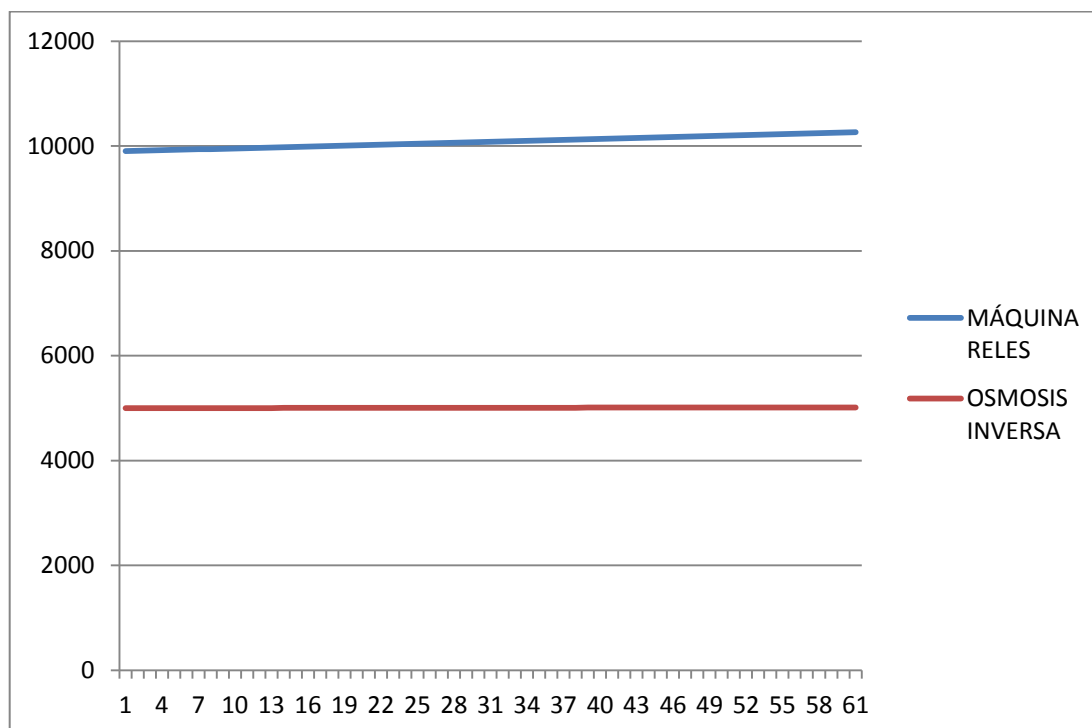

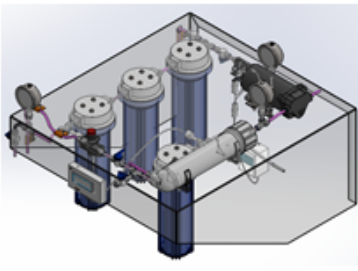


Figura 5. 2. Costos fijos y variables de destilación y ósmosis inversa

En la siguiente tabla se realiza el análisis técnico económico de ambas máquinas.

**Tabla 5. 6.** Comparación técnico económica

Leyenda de puntajes	Máquina de destilación simple RELES	Máquina de ósmosis inversa PUCP
		
1: Costoso / Insuficiente 2: Económico / Suficiente 3: Barato / Optimo		
Capacidad producción	40GPD	60GPD
Marca	RELES	PUCP
Costo de adquisición	S/. 9,900	S/. 6,500
Rechazo de sales	100%	99.99%
<b>Comparación técnico económica</b>		
Costo de adquisición	1	2
Costos de operación	1	2
Recuperación de agua	1	3
Eficiencia energética	1	3
Calidad biológica	3	3
Calidad química (Rechazo)	3	3
Control de calidad	3	3
<b>Calificación</b>	<b>13</b>	<b>19</b>



### 5.7. Comparación técnico económica de máquinas de ósmosis inversa

El costo de operación calculado para la máquina de ósmosis inversa diseñada es cercano a los valores reportados por los fabricantes de equipos de ósmosis domiciliarios. En la siguiente fotografía se muestran los valores de costos por litro anunciados dentro de SODIMAC para una máquina similar.

