

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA Y AMBIENTAL



“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PLANTA DE OSMOSIS INVERSA DE  
CONFIGURACIONES FLEXIBLES CON MONITOREO EN LÍNEA DE  
VARIABLES DE OPERACIÓN”

**DIEGO IGNACIO RICARDO CORREA HERNÁNDEZ**

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**PROFESOR GUÍA**

CLAUDIO ACUÑA PÉREZ

**PROFESOR CORREFERENTE**

FERNANDO ESPERGUES ZUÑIGA

Junio 2024

Valparaíso – Chile



## RESUMEN

La presente memoria se centra en la problemática de la vida útil de las membranas de ósmosis inversa (OI) y la necesidad de sistemas de monitoreo en el contexto industrial chileno. Según datos de Cochilco, en la minería, el uso de agua de mar directa y/o desalada, fue de 8.600 [L/s] en 2022, con proyecciones de duplicar esta cifra para el año 2032. A pesar de seis décadas de avances tecnológicos en la OI, la industria ve limitada la vida útil de las membranas a periodos considerablemente inferiores a los estándares, con registros locales que indican duraciones de tan solo 3 a 18 meses frente a los 3 a 10 años esperados. Esta disminución se atribuye principalmente a deficiencias en el pretratamiento y la ausencia de sistemas de monitoreo que permitan una predicción de la saturación de las membranas.

En respuesta a esta situación, se ha diseñado una celda de conductividad multipunto, para medir las conductividades de: permeado, rechazo y alimentación. A su vez, se integran otros sensores para la razón de productividad, la caída de presión, paso de sal y flujo de permeado. Este sistema de control es abierto, usando equipos Groov de OPTO 22 y beneficia la prolongación de la vida útil de las membranas.

Los resultados en la planta piloto modular de OI son: capacidad de 570 [L/h], cuatro elementos de membrana configurable, conductividad de alimentación 3.800 [ $\mu$ S/cm] y de permeado 33 [ $\mu$ S/cm]. Se requieren líneas moduladas con válvulas, permitiendo ajustar la recuperación, calidad de agua y el control de conductividad.

La evaluación técnica y económica realizada en la planta de Antofagasta ha demostrado un retorno económico favorable, con una extensión de la vida útil de las membranas desde 12 hasta 13 meses, un Índice de Valor Actual Neto (IVAN) de 72, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 751 [%].

En conclusión, el sistema de control abierto y el desarrollo del sensor de conductividad multipunto se definen técnicamente viables para mejorar las operaciones de desalinización por ósmosis inversa. La viabilidad económica de la tecnología para su aplicación a escala industrial es un factor relevante para iniciar la aplicación piloto.

# ÍNDICE

RESUMEN	3
INDICE	4
Índice de figura	6
Índice de tablas	8
Índice de ecuaciones	9
MONITORIZACIÓN DE PLANTAS DE OSMOSIS INVERSA Y VIDA ÚTIL DE MEMBRANAS	12
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
RESUMEN DE CAPÍTULOS	16
1. DISEÑO DE SENSOR DE CONDUCTIVIDAD EN LÍNEA	17
1.1 Conceptualización de la propuesta	18
1.2 Especificación de requerimientos	19
1.3 Diseño de la celda de conductividad	21
1.4 Procedimiento experimental	23
1.5 Selección de instrumentos complementarios	24
1.6 Integración en planta	26
2. SISTEMA DE MONITOREO USANDO EQUIPOS GROOV DE OPTO 22	28
2.1 Análisis de requerimientos y especificaciones	31
2.2 Sensores y actuadores del sistema de monitoreo	37
2.3 Descripción del sistema de monitoreo	40
3. SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA PILOTO DE OSMOSIS INVERSA	44
3.1 Diseño de la planta	45
3.1.1 Requerimientos y criterios de diseño	45
3.1.2 Arreglo de membranas y configuración del tratamiento	46
3.1.3 Proceso de pretratamiento	47
3.1.4 Especificación de equipos y componentes	48
3.2 Diseño de proceso y layout operacional	54
3.2.1 Diseño de proceso (P&ID)	54
3.2.2 Apertura de válvulas	56
3.2.3 Lavado de membranas	57
3.2.4 Montaje de planta piloto	58
3.3 Sistema de monitoreo parámetros operacionales	59
4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA INDUSTRIAL	63

4.1 Costos de inversión incumbentes	67
4.1.1 Adquisición de instrumentos y válvulas	68
4.1.2 Instalación y puesta en marcha	69
4.1.3 Capacitación y computadores	70
4.1.4 Equipos e instalación de lavado	71
4.2 Costos operativos incumbentes	72
4.2.1 Mantenimiento, consumibles y repuestos	72
4.2.2 Energía e internet	73
4.2.3 Operación de lavado	74
4.2.4 Costos de personal	75
4.2.5 Costos de pérdida de producción	76
4.3 Ingresos incumbentes	77
4.4 Análisis de flujo de caja	78
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS	82
ANEXOS	84
A1 – Aproximación de número de membranas en Chile	84
A2 – Fórmulas para diseño de celda de conductividad	85
A3 – Complementos para celda de conductividad	89
A4 – Selección de sensores de monitoreo	90
A5 – Indicadores de limpieza química	92
A6 – Configuración de membranas con Hydranautics	95
A7 – Opciones de canales Groov	101
A8 – Capex y opex de planta piloto	103
A9 – Flujo de caja incumbentes planta industrial	107

## Índice de figuras

Figura 1 Proyección de uso de agua en la minería del cobre en Chile	12
Figura 2 Variaciones de pH por fallas operacionales	13
Figura 3 Cambios operacionales de presión de entrada por reemplazo de membranas	14
Figura 4 Las membranas usadas causan disminución de la pendiente de razón de productividad	14
Figura 5 Electrodo de conductividad tradicional	17
Figura 6 Esquema de una celda de conductividad con arreglo de 3 anillos	21
Figura 7 Conexión de celda de conductividad con el medio	23
Figura 8 Controlador Transmisor Conductividad C270	25
Figura 9 Relé de 2 contactos	25
Figura 10 Celda de conductividad en 1 etapa	26
Figura 11 Celda de conductividad en 2 etapas	27
Figura 12 Planta genérica de osmosis inversa	29
Figura 13 Control 1 por razón de productividad	31
Figura 14 Control 2 añade conductividad de rechazo	32
Figura 15 Control 3 añade caída de presión	33
Figura 16 Control 4 añade paso de sal y flujo de permeado	34
Figura 17 Transmisor de presión	37
Figura 18 Medidor de temperatura PT100	37
Figura 19 Flujómetro ultrasónico	38
Figura 20 Groov RIO	38
Figura 21 Groov EPIC Controlador industrial programable	39
Figura 22 Limpieza química de membranas	40
Figura 23 Membranas ensuciadas severamente	40
Figura 24 Contaminantes adheridos a la membrana	41
Figura 25 Porta membrana elemento	48
Figura 26 Membrana TW30-4021	48
Figura 27 Porta filtro	49
Figura 28 Filtro de sedimentación	49
Figura 29 Bombas de pretratamiento y osmosis inversa	50
Figura 30 Curvas de bomba de pretratamiento	51
Figura 31 Curvas de bomba de osmosis	51
Figura 32 Presostatos de pretratamiento y alta presión	52
Figura 33 Variador de frecuencia	53
Figura 34 Layout de planta piloto de osmosis inversa	54
Figura 35 Montaje de la planta piloto en vista frontal	58
Figura 36 Montaje de la planta piloto en vista posterior	58
Figura 37 Planta piloto con sistema de monitoreo	59
Figura 38 Planta desaladora industrial	65
Figura 39 Flujo de caja incumbente de sistema de control	79
Figura 40 Proyección número de membranas según producción	84

Figura 41 Mayor distancia entre electrodos mejora constante	87
Figura 42 Constante de celda mejora en función del ancho y diámetro	88
Figura 43 Constante de celda mejora en función de razones de áreas	88
Figura 44 Versión original de celda de conductividad	89
Figura 45 Medidor de conductividad Hanna 8633	89
Figura 46 Sensibilización del Factor Beta	99
Figura 47 Concentración de alimentación en valores de entrada	99
Figura 48 Membrana seleccionada ESPA2-LD-4040	100
Figura 49 Operación dentro de límites de diseño	100
Figura 50 Canales del RIO	101
Figura 51 Groov OAC	102
Figura 52 Groov IMAI-8	102
Figura 53 Dimensiones en vista superior	103
Figura 54 Dimensiones en vista frontal y en vista lateral	103
Figura 55 Inversión en planta piloto	104
Figura 56 Flujo de caja incumbente control planta industrial	107

## Índice de tablas

Tabla 1 Conductividad eléctrica y constante de celda	18
Tabla 2 Prediseño de la celda de conductividad	20
Tabla 3 Celda de conductividad de constante 0.1 [cm <sup>-1</sup> ]	21
Tabla 4 Celda de conductividad de constante 10 [cm <sup>-1</sup> ]	22
Tabla 5 Celda de conductividad de constante 1 [cm <sup>-1</sup> ]	22
Tabla 6 Experimento para validar celda de conductividad de 0.1 [cm <sup>-1</sup> ]	23
Tabla 7 Instrumentos para el controlador de conductividad	24
Tabla 8 Parámetros de control de limpieza	30
Tabla 9 Canales usados en el RIO en el control 1	35
Tabla 10 Canales usados en el RIO en el control 2	35
Tabla 11 Canales usados en el RIO en el control 3	35
Tabla 12 Canales usados en el RIO en el control 4	36
Tabla 13 Límites por membrana TW30-4021	45
Tabla 14 Apertura de válvulas en planta piloto	56
Tabla 15 Apertura de válvulas para conductividad en planta piloto	56
Tabla 16 Rangos operacionales en la planta piloto	59
Tabla 17 Canales usados en RIO para control de planta piloto	61
Tabla 18 Canales usados en RIO e IMAI-8 para planta industrial	66
Tabla 19 Adquisición de instrumentos planta industrial	68
Tabla 20 Costo de instalación del sistema de control	69
Tabla 21 Costo de capacitación y computadores	70
Tabla 22 Equipos e instalación de lavado	71
Tabla 23 Costo de mantenimiento y repuestos	72
Tabla 24 Consumo de energía de instrumentos	73
Tabla 25 Costo anual por lavado de planta industrial	74
Tabla 26 Costo de personal para sistema de control	75
Tabla 27 Costo de pérdida de producción	76
Tabla 28 Fórmulas de diseño del sensor de conductividad	86
Tabla 29 Sensores para control operacional en estudios	90

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Ancho de electrodo	19
Ecuación 2 Razón de áreas de celda	19
Ecuación 3 Área de celda	19
Ecuación 4 Distancia de separación entre electrodos	20
Ecuación 5 Hipoclorito de Sodio	42
Ecuación 6 Bisulfito de Sodio	42
Ecuación 7 Cloruro Férrico	42
Ecuación 8 Ácido y Carbonato	42
Ecuación 9 Ácido y Bicarbonato	42
Ecuación 10 Ingreso incumbente por membranas	77
Ecuación 11 Regresión número de membranas según producción de permeado	84
Ecuación 12 Conductancia función de resistencia	85
Ecuación 13 Conductancia función de constante	85
Ecuación 14 Flujo de permeado normalizado	92
Ecuación 15 Factor de corrección por temperatura	92
Ecuación 16 Presión osmótica	92
Ecuación 17 Concentración de mezcla alimentación-rechazo	93
Ecuación 18 Disminución de permeado	93
Ecuación 19 Salinidad de permeado normalizado	93
Ecuación 20 Incremento de salinidad	93
Ecuación 21 Caída de presión inicial	94
Ecuación 22 Caída de presión	94
Ecuación 23 Aumento de caída de presión	94
Ecuación 24 Potencia bomba de osmosis	104
Ecuación 25 Consumo eléctrico bomba de osmosis	105
Ecuación 26 Costo de capital	105
Ecuación 27 Costo de energía	105
Ecuación 28 Costo de membranas	105
Ecuación 29 Costo de mantenimiento	105

## Abreviaciones

**OI:** sistemas de osmosis inversa.

**TDS:** concentración de los sólidos totales disueltos en una solución (*Total Dissolved Solids*).

**SDI:** el índice de densidad de sedimentos permite establecer la cantidad de elementos sólidos suspendidos y coloidales que podrían generar ensuciamiento en la membrana (*Silt Density Index*).

**LSI:** el índice de saturación de Langelier es un método utilizado para cuantificar la tendencia del agua a la incrustación o a la corrosión (*Langelier Saturation Index*).

## Glosario

**Permeado:** corriente efluente que se genera a partir de la solución que traspasa una membrana, generalmente denominada producto.

**Rechazo:** corriente efluente que contiene los componentes que no atraviesan la membrana, generalmente denominada como concentrado, residuo o salmuera. Y el porcentaje de rechazo de una especie afluente corresponde a la concentración de una especie en la corriente de rechazo sobre la concentración de la misma especie en la corriente de alimentación.

**Recuperación:** describe el porcentaje de volumen de agua afluente que es recuperado como permeado. En otras palabras, es la fracción de flujo permeado sobre el flujo de alimentación, por lo general representado en forma porcentual.

**Flujo de membrana:** caudal volumétrico de un fluido que pasa a través de un área determinada. Por lo general, en sistemas de OI, el flujo es expresado en galones de agua por pie cuadrado de superficie de membrana por día (gfd).

**Polarización de la concentración:** la fenomenología lo describe a partir de la difusión y convección que tiene la solución con especies sobre la capa límite de la membrana.

**Factor Beta:** corresponde a un término para cuantificar la polarización de la concentración, su valor corresponde a la relación entre la concentración de una especie en la superficie de la membrana y la concentración en la solución desarrollada. El factor Beta muestra qué tan rápido la corriente afluente es deshidratada a través del sistema de RO.

**Ensuciamiento:** resultado de la deposición de sólidos suspendidos, orgánicos o microbios en la superficie de la membrana.

**Incrustación:** resultado de la precipitación de sales saturadas sobre la superficie de la membrana.

**Contenedor o recipiente a presión:** contenedor de 1 a 8 membranas a presión.

**Arreglo:** término utilizado para describir la configuración de un sistema de osmosis inversa. También conocidos como trenes de OI, consiste en una serie de recipientes a presión dispuestos en patrones específicos.

**Arreglo en etapas:** configuración de un arreglo en donde el flujo de rechazo es utilizado para alimentar a otro conjunto de membranas.

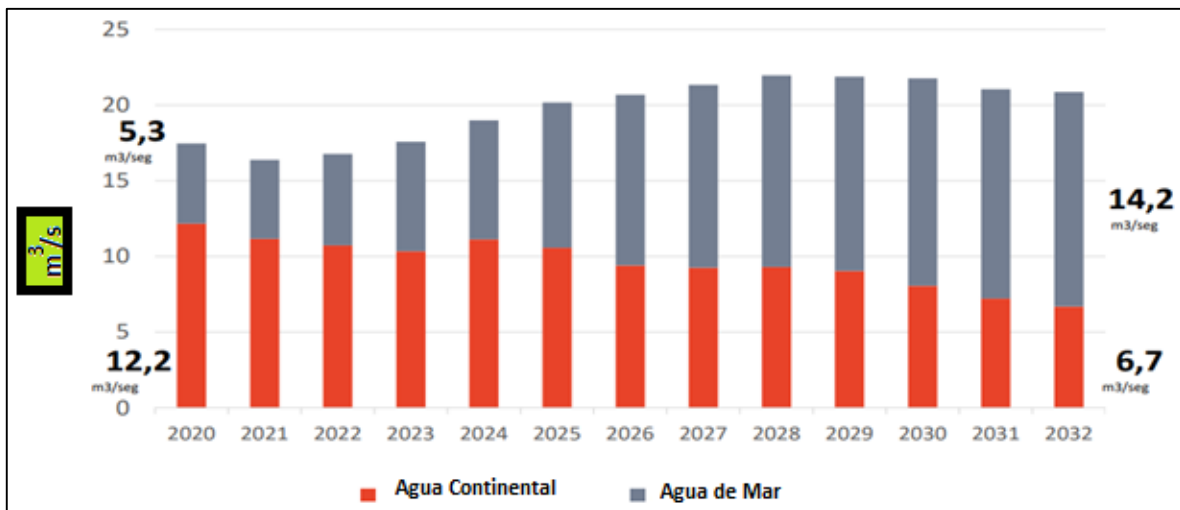
**Arreglo en pasos:** configuración de un arreglo en donde el flujo de permeado es utilizado para alimentar a otro conjunto de membranas. Por lo general se describe a estas configuraciones como un proceso de doble paso.

## MONITORIZACIÓN DE PLANTAS DE OSMOSIS INVERSA Y VIDA ÚTIL DE MEMBRANAS

El uso del agua de mar, entre directa y desalada por ósmosis inversa, alcanzó 5.300 [L/s] usados por la minería del cobre en Chile el año 2020. Pero la proyección de uso supera los 14.000 [L/s] hacia el año 2032 (**Figura 1**). Y la capacidad de desalación en plantas se ubicará sobre 10.000 [L/s] hacia el año 2026. Sin embargo, esta tecnología, a pesar de seis décadas de desarrollo, enfrenta desafíos en la vida útil de las membranas que dependen de sistemas de monitoreo y prácticas operacionales de mantenimiento.

**Figura 1**

*Proyección de uso de agua en la minería del cobre en Chile*



*Nota.* Reproducido de Desalinización en la industria minera en Chile, por Global Water Summit, 2022.

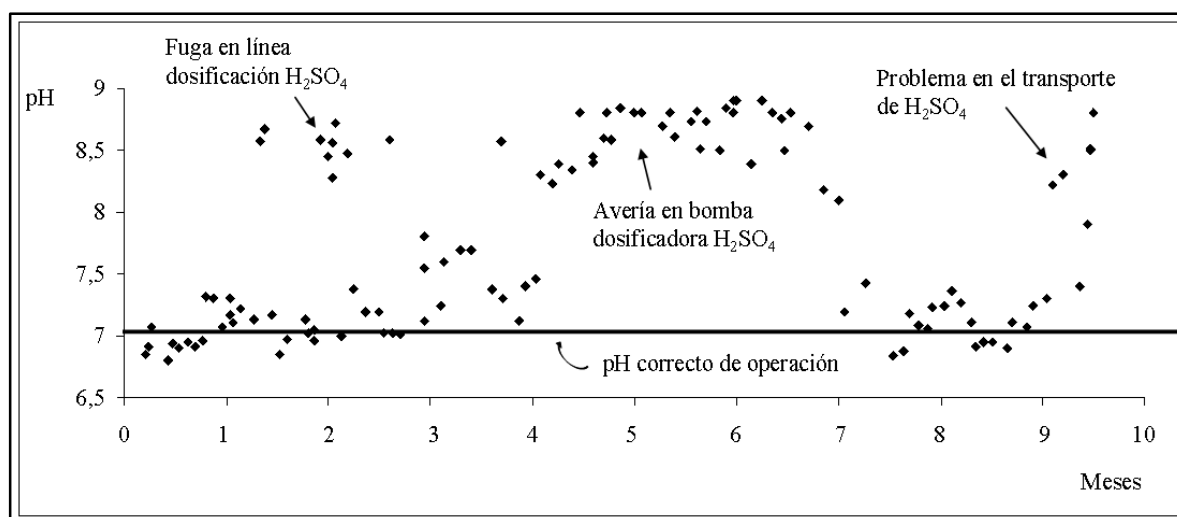
De acuerdo con Nazif (2020), las membranas son diseñadas para un uso operativo de 3 años a una tasa de 12 horas diarias, lo que equivale a 13.140 horas de servicio antes de requerir reemplazo. Sin embargo, el mismo autor indica fallo prematuro desde 5.800 horas, atribuible a un mantenimiento ineficiente y la ausencia de sistemas de monitoreo en línea que permita corregir la incrustación y ensuciamiento de las membranas.

Entonces, el funcionamiento de 30.000 membranas de ósmosis inversa de 8 pulgadas en Chile en el año 2020 (**Anexo 1**), es de interés para extender la vida útil de éstas a través de implementar un sistema de monitoreo de ensuciamiento de las membranas y corregir el mantenimiento a través del lavado químico.

El reemplazo de membranas en sistemas de ósmosis inversa se ve acelerado por la formación de incrustaciones y ensuciamiento, que se adhieren a la superficie de la membrana. Las precipitaciones se aceleran cuando el control de pH se desajusta por fallas del control, como se evidencia con datos de pH de una planta industrial en la **Figura 2**.

**Figura 2**

*Variaciones de pH por fallas operacionales*



*Nota.* Reproducido de Optimización operacional planta osmosis inversa Minera Radomiro Tomic, por Humire, 2009.

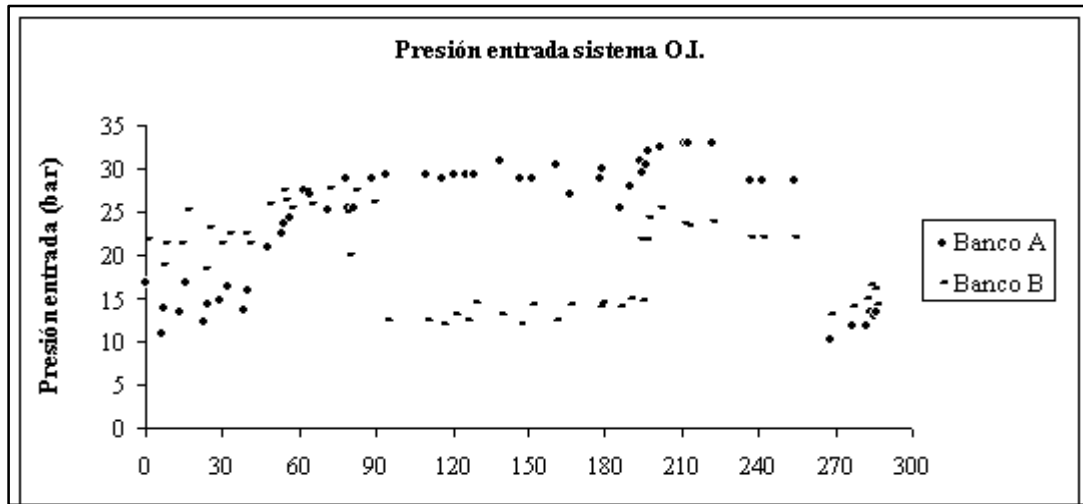
Asimismo, Trus (2022) indica que la capa de incrustación actúa como una barrera adicional al flujo de agua, provocando disminución del caudal de permeado e incremento de la caída de presión transmembrana, elevando la presión de alimentación para mantener la recuperación. Un incremento de la presión de alimentación se ilustra en la **Figura 3**.

El ensuciamiento de membranas afecta directamente al flujo de permeado referenciado a la conductividad de permeado, como se ilustra en la **Figura 4**, mostrando que aumentar la presión de alimentación no logra repuntar la razón de productividad ( $R_p$ ).

En respuesta a los desafíos, se diseñó un sensor de conductividad multipunto, para mediciones en línea en varios puntos de conductividad, buscando proporcionar datos a lo largo de la alimentación, el permeado y el concentrado. Este instrumento se integra al sistema de control abierto, facilitando así la toma de decisiones en el lavado de membranas.

**Figura 3**

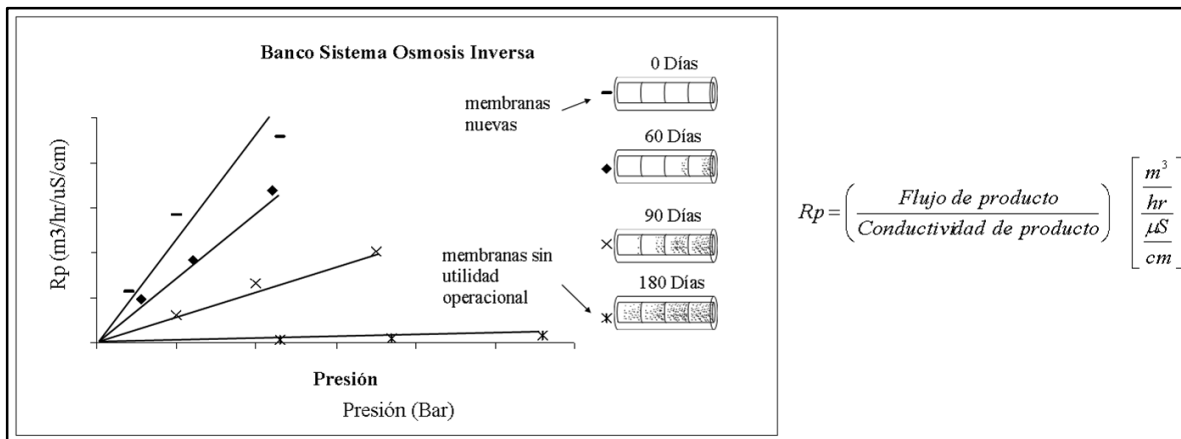
*Cambios operacionales de presión de entrada debido al reemplazo de membranas*



*Nota.* Reproducido de Optimización operacional planta osmosis inversa Minera Radomiro Tomic, por Humire, 2009.

**Figura 4**

*Las membranas usadas causan disminución de la pendiente de razón de productividad*



*Nota.* Reproducido de Optimización operacional planta osmosis inversa Minera Radomiro Tomic, por Humire, 2009.

Para validar el sistema de control, se diseña una planta piloto de ósmosis inversa, con: capacidad de producción de 570 [L/h], cuatro membranas, alimentación de 3.800 [μS/cm], permeado de 33 [μS/cm] y rechazo de 5400 [μS/cm].

## **OBJETIVO GENERAL**

En este contexto se propuso:

Proponer control abierto para planta de ósmosis inversa basada en configuraciones flexibles con monitoreo de conductividades y presiones, evaluando en línea el lavado de membranas con diseño de sensor de conductividad.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Con los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar sensor multipunto de conductividades con anillos para monitorear en línea la concentración de iones.
2. Proponer diseño de sistema de control abierto para plantas de osmosis inversa, para predecir la saturación de membranas con sensor multipunto.
3. Diseñar planta piloto de osmosis inversa con configuraciones flexibles, para integrar sistema de monitoreo.
4. Evaluar técnica y económicamente la incorporación del sistema de control abierto a escala industrial, considerando el aumento de la vida útil de las membranas, indicando los tiempos de hacer lavado.

## **RESUMEN DE CAPÍTULOS**

### **1. DISEÑO DE SENSOR DE CONDUCTIVIDAD EN LÍNEA**

El sensor de conductividad se diseña para medir agua de permeado, agua de alimentación y agua de rechazo en fuentes salobres. El prototipo se debe validar en base a un método experimental. Se requieren instrumentos complementarios para el registro de datos en línea.

### **2. SISTEMA DE MONITOREO USANDO EQUIPOS GROOV DE OPTO 22**

La monitorización requiere definir el control abierto, para usar el sensor de conductividad diseñado anteriormente, y los parámetros de ensuciamiento de las membranas, que considera otros sensores y control por medio de equipos Groov. Se muestran opciones del sistema de limpieza química según parámetros de ensuciamiento de las membranas.

### **3. SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA PILOTO DE OSMOSIS INVERSA**

El proceso consiste en definir el arreglo de las membranas, evaluar la capacidad y la eficiencia de rechazo de sales, por medio de las ecuaciones de diseño y simulación con Hydranautics. Se definen equipos de bombeo y de pretratamiento. Además, se detallan los instrumentos y la ubicación de estos para el sistema de monitoreo.

### **4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA INDUSTRIAL**

Se muestra el caso de estudio de una planta industrial en Antofagasta para evaluar la rentabilidad del sistema de monitoreo de conductividad y caída de presión. Presentando un flujo de caja con la inversión, costos operacionales e ingresos.

## 1. DISEÑO DE SENSOR DE CONDUCTIVIDAD EN LÍNEA

El primer pilar es diseñar un sensor de conductividad multipunto, para reemplazar la forma tradicional de un electrodo (**Figura 5**), porque su problema es el alto costo por punto de medición, por ende, la conductividad no se mide en cada salida de permeado, dificultando analizar la suciedad de las membranas por cada bastidor.

Entonces, se presenta el diseño de una celda de conductividad multipunto por medio de un solo controlador.

**Figura 5**

*Electrodo de conductividad tradicional*

 <p><b>L0710063</b></p> <p><b>\$320.000 [CLP] c/iva</b></p> <p><b>\$460.000 [CLP] c/i.v.a. (noviembre 2023)</b></p>	<p><b>L0710063</b> Uso en agua salobre Rango 0 – 9.999 [<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>]</p> <p><b>L071008</b> Uso en agua de mar Rango 0 – 100.000 [<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>] Precisión <math>\pm 1</math> [%]</p> <p>Presión máxima 6 [bar]</p> <p>Precio no incluye el controlador de conductividad</p>
---	---

Nota. Adaptado de Conductímetro, por Veto y Compañía, 2023

## 1.1 Conceptualización de la propuesta

Tradicionalmente, el sensor de conductividad se instala, en un proceso de osmosis inversa, en las corrientes principales de alimentación y permeado. No obstante, la corriente de permeado es la suma de corrientes de cada bastidor, que tienen concentraciones de sales distinta, entre un 95 – 99 [%] menos de sales que la concentración de alimentación.