Tipo de Agua	Volumen de consumo	S/. / Litro
Agua comercial en bidones	Bidón 20 lt.	S/. 1.2 (precio referencial)
Agua comercial en botellas	Botella 1 lt.	S/. 2.4 (precio referencial)
Agua doméstica purificada	consumo de 5 a 10 litros / día.	S/. 0.09 a S/. 0.18

El Agua Purificada por Osmosis Inversa, permite obtener agua libre de sodio (menor que 20 ppm según agua de alimentación).



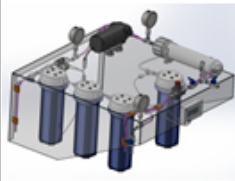
**Ahorro de 70% aprox.**

**IMPORTANTE:** Equipo para uso domiciliario con agua potable

**Figura 5. 3.** Costo de agua purificada de los equipos de ósmosis inversa domésticos

Sin embargo, estas máquinas no combinan la ósmosis inversa con deionización por lo cual, la reducción de sólidos totales disueltos será menor. Además no cuentan con instrumentación para controlar la calidad del agua y nivel de saturación de los filtros. Con la anterior información podemos realizar un análisis técnico económico comparando la máquina de ósmosis inversa diseñada con las máquinas de ósmosis inversas de uso doméstico comercializadas en Perú y con opciones importadas del extranjero.

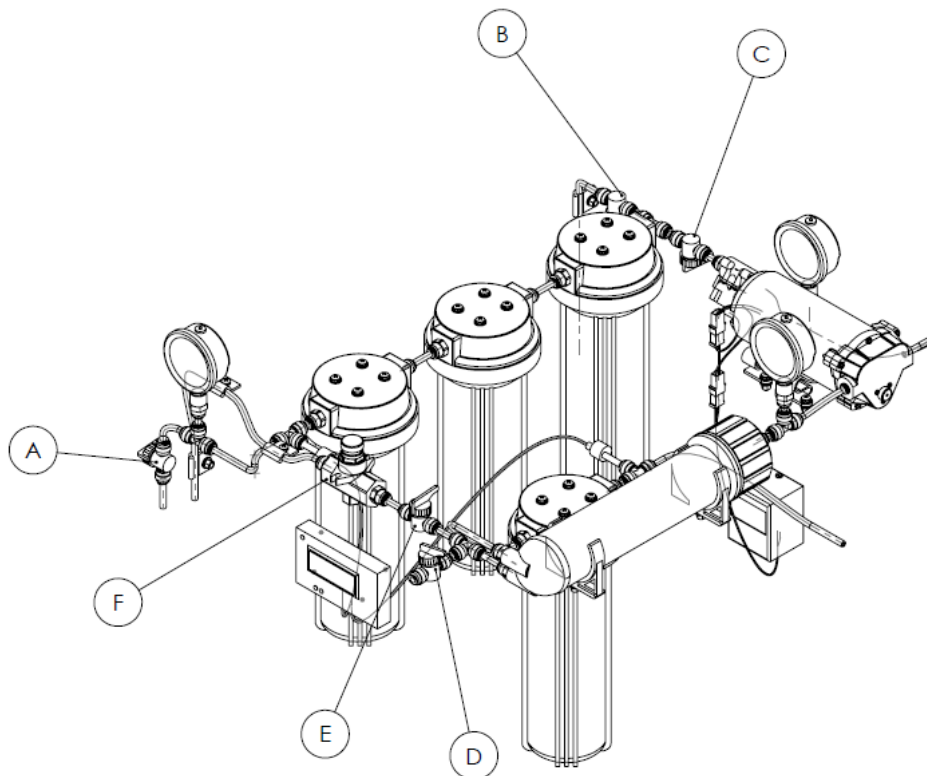
**Tabla 5. 7.** Análisis técnico económico de las máquinas de ósmosis inversa