¿La conductividad del permeado, de cada bastidor, servirá para monitorear el estado de las membranas?

La conductividad eléctrica y constante de celda (Cortes, 1998) son la base para el diseño de una celda de conductividad multipunto.

**Tabla 1**

### *Conductividad eléctrica y constante de celda*

<b>Item</b>	<b>Conductividad eléctrica</b>	<b>Constante de celda</b>
Definición conceptual	Facilidad del medio acuoso para transportar un flujo eléctrico, es el recíproco de la resistividad, es una propiedad intensiva, depende de la temperatura y de la fuerza iónica de la solución	En una celda de conductividad es el cociente entre área y longitud, está definida como la superficie transversal al flujo de corriente y la distancia de separación entre electrodos
Definición operacional	Depende de la constante de celda para entregar un valor	Es un valor fijo en el medio

Se comienza el diseño geométrico de la celda (Tavera, 1996; Banisi, 1994).

## 1.2 Especificación de requerimientos

Los requerimientos de diseño para la celda son estos:

- 1) Materiales de la celda no conductores y anillos conductores.
- 2) Anillos internos integrados en la pared, como lo indica Tavera (1996): “la constante de celda es más estable en un arreglo de tres electrodos que uno de dos. Porque restringe el campo eléctrico”.
- 3) Ancho de electrodos, como lo indica Cortés (1998): “el ancho de cada anillo se constituye en un cuarto del diámetro de la celda” (**Ecuación 1**). Y lo indicado por Tavera (1996): “seguir la regla del cociente de áreas” (**Ecuación 2**).
- 4) Área interna de celda determinada por la **Ecuación 3**.

### Ecuación 1

*Ancho de electrodo*

$$\frac{D}{4} \cong W$$

D: Diámetro interno [cm]

W: Ancho de electrodo [cm]

### Ecuación 2

*Razón de áreas de celda*

$$\frac{A}{A_w} \cong 1$$

A: Área transversal de flujo [cm<sup>2</sup>]

Aw: Área interna de electrodo [cm<sup>2</sup>]

### Ecuación 3

*Área de celda*

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

- 5) Diferentes constantes de celda, las cuales son: 0.1, 1 y 10 [cm], implica encontrar la distancia de separación entre anillos, como lo indica la **Ecuación 4** para 3 anillos.

#### Ecuación 4

*Distancia de separación entre electrodos*

$$Cc \cong 2 \cdot \frac{A}{L + 2 \cdot W}$$

L: Largo interno entre dos electrodos

Cc: Constante de celda

6) Validar la constante de celda a través de un experimento (Cloete y cols., 2016).

Luego, el diseño se preestablece como en la **Tabla 2**.

**Tabla 2**

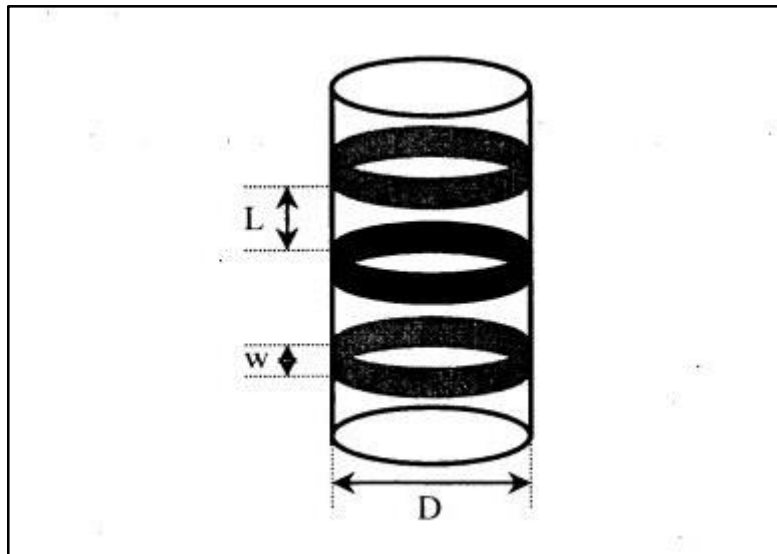
*Prediseño de la celda de conductividad*

Item	Selección
Materiales	Anillos de acero inoxidable y tubería de PVC de 40 [mm]
Tipo de electrodo	3 anillos
Ancho de anillo	1 [cm] cuando la tubería es de 4 [cm]
Área de celda	Calcular según el diámetro de 4 [cm]
Separación entre anillos	Acomodar según constantes de celda: 0.1, 1 y 10 [cm <sup>-1</sup> ]
Complemento	Usar controlador de conductividad

### 1.3 Diseño de la celda de conductividad

**Figura 6**

*Esquema de una celda de conductividad con arreglo de 3 anillos*



*Nota.* Reproducido de Design a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis, por Cortés, 1998.

En la **Figura 6**, la celda de conductividad contiene anillos a diferente distancia según la constante de celda que se desea. Las **Tabla 3**, **Tabla 4** y **Tabla 5**, entregan datos del diseño de la celda para 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ], 10 [ $\text{cm}^{-1}$ ] y 1 [ $\text{cm}^{-1}$ ], respectivamente:

**Tabla 3**

*Celda de conductividad para constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]*

Variable	Nomen.	Valor ( $\pm 0,1$ )	Unidad
Distancia entre electrodo	L	0,5	Cm
Diámetro interno	D	4	Cm
Área transversal de flujo	A	12,56	$\text{cm}^2$
Ancho electrodo	W	1	Cm
Validar con conductividad	k	0-1.000	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Validar con constante de celda	Cc	0.1	$\text{cm}^{-1}$

\*La constante de celda en [ $\text{cm}^{-1}$ ], es el recíproco de la Ecuación 4.

**Tabla 4***Celda de conductividad para constante 10 [cm<sup>-1</sup>]*

<b>Variable</b>	<b>Nomen.</b>	<b>Valor (±0,1)</b>	<b>Unidad</b>
Distancia entre electrodo	L	248	Cm
Diámetro interno	D	4	Cm
Área transversal de flujo	A	12,56	cm <sup>2</sup>
Ancho electrodo	W	1	Cm
Validar con conductividad	V	0-100.000	μS/cm
Validar con constante de celda	Cc	10	cm <sup>-1</sup>

\*La constante de celda en [cm<sup>-1</sup>], es el recíproco de la Ecuación 4.

**Tabla 5***Celda de conductividad para constante 1 [cm<sup>-1</sup>]*

<b>Variable</b>	<b>Nomen.</b>	<b>Valor (±0,1)</b>	<b>Unidad</b>
Distancia entre electrodo	L	23	cm
Diámetro interno	D	4	cm
Área transversal de flujo	A	12,56	cm <sup>2</sup>
Ancho electrodo	W	1	cm
Validar con conductividad	k	0-10.000	μS/cm
Validar con constante de celda	Cc	1	cm <sup>-1</sup>

\*La constante de celda en [cm<sup>-1</sup>], es el recíproco de la Ecuación 4.

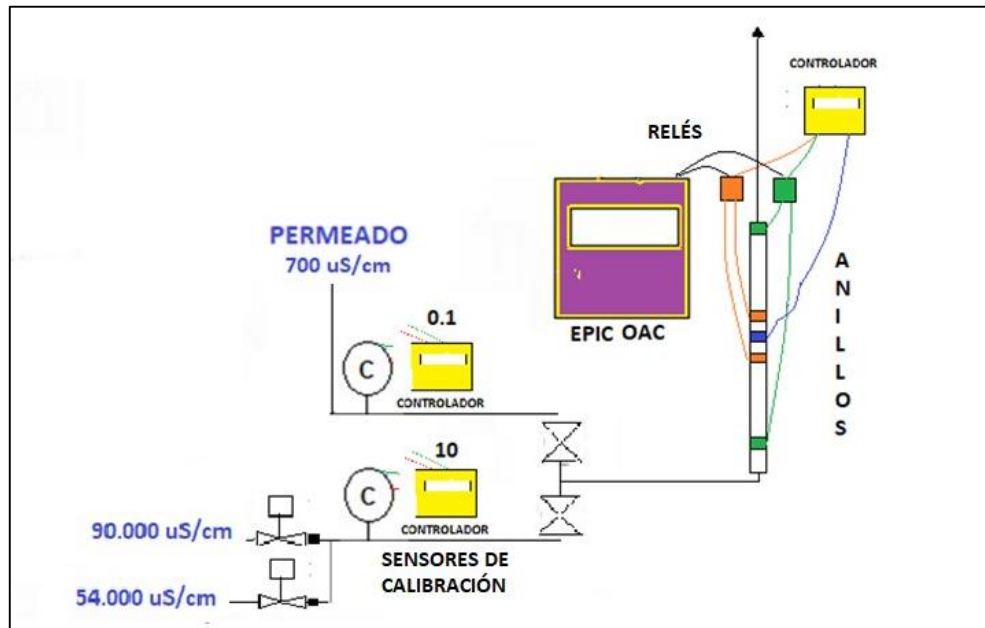
Desde luego, para la constante de 10 [cm<sup>-1</sup>], la separación entre anillos se puede reducir desde 248 [cm] hasta 23,4 [cm], pero, se debe fabricar una celda con diámetro interno de ½ [pulgada], la cual no sirve para la constante de celda 0.1 [cm<sup>-1</sup>].

- $L = 23,4 [cm]$
- $Cc = 10 [cm^{-1}]$
- $A = 1,27 [cm^2]$
- $W = 0,32 [cm]$

## 1.4 Procedimiento experimental

**Figura 7**

*Conexión de celda de conductividad con el medio*



La **Figura 7** representa lo que Cortés (1998) indica: “la constante de celda se valida en un medio con soluciones electrolíticas de conductividad conocida” (**Tabla 6**).

**Tabla 6**

*Experimento para validar celda de conductividad de 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]*

	Dimensiones	Indicadores
Pretest	Medir la conductividad del medio con sensor de referencia	Constante de celda 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] Conductividad: 0-999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Experimento	Medir la conductividad del medio con el sensor diseñado	Constante de celda: 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] Conductividad: 0-999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Postest	Calcular la razón entre valores	Discrepancia menor a 15 [%]

El medio acuoso es agua permeada de 10 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y se concentra gradualmente cada experiencia con Cloruro de Sodio. Las experiencias son 30 lecturas entre 10 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y 1000 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. Puede que la constante de celda del experimento sea inestable, como lo indica el **Anexo 2**. La hipótesis del postest es válida si existe una discrepancia menor al 15 [%] en todo el rango de prueba. Entonces, se seleccionan instrumentos necesarios.

## 1.5 Selección de instrumentos complementarios

**Tabla 7**

*Instrumentos para el controlador de conductividad*

Complemento	Seleccionado	Referencia
Conductivímetro	C270 GPG	Tacussel CD810
Tablero de relés	D1031506	REL-16
Convertidor A/D	Groov AOC	DAS-8
Conductivímetro referencia	Hanna HI8633	Hanna HI8733
Baño termorregulado	Cole Parmer 1266-02	Cole Parmer 1266-02
Procesador	Groov EPIC	Computer
Software adquisición de datos	PAC Control	Visual Basic


*Nota.* Adaptado de Flow cells to measure electrical conductivity: use in estimating gas holdup in flotation systems, por Tavera, 1996.

Según la **Tabla 7**:

- 1) Se selecciona un controlador de conductividad modelo C270, como el de la **Figura 8**. Tiene configuración en 4 rangos: 0 - 19,99 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], 0 - 999,9 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], 0 - 9.999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], 0 - 100 [ $\text{mS}/\text{cm}$ ]. Usa la constante de celda para un rango de 0 – 999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], definida como 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]. Tiene para medir la temperatura en rango 0 - 100 [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Cuenta con 2 salidas de relé de 250 [V] – 10 [A], para control. Se alimenta con 220 [VAC].
- 2) Se seleccionan relés modelo D1031506, como el de la **Figura 9**. Requieren de alimentación 220 [VAC].
- 3) Son seleccionados el medidor de conductividad Hanna 8633 y el baño termorregulado. Para más información consultar **Anexo 3**.

### Figura 8


Controlador Transmisor Conductividad C270

 <p>L0700580</p> <p><b>440.000 CLP c/i.v.a. (junio 2023)</b></p>	<p>Constante de electrodo configurable</p> <p>Salida 4 – 20 [mA] (+- 0,02 [mA])</p> <p>Mide hasta 0 – 100 [mS/cm] +-1[%]</p> <p>Alimentación 220 [V] – 50 [Hz]</p>
---	--

Nota. Adaptado de Controladores, por Veto y Cia, 2023

### Figura 9

Relé de 2 contactos

 <p>D1031506</p> <p><b>35.000 CLP c/i.v.a. (noviembre 2023)</b></p>	<p>Contactos DPDT 220 [VAC] – 10 [A]</p> <p>2 contactos reversibles</p> <p>2 normal cerrado 2 normal abierto</p> <p>Alimentación 220 [VAC] – 32 [mA]</p>
--	--

Nota. Adaptado de Relé, por Veto y Cia, 2023

De este modo, la conexión de la celda de conductividad e instrumentos, permite tomar datos en línea, como se indica en las siguientes corrientes del proceso.

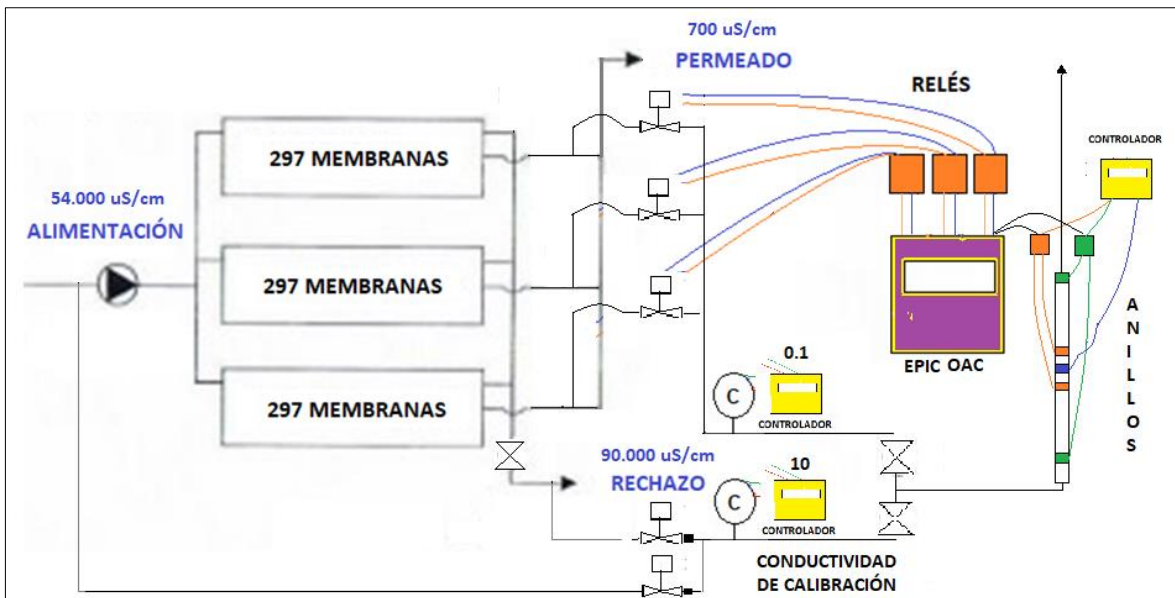
## 1.6 Integración en planta

1) La línea se requiere intervenir para obtener una línea de flujo aparte de la principal, usando válvulas que se conectan a la celda de conductividad como lo indica la **Figura 10**.