Leyenda de puntajes	Máquina de ósmosis inversa local	Máquina de ósmosis inversa importada	Máquina de ósmosis inversa y DI PUCP
1: Costoso / Insuficiente 2: Económico / Suficiente 3: Barato / Óptimo			
Capacidad producción	100GPD	100GPD	100 GPD
Marca	WaterPro MIN 100 6 etapas	iSpring RCC7	PUCP
Costo de adquisición	S/1290	S/2500	S/6500
Rechazo de sales	95%	95%	99.99%
<b>Comparación técnico económica</b>			
Costo de adquisición	3	3	2
Costos de operación	3	3	2
Recuperación de agua	2	2	3
Eficiencia energética	2	2	3
Calidad biológica	3	3	3
Calidad química (Rechazo)	1	1	3
Control de calidad	1	1	3
Calificación	15	15	19

## CAPÍTULO 6

### INSTRUCCIONES DE USO Y MANTENIMIENTO

En adelante considerar la siguiente nomenclatura de las válvulas de acuerdo a los planos presentados en el capítulo 4.



**Figura 6. 1.** Nomenclatura de válvulas<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Ver Plano RO-DES03-A3

### 6.1. Secuencia de primer arranque

Antes de realizar el primer arranque es necesario enjuagar el sistema de pre-tratamiento y las tuberías previas a la membrana de alta presión. El motivo es remover cualquier material químico perjudicial e impurezas que puedan estar presentes en los elementos filtrantes de fábrica o debido al proceso de ensamblaje. También evitamos cualquier variación en el pH debido a los nuevos elementos de filtrantes de carbón activado como se expuso en el primer capítulo.

Esto se realizará colocando las válvulas en las siguientes posiciones, sin encender la bomba de alta presión:

**Tabla 6. 1.** Posición de las válvulas durante el proceso de enjuague del pre-tratamiento

<b>VALVULA</b>	<b>ENJUAGUE DE PRE-TRATAMIENTO</b>
BOMBA	APAGADA
A	ABIERTA
B	ABIERTA
C	CERRADA
D	-
E	-
F	-

La posición de las válvulas posteriores a C es indistinta, pues el agua no fluirá después de dicha válvula. El agua resultante de esta operación, que saldrá por la válvula B, debe ser desechada.

Este proceso se debe repetir siempre que se cambie alguno de los elementos filtrantes.

Después de enjuagar el área de pre tratamiento, hay que modificar la posición de las válvulas para que el agua pase a través de la membrana, y purgar el aire que haya dentro de ella.

**Tabla 6. 2.** Posición de las válvulas durante el enjuague y purga de la membrana de ósmosis inversa

<b>VÁLVULA</b>	<b>PURGADO DE MEMBRANA</b>
BOMBA	ENCENDIDA
A	ABIERTA
B	CERRADA
C	ABIERTA
D	ABIERTA
E	CERRADA
F	-

El agua resultante de esta operación debe ser desechada.

Durante la operación de enjuague y purgado, revisar todas las tuberías, conexiones y válvulas para encontrar fugas. Ajustar las juntas donde sea necesario.

Después de que el sistema ha sido enjuagado al menos por 30 minutos, cerrar la válvula principal de alimentación A.

Toda el agua resultante de las operaciones anteriores debe ser desechada.

Apagar la bomba y colocar las válvulas en la siguiente posición. La válvula F de estrangulamiento debe estar 100% abierta en un inicio.

**Tabla 6. 3.** Posición de las válvulas para primer arranque

<b>VALVULA</b>	<b>PURGADO DE MEMBRANA</b>
BOMBA	ENCENDIDA
A	ABIERTA
B	CERRADA
C	ABIERTA
D	CERRADA
E	ABIERTA
F	100% ABIERTA

Cerrar la válvula de estrangulamiento F lentamente, elevando la presión de alimentación de la membrana hasta 80 psi, en incrementos como máximo 10 psi por segundo. Si la presión se eleva demasiado rápido, puede originar fracturas o rajaduras en la carcasa de la membrana de ósmosis inversa. El primer tanque de 12 galones

producido de esta manera deberá ser desechado y no debe ser usado como agua potable, ni para preparar alimentos.

Después que haber producido un segundo tanque de agua purificada, analizar los parámetros de operación y la calidad del agua producida.

- Flujo de permeado
- Flujo de rechazo
- pH del agua de permeado y rechazo
- Sólidos disueltos (TDS) del agua de permeado y rechazo

Si estos valores están dentro de lo esperado se puede comenzar a utilizar la máquina.

## 6.2. Operación de la máquina

Esta máquina tiene la opción de producir agua potable, agua ultra pura mediante ósmosis inversa y una opción para limpiar la membrana de ósmosis inversa para prolongar su vida útil.

Para cambiar entre las distintas funciones, la bomba de alta presión debe estar apagada y la válvula principal A, debe estar completamente cerrada. Luego, según la función que se necesite, se colocan las válvulas en las siguientes posiciones y después se enciende la bomba de ser necesario.

**Tabla 6. 4.** Posición de las válvulas según la función que debe desempeñar la máquina.

VÁLVULA	ÓSMOSIS INVERSA	LIMPIEZA DE MEMBRANA OI	AGUA POTABLE
BOMBA	ENCENDIDA	ENCENDIDA	APAGADA
A	ABIERTA	ABIERTA	ABIERTA
B	CERRADA	CERRADA	ABIERTA
C	ABIERTA	ABIERTA	CERRADA
D	CERRADA	ABIERTA	-
E	ABIERTA	CERRADA	-
F	PARCIALMENTE CERRADA	-	-

Para producir agua por ósmosis inversa, se debe cerrar la válvula de estrangulación hasta que la presión marcada por el manómetro del rechazo sea de 100 psi, en incrementos como máximo 10 psi por segundo.

### **6.3. Cambio del cartucho de filtro de sedimentos**

De acuerdo a las instrucciones del fabricante, los filtros de carbón activado se cambiarán cada 6 meses o según inspección cuando esté saturado de suciedad.

### **6.4. Cambio de los filtros de carbón activado**

De acuerdo a las instrucciones del fabricante, los filtros de carbón activado se cambiarán cada 8 a 12 meses (monitorear calidad del agua).

### **6.5. Cambio de la membrana semipermeable**

De acuerdo a las instrucciones del fabricante, la membrana de ósmosis inversa se cambiará cada 18 a 24 meses (monitorear calidad del agua).



## CONCLUSIONES

- En este trabajo se logró diseñar una máquina de purificación de agua que permitirá ahorrar muchísima energía eléctrica y reducirá el desperdicio de agua potable al mínimo en comparación de la máquina de destilación simple usada actualmente en el laboratorio.
- El proceso de ósmosis inversa es energéticamente mucho más eficiente que la destilación, el consumo de energía eléctrica en soles por litro de agua ultra pura producida se reducirá un 99.99% (de aproximadamente 0.212 a 0.00016 soles por litro) en comparación de una máquina de destilación simple.
- Esta máquina de ósmosis inversa aumentará la conversión de agua potable de la red a agua ultra pura a un 50%. Es decir se desperdiciará mucho menos agua potable en comparación del proceso de destilación simple, que tenía una eficiencia de uso del agua potable de menos del 1%, convirtiendo la ósmosis inversa en el proceso más ecológico de los dos.
- Incluso considerando costos de piezas consumibles como elementos filtrantes y cambio de resinas deionizadoras, el costo por litro de agua ultra pura producida de la ósmosis es apenas un 3% del proceso de destilación.
- Todos los componentes consumibles se pueden comprar en el mercado local.
- El mantenimiento es sencillo y puede ser realizado por los técnicos del taller.
- El costo de adquisición inicial de la máquina de ósmosis inversa diseñada es 35% menor al de la máquina de destilación simple del laboratorio.
- En el mercado local e internacional, se fabrican equipos de similar capacidad al diseñado en esta tesis e incluso a menor precio, sin embargo, la calidad del agua producida es menor y no utilizan la energía y el agua con la misma eficiencia, tampoco cuentan con los sensores de presión y pureza que permiten tener un control preciso de la calidad del agua producida.
- La opción de configurar la máquina para que el agua pase por los filtros de sedimentos y carbón activado para producir agua purificada para consumo humano es una adición muy útil ya que permite proporcionar agua purificada de sedimentos, bacterias, etc., al personal del laboratorio.



## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Una vez construida la máquina debe monitorearse la calidad del agua producida y analizar su composición (sólidos totales disueltos, temperatura, pH, dureza, etc.) para determinar si cumple con las condiciones necesarias para poder ser utilizada en la mezcla de agua y aceite refrigerante para máquinas herramientas.
- El agua de permeado producida por ósmosis inversa y deionización no debe ser usada como agua potable, ni para preparar alimentos, ni para consumo humano alguno.
- El agua de rechazo no puede ser utilizada para consumo humano en primera instancia, pero sí puede ser usada para limpieza, riego y desagüe.
- Se deben utilizar los sensores de presión instalados para monitorear la presión de alimentación de la red, la caída de presión en los filtros, la presión suministrada por la bomba y la presión de alimentación de la membrana. La presión de alimentación de la membrana es el factor más importante para garantizar un caudal constante de agua ultra pura.
- Una baja presión de alimentación de la red de agua potable puede reducir la cantidad de agua producida por la máquina. Si la presión de la red es muy baja, es mejor esperar a que se regularice, para que la bomba de diafragma no se esfuerce demasiado y evitar escenarios donde la bomba trabaje en vacío.
- Una caída de presión significativa en cualquiera de los filtros puede indicar una saturación y bloqueo de los elementos filtrantes, cuando la caída de presión afecta la producción y/o calidad del agua ultra pura de permeado, se debe inspeccionar el elemento y cambiarlo de ser necesario.
- Una inspección visual regular del filtro de sedimentos también es necesaria, para verificar su estado y poder prevenir estado de saturación debido algún evento que sature el agua.
- La resina deionizadora también debe ser monitoreada, la resina aniónica cambiará de color a un azul oscuro cuando su capacidad de intercambio iónico se agote, aproximadamente después de tratar 1000 litros de agua.
- La bomba de desplazamiento de diafragma cuenta con un mecanismo de seguridad para evitar sobre presiones, sin embargo, para evitar posibles daños en la bomba y la máquina por golpe de ariete, nunca se debe operar la máquina con la descarga completamente cerrada.