2) Mientras que, cuando el sistema es de 2 etapas, la intervención queda como la **Figura 11**.

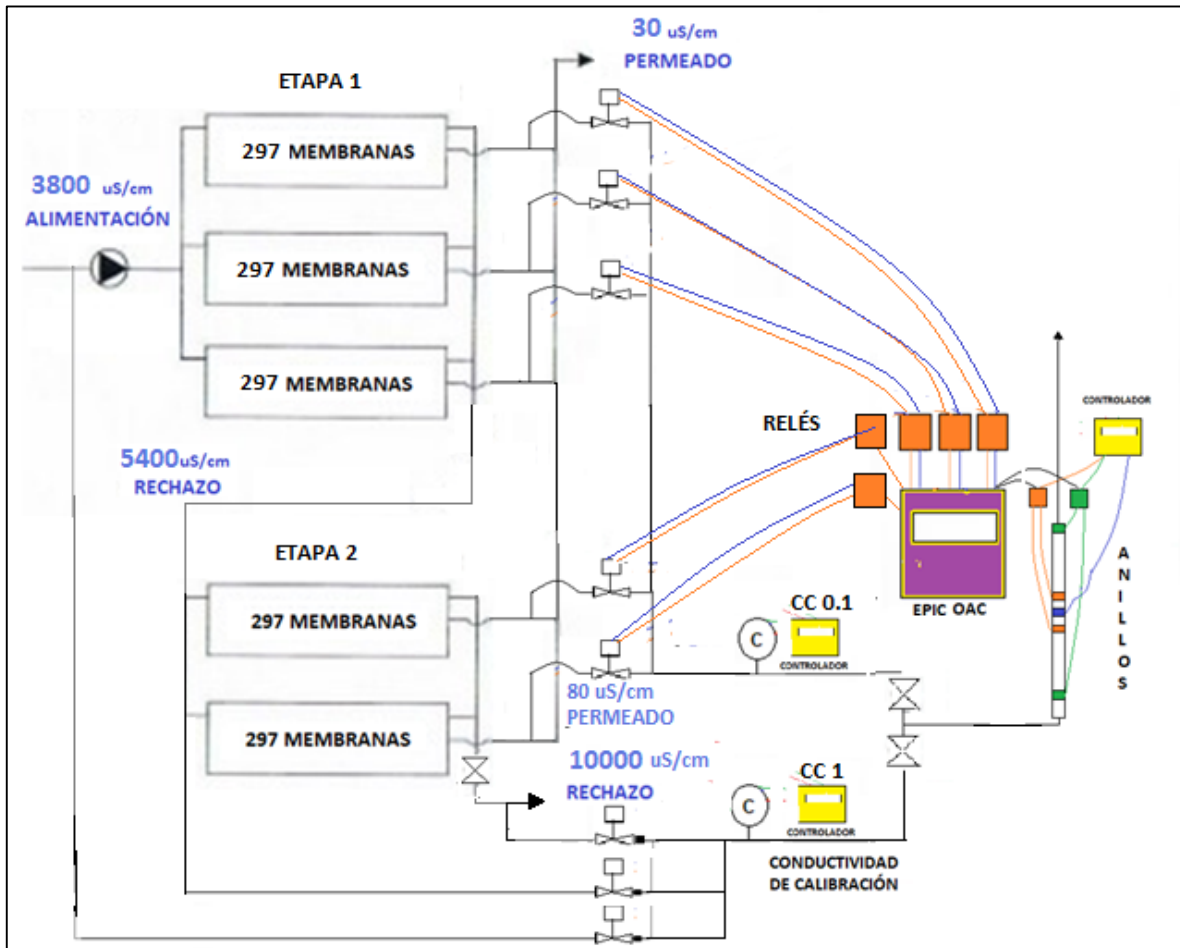
**Figura 10**

*Celda de conductividad en 1 etapa*



**Figura 11**

*Celda de conductividad en 2 etapas*



De la **Figura 10**, es posible observar la conexión para salmueras concentradas, mientras que la **Figura 11**, observa la conexión para salmueras diluidas. Y según la conductividad a medir, se elige la constante de celda.

Así, queda en evidencia, que con el electrodo diseñado es posible medir diferentes líneas de conductividad: alimentación, permeado y rechazo. Y que, es necesario usar relés para activar anillos de distinta separación entre ellos. Pero, la ventaja es que están conectados a un solo controlador, lo cual reduce el costo de inversión. Sin embargo, se requieren líneas de proceso y válvulas que dirijan una cantidad de flujo hacia la celda.

## 2. SISTEMA DE MONITOREO USANDO EQUIPOS GROOV DE OPTO 22

El capítulo 2 trata sobre un sistema de control abierto para plantas de osmosis inversa. Por tanto:

- 1) Es necesario definir la cantidad de variables a medir del proceso de osmosis
- 2) La ubicación de sensores en el proceso
- 3) La forma de controlar el sistema
- 4) Utilizar la celda de conductividad diseñada
- 5) Indicar cuando el proceso requiere la mantención de membranas

Por ejemplo, la **Figura 12** indica que, suelen ser necesarias otras variables a medir (**Anexo 4**), como la lista siguiente:

- Caudal: alimentación y permeado
- Presión: alimentación, permeado y rechazo
- Conductividad: alimentación, permeado y rechazo
- Temperatura

Figura 12

Planta genérica de osmosis inversa



Sin embargo, los indicadores o parámetros (**Tabla 8**) que indican la suciedad o reemplazo de membranas, pueden ser:

- Paso de sal
- Caída de presión en las membranas
- Flujo de permeado
- Razón de productividad ( $R_p$ )
- Tiempo entre dos lavados consecutivos

**Tabla 8***Parámetros de control de limpieza*

	<b>Salinidad</b>	<b>Caída de presión</b>	<b>Flujo permeado</b>	<b>Rp</b>
Conductividad alimentación	Si	-	Si	-
Conductividad de permeado	Si	-	-	Si
Conductividad de rechazo	-	-	-	Si
Temperatura	Si	-	Si	Si
Presión alimentación	Si	Si	Si	Si
Presión rechazo	Si	Si	Si	-
Presión permeado	Si	-	Si	-
Flujo alimentación	Si	-	Si	-
Flujo permeado	Si	-	Si	Si
Valor máximo normalizado	10[%]	15[%]	10[%]	

Siendo necesarios dispositivos que, se utilizan en comunicación y registro de datos, control con PAC Control y monitorización con HMI. Como, por ejemplo:

- Groov RIO
- Groov EPIC
- Groov IMAI

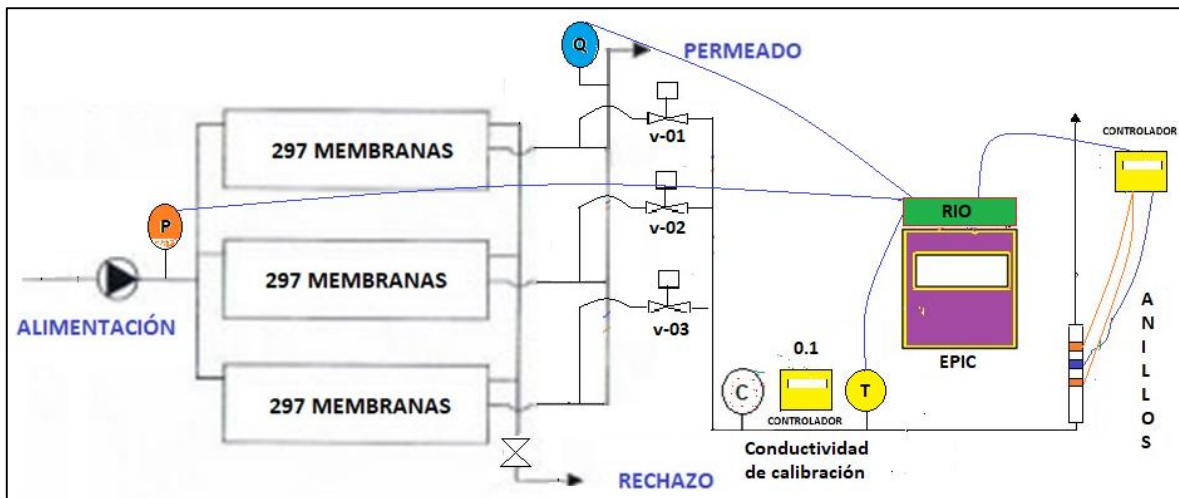
Y, finalmente, se define el tipo de mantención de membranas, que tiene opciones:

- Limpieza ácida
- Limpieza básica
- Reemplazo de membranas
- Cambio de dosificación de químicos en el pretratamiento

## 2.1 Análisis de requerimientos y especificaciones

Figura 13

Control 1 por razón de productividad



El control 1 consiste en el sistema de monitoreo por razón de productividad. Y, para usar en un proceso de 1 etapa, con 3 bastidores, requiere los siguientes sensores:

- 1 sensor multipunto con constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]
- 1 sensor de temperatura
- 1 sensor de flujo de permeado
- 1 sensor de presión de alimentación

La forma de controlar requiere:

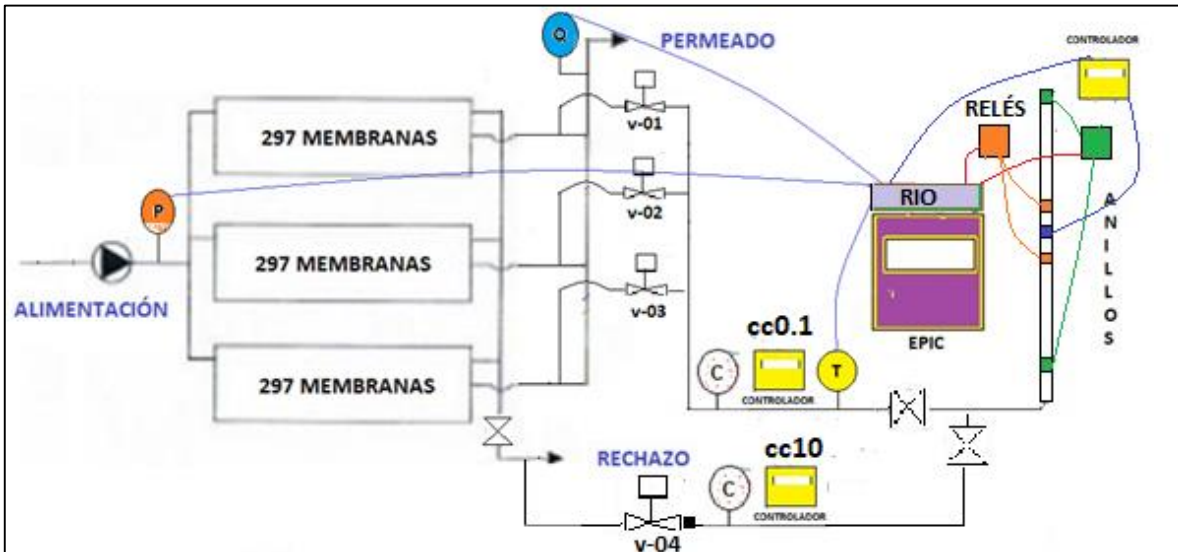
- 1 procesador EPIC
- 1 controlador de conductividad C270
- 1 convertidor RIO de 8 canales
- El sistema es abierto, para que las válvulas sean movidas por el personal, no mediante relés.
- El permeado de cada bastidor requiere de un escape de flujo mínimo, dados por las válvulas manuales v-1, v-2 y v-3.

La forma de calibrar el sensor de conductividad requiere:

- 1 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]

**Figura 14**

*Control 2 añade conductividad de rechazo*



El control 2 consiste en el sistema de monitoreo por razón de productividad y añade la conductividad de rechazo. Y, requiere los siguientes sensores:

- 1 sensor de presión para alimentación
- 1 sensor multipunto con constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y 10 [cm<sup>-1</sup>]. Porque, en el ejemplo, se considera agua de mar, que es de alta conductividad.
- 1 sensor de temperatura
- 1 sensor de flujo de permeado

La forma de controlar requiere:

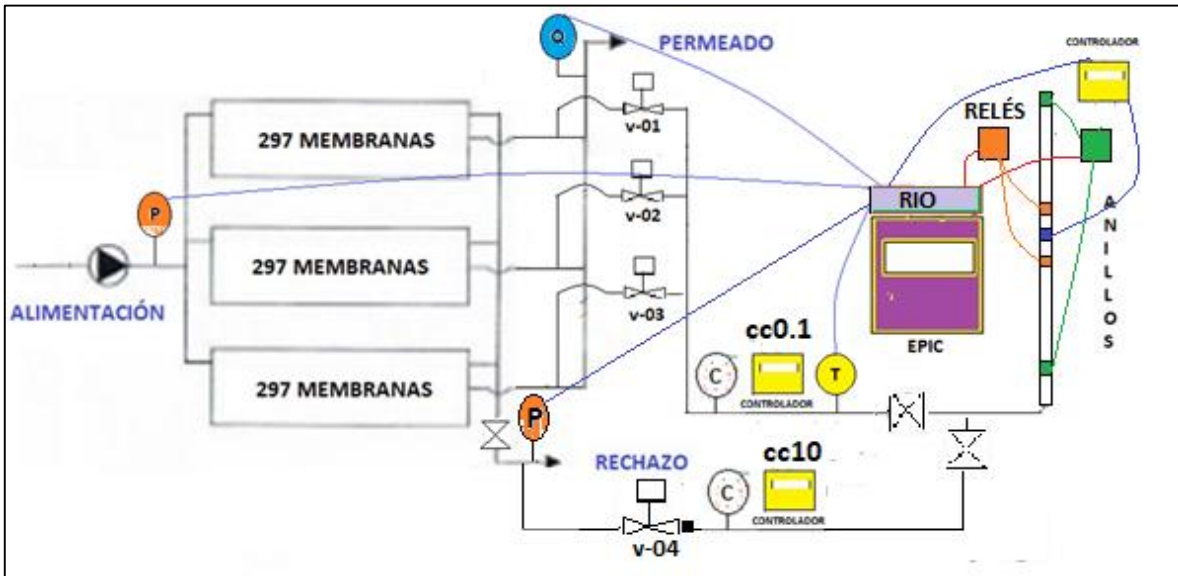
- 1 procesador EPIC
- 1 controlador de conductividad
- 2 relés
- 1 convertidor RIO de 8 canales, reemplaza: 2 relés.
- 4 válvulas manuales.
- La válvula v-4 aparta un flujo mínimo de la línea de rechazo. Además, requiere un regulador de presión, para estar bajo 6 [bar].

La forma de calibrar el sensor de conductividad:

- 2 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y 10 [cm<sup>-1</sup>]

**Figura 15**

*Control 3 añade caída de presión*



El control 3 consiste en el sistema de monitoreo por razón de productividad, concentración de rechazo y añade la caída de presión. Requiere los siguientes sensores:

- 2 sensores de presión: alimentación y rechazo global
- 1 sensor multipunto con constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y 10 [cm<sup>-1</sup>] para salobre mar
- 1 sensor de temperatura
- 1 sensor de flujo de permeado global

La forma de controlar requiere:

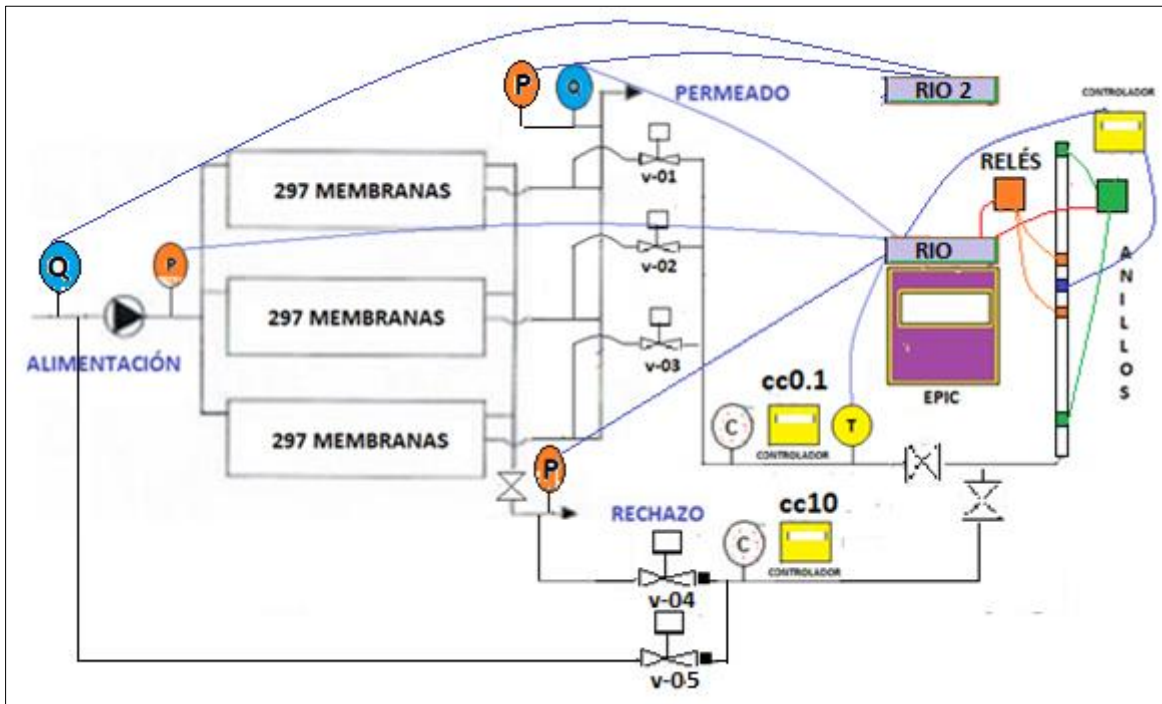
- 1 procesador EPIC
- 2 relés
- 1 controlador de conductividad
- 1 convertidor RIO de 8 canales, reemplaza: 2 relés.
- 4 válvulas manuales

La forma de calibrar el sensor de conductividad:

- 2 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y 10 [cm<sup>-1</sup>]

**Figura 16**

*Control 4 añade paso de sal y flujo de permeado*



El control 4 consiste en el sistema de monitoreo por razón de productividad, conductividad de rechazo, caída de presión y añade paso de sal y flujo de permeado. Y requiere los siguientes sensores:

- 3 sensores de presión: alimentación, rechazo global y permeado global
- 1 sensor multipunto con constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] y 10 [ $\text{cm}^{-1}$ ]
- 1 sensor de temperatura
- 2 sensores de flujo: permeado y alimentación global

La forma de controlar requiere:

- 1 procesador EPIC
- 2 relés
- 1 controlador de conductividad
- 2 convertidor RIO, reemplaza 2 relés
- 5 válvulas manuales. La válvula v-5 extrae un flujo mínimo de la línea de alimentación.

La forma de calibrar el sensor de conductividad:

- 2 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] y 10 [ $\text{cm}^{-1}$ ]

Los canales analógicos y digitales usados por cada control son:

**Tabla 9**

*Canales usados en el RIO en el control 1*

<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA]	1	Controlador de conductividad de permealado
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de flujo de permealado global
Entrada termistor/resistor	4	Transmisor de temperatura de permealado

**Tabla 10**

*Canales usados en el RIO en el control 2*

<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA]	1	Controlador de conductividad de permealado
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de flujo de permealado global
Entrada termistor resistor	4	Transmisor de temperatura de permealado
Salidas digitales On Off	9	Relé para celda de cc0.1
	10	Relé para celda de cc10

**Tabla 11**

*Canales usados en RIO en el control 3*

<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA]	1	Controlador de conductividad de permealado
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de flujo de permealado global
	4	Transmisor de presión de rechazo global
Entrada termistor resistor	5	Transmisor de temperatura de permealado
Salidas digitales On Off	9	Relé para celda cc0.1
	10	Relé para celda cc10

**Tabla 12***Canales usados en RIO en el control 4*


<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA] RIO 1	1	Controlador de conductividad de permeado
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de flujo de permeado global
	4	Transmisor de presión de rechazo global
Entrada termistor resistor	5	Transmisor de temperatura de permeado
Salidas digitales On Off	9	Relé para celda cc0.1
	10	Relé para celda cc10
Entradas Analógicas 4 – 20 [mA] RIO 2	1	Transmisor de flujo de alimentación
	2	Transmisor de presión de permeado

Se procede a la selección del tipo de sensores y equipos.

## 2.2 Sensores y actuadores del sistema de monitoreo

**Figura 17**


*Transmisor de presión*

 <p><b>170.000 CLP c/i.v.a (noviembre 2023)</b>  <i>Veto modelo C9041022</i>  <b>+ 30.000 CLP c/i.v.a (Fuente de poder)</b></p>	<p>Escala rango 0-25 [bar] (+-0,5%)</p> <p>Alimentación 5-24 [VDC]</p> <p>Salida 4-20 [mA]</p> <p>Fluido en contacto con SS316</p> <p>Requiere fuente de poder MDR-60-12 24 [VDC] 2.5 [A] 220 [VAC] 12 [W]</p>
--	--

*Nota.* Adaptado de Transmisor de presión, por Veto y Cia, 2023. Comentario: Para otros rangos de presión se debe buscar el precio.

**Figura 18**

*Medidor de temperatura PT100*

 <p><b>70.000 CLP c/i.v.a (abril 2024)</b>  <i>modelo VETO k1033001</i></p>	<p>Escala rango -50 – 500 [°C]</p> <p>Cabezal Nema 4</p> <p>Bulbo largo 300 [mm]</p> <p>SS316</p> <p>Cono ½ [in] NPT</p>
--	--

*Nota.* Adaptado de PT100 y Termocuplas, por Veto y Cia, 2024.

**Figura 19**

*Flujómetro ultrasónico*

 <p><b>2.000.000 [CLP] c/iva (enero 2024)</b> <i>Veto modelo N0646058</i></p>	<p>Incluye accesorios N0646031, E5059329 y M1301009: PT100, cable 18 AWG y gel para mediciones.</p> <p>Alimentación 220 [VAC] o 8-36 [VDC]</p> <p>Flujo 0,3 a 32 [m/s]</p> <p>Salida 4-20 [mA]</p> <p>Cañería 15 a 6000 [mm]</p> <p>Tiene 3 entradas analógicas 4-20 [mA]. Con largo de cable de sensores hasta 60 [m]. En temperaturas entre -40 a 90 [°C].</p>
--	--

*Nota.* Adaptado de Variador de frecuencia, por Panasonic, 2023.

**Figura 20**


*Groov RIO*

 <p><b>1.300.000 CLP c/i.v.a. (abril 2023)</b> <i>Modelo GRV-R7-MM1001-10</i></p> <p><b>+ 30.000 CLP c/i.v.a. (fuente de poder)</b></p>	<p>8 canales multifunción y 2 relés</p> <p>Alimentación 10-32 [VDC]</p> <p>Conexión directa Analógico I/O, temperatura, discretos I/O, y relés</p> <p>Conexión ethernet, servicios Cloud</p> <p>Configurable con PAC Control</p> <p>Fuente de poder 24 [VDC]</p> <p><b>Anexo 7</b></p>
--	--

*Nota.* Adaptado de Groov Rio User's guide Form 2324, por Opto22, 2021.

## Figura 21

### Groov EPIC Controlador industrial programable

 <p><b>2.730.000 CLP c/i.v.a. (Abril 2023)</b> <i>Modelo GRV-EPIC-PR1</i></p>	<p>Incluye software Groov Manage, PAC Control, Codesys, Groov View, Node red</p> <p>Construcción de HMI</p> <p>Incluye alimentación 100-264 [VAC] con consumo desde 7,1 [W] hasta 60 [W]</p> <p>Incluye chasis</p> <p>Tiene pantalla táctil, ram 2 [GB] y espacio de 6 [GB]</p>
--	---

*Nota.* Adaptado de Groov Epic Processor Data sheet, Form 2245, por Opto22, 2021.

**Conductividad:** Transmite 4-20 [mA] con el controlador C270, el cual se ubica en el gabinete local de la planta. Mientras que, la celda de conductividad, en la línea para conductividad.

**Transmisor de presión:** Transmite 4-20 [mA], debe ir montado en la línea de proceso. Para uso en intemperie, en IP65. (**Figura 17**).

**Temperatura:** Transmite resistencia y debe ir montado en la línea de proceso. Para uso de intemperie tipo Nema 4 (**Figura 18**).

**Flujo:** Transmite 4-20 [mA] y se ubica en cañería llena de diámetro 15 a 6000 [mm]. La protección es IP68 (**Figura 19**).

**Convertidor RIO:** Recibe canales 4-20 [mA], termistor y activa 2 relés internos para los anillos de la celda, porque es un equipo multifuncional montado cercano a los sensores para captar datos por cable, con transmisión al EPIC y a la nube a través de internet (**Figura 20**)

**Procesador EPIC:** Es un procesador quad-core ARM que corre en Linux, que cuenta con Groov View para crear interfase, PAC Control para estrategias de control, Codesys para programación y MQTT para automatización segura de Ignition. Debe ir montado en el chasis en el gabinete local de la planta (**Figura 21**).

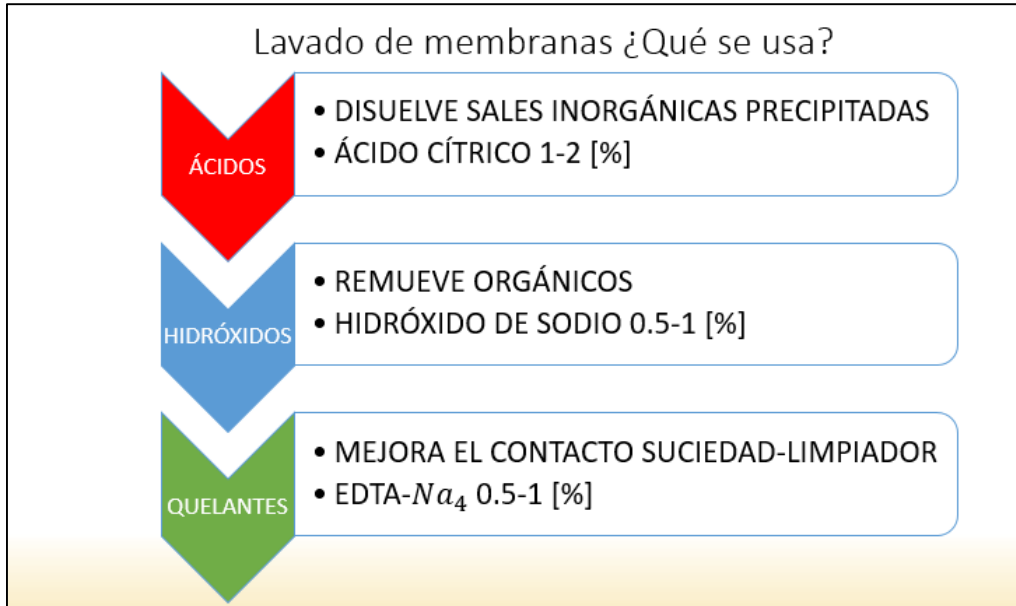
**Válvulas:** se requieren válvulas manuales para línea de permeado para presión de permeado y alimentación PN10 [bar]. También válvulas manuales para línea de rechazo para presión PN25 – PN80 [bar].

### 2.3 Descripción del sistema de monitoreo

**Acción de limpieza química:** Toda acción de limpieza (**Figura 22**) química es correctiva, porque se usa cuando un indicador de ensuciamiento de las membranas se encuentra en su valor máximo normalizado.