### Bibliografía

1. **Blanpain, Eduardo.** *Teoría y práctica de las herramientas de corte.* Sexta. Barcelona : Gustavo Gili, 1962.
2. **Mundi Crespo, Eloy.** *Los lubricantes y sus aplicaciones.* Madrid : Interciencia, 1972.
3. **Schey, John A.** *Tribology in metalworking: Friction, lubrication and wear.* Metals Park, Ohio : American Society for Metals, 1984.
4. **Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental.** *Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA.* Lima : Ministerio de Salud, 2011.
5. **Neale, Michael J.** *The tribology handbook.* Segunda. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1997.
6. **Traubomatic Industria e Comercio Ltda.** *TND 160. Maintenance Instructions.* Sao Paulo : Traubomatic Industria e Comercio Ltda, 1994.
7. **Tchobanoglous, G., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Metcalf & Eddy, Inc.** *Process Analysis for Reverse Osmosis. Wastewater engineering : treatment and resource recovery.* 5ta. New York : McGraw-Hill Education, 2014.
8. *Tratamiento del agua para hemodiálisis.* **Pérez García, Rafael y Rodríguez Benítez, Patrocinio.** 1, Madrid : Grupo Editorial Nefrología de la Sociedad Española de Nefrología, 2012, Vol. 7.
9. **Foundation, American Water Works Association Research; Eaux, Lyonnaise des; Africa, Water Research Commission of South; Mallevalle, Joël; Odendaal, Peter E.; Wiesner, Mark R.** *Tratamiento del agua por procesos de membrana : principios, procesos y aplicaciones.* Madrid : McGraw-Hill, 1998.
10. **Chang, Raymond.** *Química.* 7ma. México : McGraw-Hill, 2002.
11. **Moreno-Castilla, C.** *Materiales carbonosos para el tratamiento de aguas contaminadas. Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua.* Sevilla : Universidad Nacional de Andalucía, 2010.
12. **Lenntech BV.** *Ion Exchange for Dummies.* [En línea] Rohm and Haas, Septiembre de 2008. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Ion-Exchange-for-Dummies-RH.pdf>.
13. **Tchobanoglous, G., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Metcalf & Eddy, Inc.** *Ion Exchange. Wastewater engineering: treatment and resource recover.* New York : McGraw-Hill Education, 2014.
14. **Sulzer Brothers.** *Centrifugal pump handbook.* 2da. Winterthur : s.n., 1986.

15. **Kemmer, Frank N.** *Manual del agua : su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.* México : McGraw-Hill, 1994. 9684225156.
16. **Assureira Espinoza, Estela de la Gracia.** *Teoría de las bombas centrífugas.* Lima : PUCP, 1988.
17. **Guirguis Mageed, Jean.** University of South Florida. Graduate Theses and Dissertations. *Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric.* [En línea] 2011. [Citado el: 20 de 02 de 2017.] <http://scholarcommons.usf.edu/etd/3135>.
18. **Neira Gutierrez, M.** El fenómeno osmótico y la tecnología de membranas. *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua.* Sevilla : Universidad Nacional de Andalucía, 2006.
19. **Lenntech BV.** Deionized/Demineralized Water. *Distilled, deionized and demineralized water and measuring of the purity.* [En línea] <https://www.lenntech.com/applications/process/demineralised/deionised-demineralised-water.htm>.
20. **M., González Olabarría. P.** *Desalación de agua mediante ósmosis inversa: ingeniería constructiva.* Madrid : A. Madrid Vicente, 2012.
21. **Hicks, Tyler G.** *Bombas: su selección y aplicación.* México : CECSA, 1980.
22. **Vergara Yayón, Francisco.** *Tratamiento de aguas industriales.* Lima : Kavi, 1984.
23. **Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa ; grupo editorial, Joël Mallevalle, Peter E. Odendaal, Mark R. Wiesner.** *Tratamiento del agua por procesos de membrana; principios, procesos y aplicaciones.* Madrid : McGraw-Hill, 1998.
24. **Pontificia Universidad Católica del Perú.** *Dibujo Mecánico 1.* Lima : PUCP, 2000.
25. **Tchobanoglous, G., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Metcalf & Eddy, Inc.** *Distillation. Wastewater engineering: treatment and resource recover.* New York : McGraw-Hill Education, 2014.
26. **SEDAPAL S.A.** ESTRUCTURA TARIFARIA VIGENTE. [En línea] 09 de 12 de 2018. [Citado el: 16 de 02 de 2019.] [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=86ce5ddf-32fb-4bf5-90f4-e864e3b2110a&groupId=29544](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=86ce5ddf-32fb-4bf5-90f4-e864e3b2110a&groupId=29544).
27. **ENEL DISTRIBUCIÓN PERÚ S.A.A.** TARIFA PARA LA VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. [En línea] 31 de 10 de 2018. [Citado el: 16 de 02 de 2019.]

<https://www.enel.pe/content/dam/enel-pe/empresas/archivos/pliego-tarifario---distribucion/Pliego%20Tarifario%2001%20de%20noviembre%202018.pdf>.