**Figura 22**

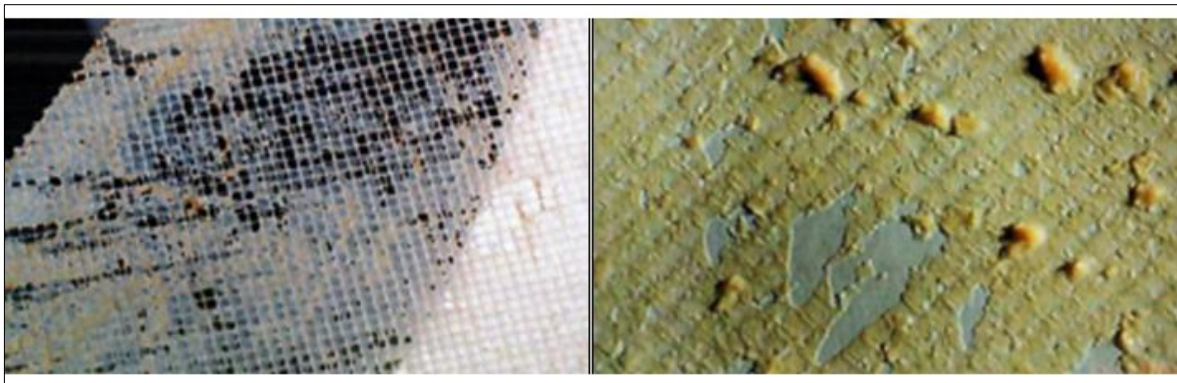
*Limpieza química de membranas*



**Acción de reemplazo de membranas:** La regla de Nazif (2020) indica que: “si el tiempo entre un lavado químico y el siguiente es menor a 250 horas de funcionamiento, las membranas se reemplazan” (**Figura 23**).

**Figura 23**

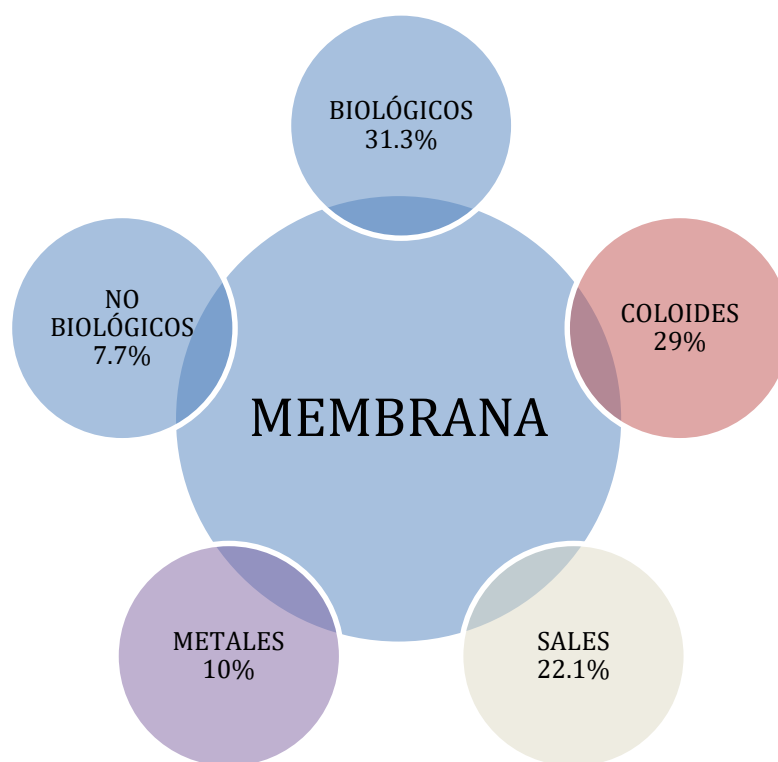
*Membranas ensuciadas severamente*



**Acción de dosificación química en el pretratamiento:** El reemplazo de membranas es retrasado por el control de la dosificación química, controlada en el pretratamiento, pues, reduce los contaminantes que se adhieren (**Figura 24**).

**Figura 24**

*Contaminantes adheridos a la membrana*



En un pretratamiento convencional, sugerido en la United Nations Environment Programme, UNEP (2008), existen dosificaciones como en el siguiente resumen:

- 1) El control biológico se realiza con concentraciones de hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ) entre 0.1 a 1 [mg/L] antes del pretratamiento según la **Ecuación 5**.
- 2) La neutralización de cloro residual con concentraciones de bisulfito de sodio ( $\text{NaHSO}_3$ ), antes de las membranas, para llegar a un valor redox de 0.1 [ppm] como cloro residual, según la **Ecuación 6**.
- 3) La coagulación-floculación de coloides controla la turbidez con concentraciones de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) entre 1 a 30 [mg/L] antes del filtro de multimedia, para llegar a un valor de turbidez menor a 1 [NTU] antes de las membranas, según la **Ecuación 7**.

4) La adición de ácido sulfúrico reduce la incrustación por sales carbonatadas ( $\text{CaCO}_3$ ), con concentraciones entre 20 y 100 [mg/L], antes del filtro de multimedia, para llegar a un valor de pH entre 6 a 7, según la **Ecuación 8 y 9**.

5) El anti-incrustante reduce la formación y crecimiento de cristales de sales, con concentraciones de hexametáfosfato de sodio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> entre 1 a 2 [mg/L], previo a las membranas.

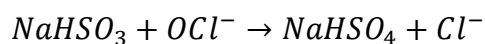
#### **Ecuación 5**

*Hipoclorito de Sodio*



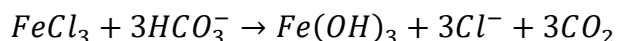
#### **Ecuación 6**

*Bisulfito de Sodio*



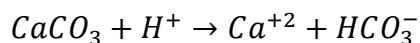
#### **Ecuación 7**

*Cloruro Férrico*



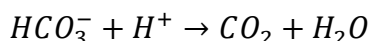
#### **Ecuación 8**

*Ácido y Carbonato*



#### **Ecuación 9**

*Ácido y Bicarbonato*



Sin embargo, este estudio se limita al monitoreo para el reemplazo de membranas y mantención por limpieza química. Esto porque la regulación de químicos, requiere sensores de control como: potencial redox, turbidez, pH y SDI.

La configuración de indicadores no son parte de la presente memoria, pero, se deben configurar a través del PAC Control, para que cuando se cumpla un criterio, se inicie un lavado (**Anexo 5**).

En resumen, el capítulo 2, presenta el sistema de control abierto para indicar cuando las membranas están afectadas, con tal de iniciar el lavado químico de estas.

El sistema usa, por lo general: procesador Groov EPIC, convertidor Groov RIO, controlador de conductividad C270, celda de conductividad, sensores de presión, sensores de flujo, y sensor de temperatura.

Siendo necesario ahora evaluar el control en una planta piloto para las líneas de alimentación de 3.800 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], permeado de 30 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y rechazo de 5.400 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ].

### **3. SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA PILOTO DE OSMOSIS INVERSA**

El capítulo 3 trata sobre el diseño de una planta piloto, con fines de aplicar el sistema de monitoreo. Ésta planta debe contar con un sistema de válvulas, para modificar las líneas de la planta tradicional, logrando una configuración modificable.

Se parte por:

- 1) Diseño de la planta.
- 2) Ubicación del sistema de monitoreo.
- 3) Diseño de proceso y mostrar la apertura de válvulas
- 4) Señalar el lavado químico de las membranas, para prolongar la vida útil de estas.

### 3.1 Diseño de la planta

#### 3.1.1 Requerimientos y criterios de diseño

**Tipo de agua:** agua de alimentación de bajo ensuciamiento e incrustación.

**Flux:** el flujo de permeado referenciado al área (Dupont, 2022), es:

- 42 [lmh] para agua de grifo de bajo poder de ensuciamiento
- 17 [lmh] para agua superficial con mayor poder de ensuciamiento

**Membrana:** TW30-4021 para agua de grifo. Con límites (**Tabla 13**) y datos siguientes:

- 2.000 [ppm] de concentración de alimentación
- 15,5 [bar] la presión de operación
- 8 [%] la recuperación por membrana
- 99,5 [%] el rechazo de sal
- 25 [°C] la temperatura de referencia del medio
- 36 [ft<sup>2</sup>] el área activa por membrana (3,3 [m<sup>2</sup>])

**Tabla 13**

*Límites por membrana TW30-4021*

Variable	Valor	Criterio	Unidad
Recuperación	25	Máximo	%
Flujo de permeado	3,4	Máximo	m <sup>3</sup> /d
Flujo de rechazo	3,8	Mínimo	m <sup>3</sup> /d
Flujo de alimentación por tubo	76,8	Máximo	m <sup>3</sup> /d
Flux	42	Máximo	lmh

*Nota.* Adaptado de Filmtec Membranes, Product data sheet, por Dupont, 2021 y 2022.

**Flujo de permeado:** 13,6 [m<sup>3</sup>/d], porque se busca usar el máximo posible para 4 membranas.

### 3.1.2 Arreglo de membranas y configuración del tratamiento

Se realiza la simulación en Hydranautics para con:

- 13,6 [m<sup>3</sup>/d] de flujo de permeado, 2.000 [ppm] de concentración inicial
- 2 elementos ESPA2-LD-4040 (Hydranautics, 2022):
  - De similar característica a la TW30-4021, solo que tiene el doble de largo.
  - 38 [lmh] de flux, 7,43 [m<sup>2</sup>] de área por elemento, 99,6 [%] de rechazo
  - 1 etapa
- 49 [%] de eficiencia de bomba

**Flujo de rechazo:** El mínimo de simulación es 0,7 [m<sup>3</sup>/h].

**Factor beta:** Salinas (2021) indica que: “el valor se debe regular en 1,2 cuando la membrana funciona bajo 18 [%] de recuperación. Porque si no, se acelera el ensuciamiento”.

**Recuperación:** 32 [%] cumple los criterios (**Anexo 6**)

**Área requerida:** 13,6 [m<sup>2</sup>]

**Número de membranas:** 4

**La conductividad de permeado:** 33 [μS/cm]

**La conductividad de rechazo:** 5.800 [μS/cm]

**Consumo bomba de osmosis:** 1,5 [kW] trifásica

### 3.1.3 Proceso de pretratamiento

La planta para el agua de bajo ensuciamiento, requiere:

- 1) Filtro de carbón activado granular, si el agua proviene del grifo de la llave.
- 2) Filtro de sedimentación de 5 [micras] para coloides (Dupont, 2023).

Pero, no requiere de los siguientes equipos:

- i) Filtro de arena para partículas de 75 [micras]
- ii) Unidad suavizante con zeolita para carbonatos, a menos, que se indique.

Tampoco de los siguientes químicos, a menos que se indique:

- a) Coagulante para partículas coloidales
- b) Ácido sulfúrico para el control de pH
- c) Anti-incrustante hexametáfosfato de sodio para reducir la incrustación de sales

Sin embargo, se recomienda medir, antes de las membranas:

- A) Sólidos disueltos totales para asegurar menos de 1.000 [ppm].
- B) Turbidez, como máximo de 1 [NTU].
- C) Índice de densidad de sedimento, cercano a 1 y menor a 3.
- D) pH entre 6 y 7
- E) Potencial redox del cloro libre, para asegurar bajo 0,1 [ppm].

También, se sugiere un análisis físico químico de la alimentación, si se indica. Tal como: Carbonato y Sulfato de Calcio, Sílice, Sulfato de Bario, sales de Hierro, Sodio, Potasio, Cloruros, Nitratos, Boro, Carbono Orgánico Total, Demanda Biológica de Oxígeno y Durezas.

En cambio, el agua superficial requiere:

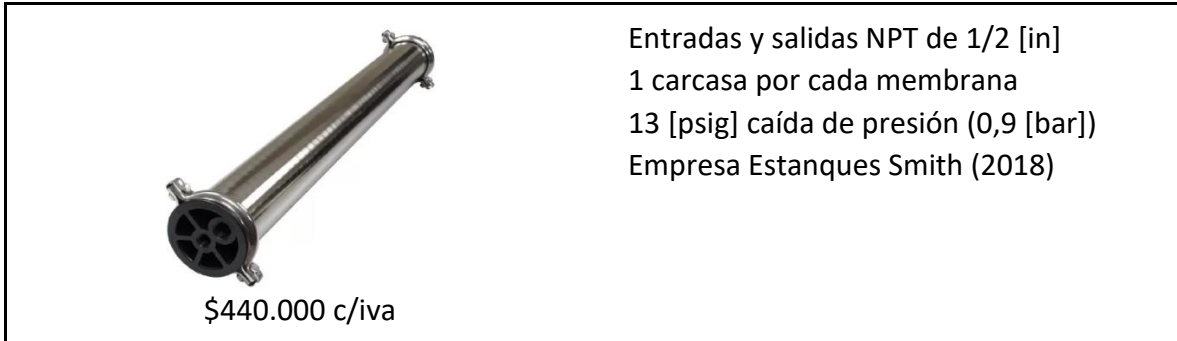
- Cloración con Hipoclorito de Sodio
- Coagulación/floculación con Cloruro Férrico
- Estanque de sedimentación
- Filtro de arena
- Decloración con Bisulfito de Sodio
- Acidificación
- Dosis de anti-incrustante

### 3.1.4 Especificación de equipos y componentes

Porta membrana: 4 unidades

Figura 25

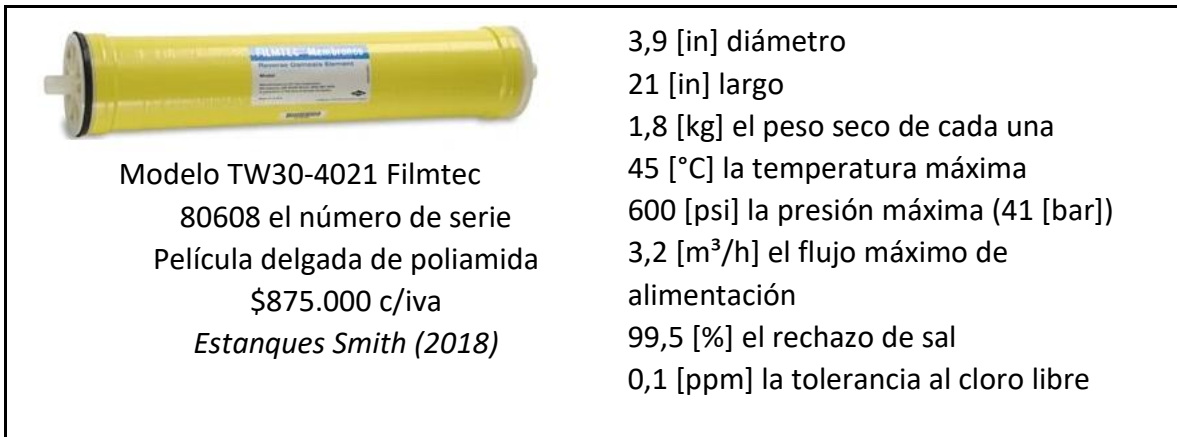
*Porta membrana elemento*



Membrana: 4 unidades

Figura 26

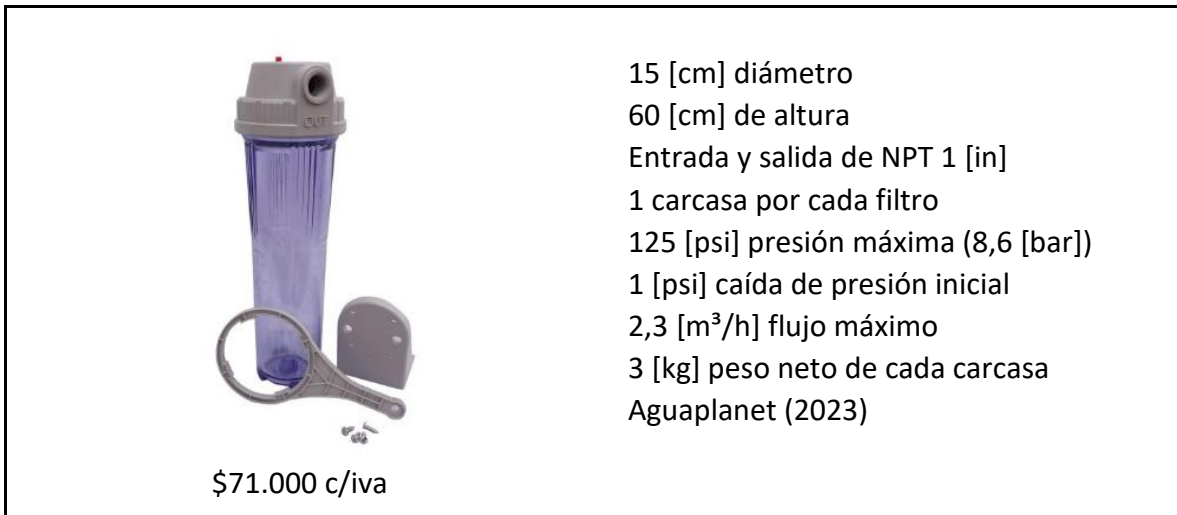
*Membrana TW30-4021*



**Porta filtro de sedimentación: 2 unidades**

**Figura 27**

*Porta filtro*

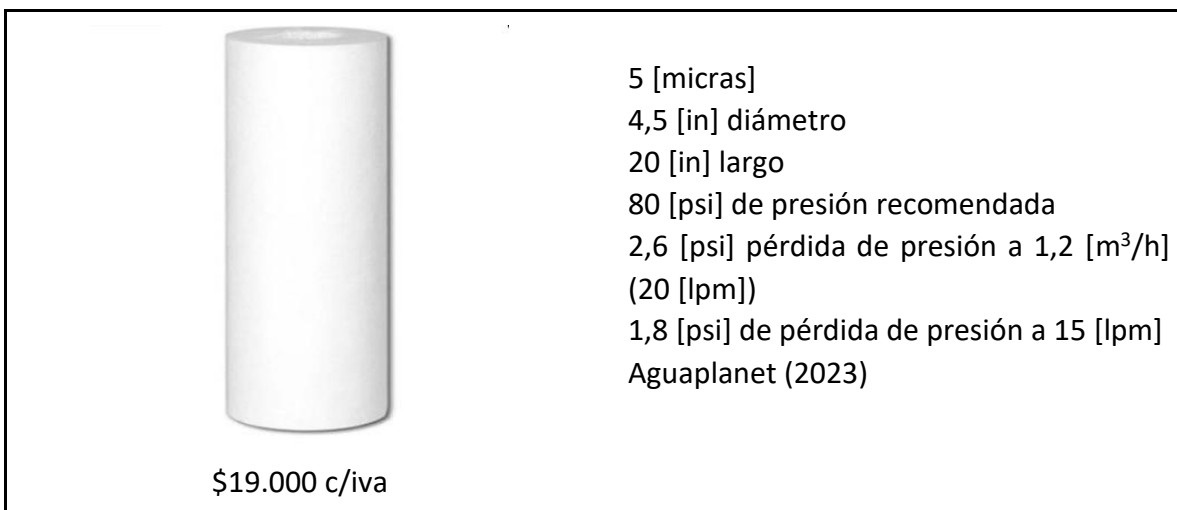


*Nota.* Adaptado de filtros, por Agua Planet, 2023

**Filtro de sedimento: 2 unidades**

**Figura 28**

*Filtro de sedimentación*





*Nota.* Adaptado de filtros, por Agua Planet, 2023

## Bomba hidráulica: 1 de pretratamiento y 1 de osmosis inversa

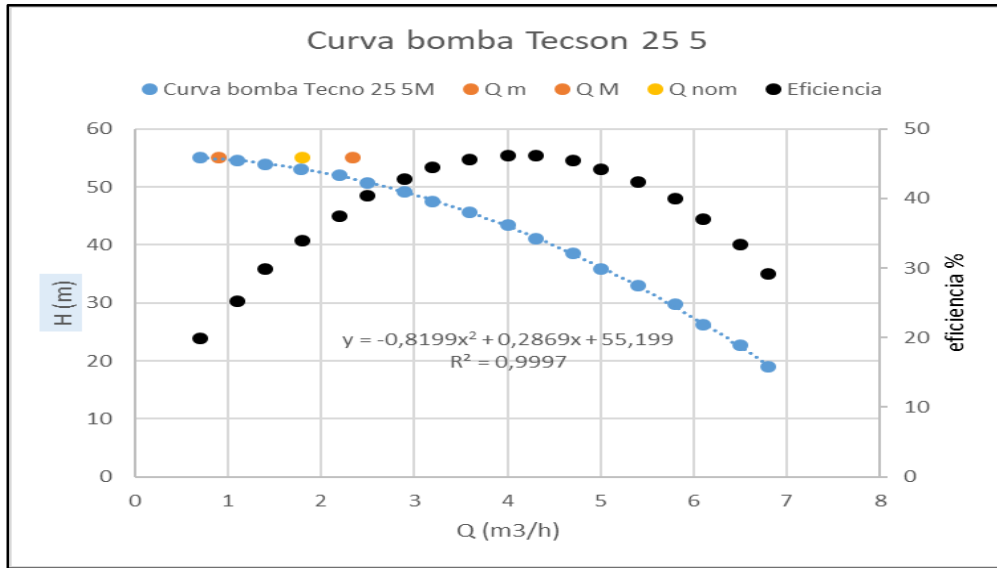
Figura 29

### Bombas de pretratamiento y osmosis inversa

 <p>La bomba Tecno 25 5M de ESPA modelo 3118-00119, para el pretratamiento</p> <p>\$590.000 c/iva En Estanques Smith</p>	<p>0,15 a 6,96 [m<sup>3</sup>/h] capacidad de flujo 5,3 a 2,0 [bar] presión levantada 5,8 [bar] presión máxima 7,4 [A] de corriente y 1,7 [kW] de potencia Entrada y salida de NPT 1 [in] 9 [m] autoaspirante Motor asíncrono de 2 polos protección térmica para un servicio continuo 34 [%] eficiencia de la bomba a 1,8 [m<sup>3</sup>/h] y 53 [m]. Se recomienda una de mayor eficiencia en el punto de operación.</p>
 <p>La bomba Stairs, centrífuga, SBI 1-30, serie V2200038731, para la etapa de osmosis.</p> <p>\$1.100.000 c/iva En Hidroreparaciones</p>	<p>0,5 a 2,4 [m<sup>3</sup>/h] capacidad de flujo 18,0 a 9,0 [bar] capacidad de presión 3,5 [A] corriente trifásica 1,5 [kW] consumo de potencia Entrada y salida NPT de (1 ¼) [in] 83,8 [%] eficiencia de motor de 2 polos 50 [Hz] 2.900 [rpm] 49 [%] de eficiencia a 1,8 [m<sup>3</sup>/h] y 149 [m] El líquido está en contacto con AISI 304 17,4 [kg] peso neto 0,12 [bar] de NPSH requerido a 1,8 [m<sup>3</sup>/h]</p>

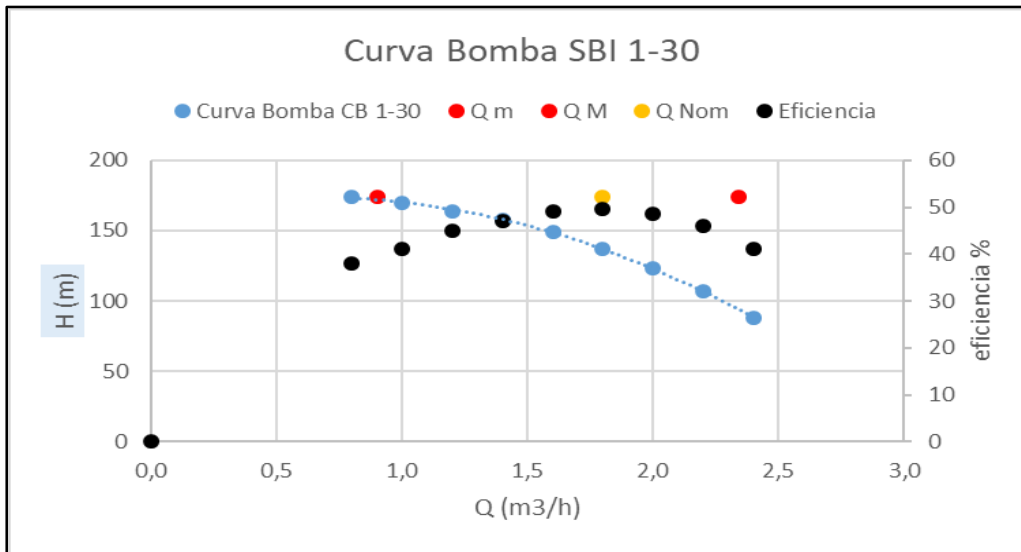
**Figura 30**

*Curvas de bomba de pretratamiento*



**Figura 31**

*Curvas de bomba de osmosis*



Los componentes necesarios son:

Presostato: 2 unidades

Figura 32

*Presostatos de pretratamiento y alta presión*



*B12CN de baja presión T054500*  
**100.000 CLP c/i.v.a. (junio 2023)**

Escala rango -0.2 – 8 [bar]  
Contacto de cambio SPDT NC y NO  
Alimentación 220 [V]  
Contactos 16 [A] 220 [V]  
Diferencial 0.6 – 3 [bar]  
El diferencial se resta del valor de escala  
Contacto de fluido SS301  
Para interior IP40  
Con aumento de la presión abre 1-2 y cierra 1-4




*B12EN de alta presión T054750K*  
**240.000 CLP c/i.v.a. (junio 2023)**

Escala rango 8 – 28 [bar]  
Contacto de cambio SPDT NC y NO  
Alimentación 220 [V]  
Contactos 16 [A] 220 [V]  
Diferencial 2 – 6 [bar]  
El diferencial se resta del valor de escala  
Contacto de fluido SS301  
Para intemperie IP65  
Con aumento de la presión abre 1-2 y cierra 1-4

### Figura 33

#### Variador de frecuencia

 <p><i>Variador de frecuencia MK300 AMK3001P54, para control de presión</i></p> <p><b>250.000 CLP c/iva (noviembre 2023)</b></p>	<p>Potencia nominal trifásica 1.5 [kW] Alimentación 400 [VAC] y 6 [A] 50 [Hz] Corriente nominal de salida 4 [A] Control de entrada 4 – 20 [mA] Control de entrada 0 – 10 [V] Control por potenciómetro Potencia de salida 3,2 [kVa] Protección IP20 Montar en gabinete</p>
---	--

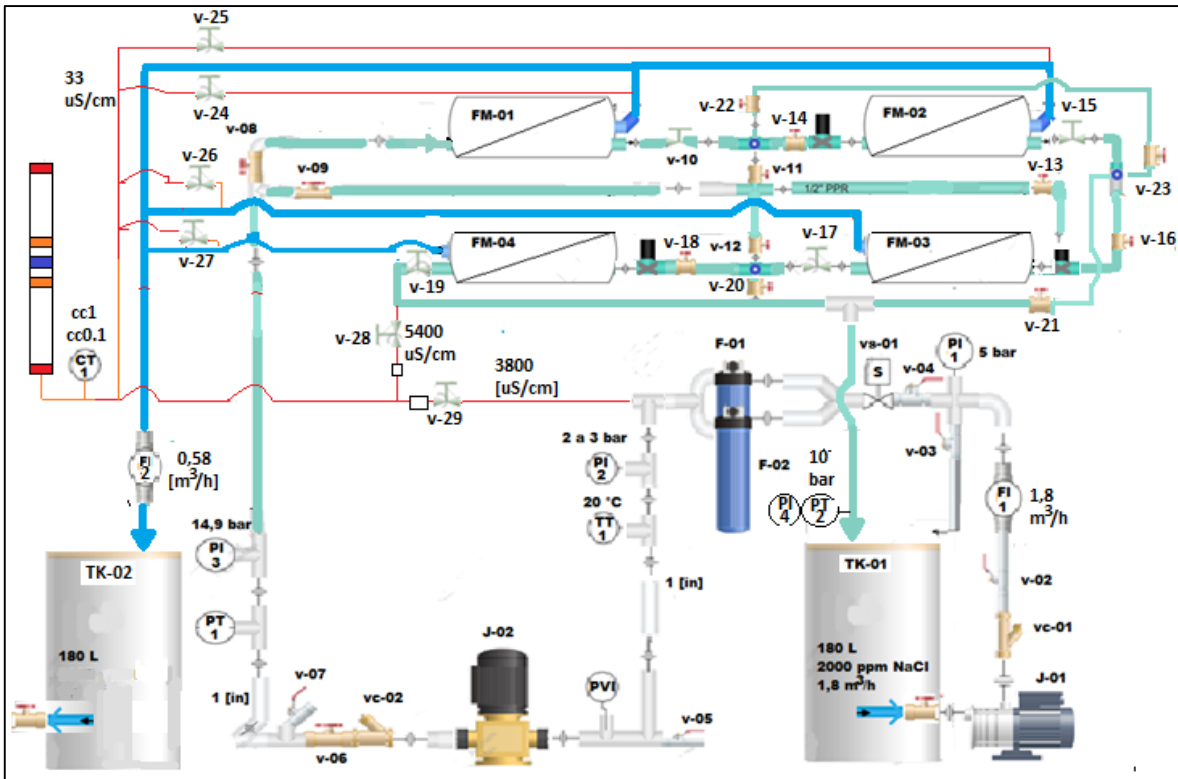
Nota. Adaptado de Variador de frecuencia, por Panasonic, 2023.

## 3.2 Diseño de proceso y layout operacional

### 3.2.1 Diseño de proceso (P&ID)

Figura 34

Layout de planta piloto de osmosis inversa



En la **Figura 34**, se observa que, el estanque TK-01 contiene una solución de Cloruro de Sodio a 2000 [ppm]. Antes, si es agua de grifo, se usa filtro de carbón activado granular. Del estanque a la bomba de pretratamiento (J-01), se eleva un flujo (FI-1) de 1,8 [m<sup>3</sup>/h] a presión (PI-1) de 5 [bar]. Hay una línea de recirculación, abriendo la válvula v-03, para homogenizar la alimentación. Después, la válvula v-04, está en la línea principal, y se abre la válvula solenoide (vs-01) con un presostato fijado en 5 [bar] y cierra en 4 [bar].

Llegando a los filtros de sedimentación de 5 [micras] (F-01 y F-02). Estos se reemplazan cuando la caída de presión es de 20 [psi], midiendo con manómetros (PI-1 y PI-2). Entonces, se mide la conductividad (CT-1) y temperatura de alimentación (TT-1). La válvula v-05 es para muestreo. Y un medidor de vacío (PVI) para proteger la bomba (J-02).

Sigue la bomba de osmosis de 1,5 [kW], que usa un variador de frecuencia para aumentar el caudal de permeado cuando las membranas se ensucian, aumentando la presión del sistema. A la salida, hay un regulador de presión de 14,9 [bar], un transmisor de presión (PT-1) y el manómetro (PI-3). Luego, un presostato, se usa para apagar la bomba de osmosis en 16 [bar] y re-encender en 12 [bar], porque la tubería es de PPR 1 [in] PN16 [bar]. Y, la válvula v-07 funciona para la conexión de limpieza.

El flujo entra al módulo de membrana de osmosis (FM-01), de forma única o de forma paralela a los otros módulos, según la sección “Apertura de válvulas” (**Tabla 14**).

El flujo de salida de permeado en total suma 0,58 [m<sup>3</sup>/h] (FI-2), el cual se regula con las válvulas de aguja v-10, v-15, v-17 y v-19, abiertas al 50 [%]. Éste flujo llega al estanque de producto (TK-02). La tubería de permeado es de PVC de 1/2 [in].

La línea de rechazo es de PPR de 1/2 [in] con una caída de presión de 1 [bar] por cada carcasa, es decir, llega alrededor de 10 [bar] (PI-4 y PT-2). El rechazo se recircula al estanque, como en un proceso batch.

La conductividad (CT-1) usa una línea auxiliar, usando v-24 al v-28 (**Tabla 15**), para permeado, rechazo y alimentación, de 33 [μS/cm], 5400 [μS/cm] y 3800 [μS/cm], respectivamente.

Si el permeado es para beber, es necesaria la cloración hasta 0,6 [ppm] y remineralización con carbonato cálcico.

### 3.2.2 Apertura de válvulas

**Tabla 14**

*Apertura de válvulas en planta piloto*

<b>Entrada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Cerrar</b>
FM-1, FM-2, FM-3 y FM-4 en secuencia	v-08, v-14, v-16, v-18	v-09, v-11, v-12, v-13, v-20, v-21, v-22, v-23
FM-1, FM-2, FM-3 y FM-4 sin secuencia	v-08, v-14, v-16, v-18, v-09, v-11, v-12, v-13	v-20, v-21, v-22, v-23
FM-1 y FM-2 en secuencia	v-08, v-14, v-21	v-09, v-16, v-19, v-20
FM-1 y FM-2 sin secuencia	v-08, v-09, v-11, v-14, v-21	v-12, v-13, v-16, v-19, v-20
FM-1 y FM-2 secuencia con FM-3 y FM-4 secuencia	v-08, v-09, v-13, v-21, v-18	v-11, v-12, v-16, v-19, v-20, v-22, v-23
FM-01	v-08, v-21, v-22, v-23	v-09, v-11, v-14, v-15, v-16, v-20, v-19

*Nota. Mantener cerradas desde v-25 hasta v-29*

**Tabla 15**

*Apertura de válvulas para conductividad en planta piloto*

<b>Captar</b>	<b>Abrir</b>	<b>Cerrar</b>
Permeado FM-01	v-24	v-25 al v-29
Permeado FM-02	v-25	v-24, v-26 al v-29
Permeado FM-03	v-26	v-24, v-25, v-27 al v-29
Permeado FM-04	v-27	v-24 al v-26, v-28, v-29
Rechazo global	v-28	v-24 al v-27, v-29
Alimentación global	v-29	v-24 al v-28

*Nota. Considerar para la conductividad*

### 3.2.3 Lavado de membranas

Para el lavado se requiere:

- Cargar 150 [L] de agua en estanque de rechazo
- Agua de lavado de hasta 100 [ $\mu$ S/cm]
- Cargar con reactivos
- Presión 1,6 [bar] de alimentación
- Entrada en válvula v-07
- Recirculación entre entrada y salida de membranas.
- 1 hora de recirculación con solución de hidróxido de sodio y eliminar
- 2 hora de recirculación con solución de hidróxido de sodio y eliminar
- 1 hora de recirculación con solución de ácido cítrico dejando el pH en el valor de 4
- Flujo 10 [lpm]

Para los químicos se requiere:

- Solución ácida: 150 [g] de ácido cítrico en 150 [L].
- Solución básica: 900 [g] de hidróxido de sodio en 150 [L]

También, se requiere:

- Realizar flushing con agua de permeado durante 5 [min] tras la operación diaria.

### 3.2.4 Montaje de planta piloto

Se procede al montaje (Capex y Opex en **Anexo 8**), como se indica en la **Figura 35** y **36**.

**Figura 35**

*Montaje de la planta piloto en vista frontal*



**Figura 36**

*Montaje de la planta piloto en vista posterior*



### 3.3 Sistema de monitoreo parámetros operacionales

Figura 37

Planta piloto con sistema de monitoreo

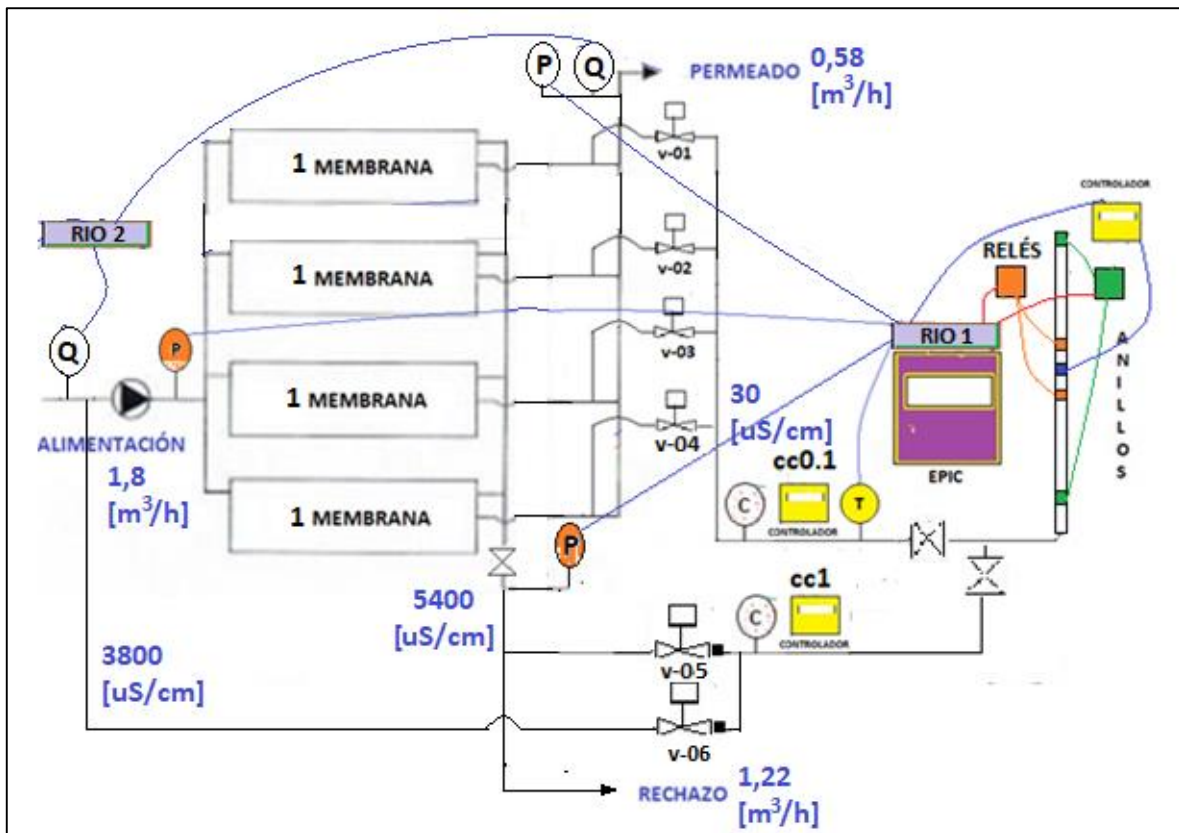


Tabla 16

Rangos operacionales en la planta piloto

Variable	Línea	Valor	Medidor
Conductividad	Alimentación	3.800	< 9.999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
	Permeado	30	< 999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
	Rechazo	5.400	< 9.999 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Presión	Pretratamiento	5,0	0 – 10 [bar]
	Alimentación	15	0 – 25 [bar]
	Rechazo	10	0 – 25 [bar]
	Permeado	1	0 – 5 [bar]
Caudal	Alimentación	1,80	0 – 6 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
	Permeado	0,58	0 – 2 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

La planta piloto de osmosis inversa se representa con el sistema de monitoreo (**Figura 37**). La celda de conductividad es de 1 etapa. Ésta opción consiste en el sistema de monitoreo por razón de productividad, con conductividades de rechazo y de alimentación (**Tabla 16**).

Requiere los siguientes sensores:

- 2 sensores de presión: alimentación y rechazo.
- 1 sensor multipunto con constante 0.1 y 1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] para salobre 10.000 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ].
- 1 sensor de temperatura
- 1 sensor de flujo de permeado

La forma de controlar requiere (**Tabla 17**):

- 1 procesador EPIC
- 1 controlador de conductividad
- 1 convertidor RIO de 8 canales, tiene 2 relés.
- 1 segundo RIO solo si se agregan caudalímetros en línea.
- 6 válvulas manuales. Para obtener flujo de la línea. Además, requiere un regulador de presión en v-05, para estar bajo 6 [bar].

La forma de calibrar el sensor de conductividad:

- 2 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] y 1 [ $\text{cm}^{-1}$ ]

También requiere:

- 1 canal analógico output para controlar el variador de la bomba.
- 2 canales digital output para encender bombas con botón.

**Tabla 17***Canales usados en RIO para control de planta piloto*

<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA] RIO 1	1	Controlador de conductividad cc0.1 y cc1
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de presión de permeado
	4	Transmisor de presión de rechazo
Entrada termistor resistor	5	Transmisor de temperatura de permeado
Salida digital On Off	6	Encendido bomba de pretratamiento
	7	Encendido bomba de osmosis
Salidas digitales con relé	9	Relé para celda: cc0.1
	10	Relé para celda: cc10
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA] RIO 2	1	Transmisor de flujo de alimentación
	2	Transmisor de flujo de permeado

Las conclusiones del capítulo 3, es que una planta piloto de osmosis inversa requiere una configuración modular con válvulas. Los detalles son:

- Capacidad de la planta: 0,58 [m<sup>3</sup>/h]
- Parámetro: 99,5 [%] eficiencia de rechazo de sales
- Norma producto: agua < 100 [μs/cm]
- Tipo membrana: TW30-4021 para agua de grifo
- Servicios:
  - Agua de grifo de 1,8 [m<sup>3</sup>/h]
  - Energía 2,6 [kWh/m<sup>3</sup>]
  - No utiliza químicos
- Costos capex y opex: 826 [CLP/m<sup>3</sup>]

El sistema de monitoreo se puede evaluar económicamente para instalar a nivel industrial.

## 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MONITOREO EN PLANTA INDUSTRIAL

El capítulo 4 consiste en la evaluación económica del sistema de monitoreo para una planta industrial de osmosis inversa. Por ejemplo, el consumo de agua superficial alcanza el 4 a 5 [%] del abastecimiento de la minería en Chile. Sin embargo, el desafío nacional es la disminución del 60 [%] del uso de aguas continentales hacia 2030. Para ello, de 25 desaladoras actuales, con la proyección nacional se espera llegar a 40 (Codelco, 2022).

En este sentido, se elige la planta desaladora la Chimba de la empresa Aguas Antofagasta S.A, en operación en la II región de Chile, según registro del 2010. (DGA,2015)

**Capacidad de la planta:** 600 [lps]

**Runtime:** 90 [%], porque la planta opera casi todo el año

**Norma de permeado:** 700 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] porque es para agua potable

**Norma de rechazo:** No tiene, pero la concentración no debe superar 2 veces la alimentación

**Intensión de diseño:** Control de sistema abierto

**El parámetro de la planta:** 99,5 [%] eficiencia de rechazo de sal.

- La concentración de entrada típica de agua de mar: 34.710 [ppm] (como 55 [%] cloruro, 33 [%] sodio y otros). La de permeado es 322 [ppm]
- La conductividad de entrada es 53.114 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. La de permeado es 693 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]

**Membranas:** 693 membranas por bastidor

- El tipo de membrana es SWC5-LD
- 8 bastidores en 1 etapa
- 24 sub-bastidores en total
- 33 tubos de presión en cada sub-bastidor
- 7 membranas en cada tubo

**Servicios:** consumo de 2,15 [kWh] cada 1 [m<sup>3</sup>] de permeado porque usa bomba de recuperación.

- El agua de mar de alimentación a la planta es: 5.142 [m<sup>3</sup>/h]
- El consumo de energía de la bomba de osmosis es de 565,5 [kW] con un 75 [%] de eficiencia y un flujo de 274 [m<sup>3</sup>/h] por bastidor
- El consumo de energía de la bomba de recuperación es de 14,7 [kW] con un 75 [%] de eficiencia y un flujo de 369 [m<sup>3</sup>/h] por bastidor

**Costos operación (opex):**

- 25 años de operación
- El costo energético es el 53 [%] de los costos operacionales. Con un costo de 527 [CLP/m<sup>3</sup>], tomando como referencia una planta de 7200 [kW] que produce 500 [lps] con un costo tarifario de 132 [\$/kWh]
- El costo de mantención, por tanto, es un 47[%], es decir, 467 [CLP/m<sup>3</sup>]:
  - En membranas representa un 17 [%]
  - En reactivos representa un 17 [%]
  - En operadores representa un 7 [%]
  - En repuestos representa un 6 [%]

**Costos de inversión (capex):**

- La inversión se estima en un 14 [%] del costo Capex y Opex, esto es 162 [CLP/m<sup>3</sup>] producido.

**Químicos de pretratamiento:**

- Ácido Sulfúrico al 95 [%] con un consumo de 540 [kg/h]
- Bisulfito de sodio al 33 [%] con un consumo de 31,2 [kg/h]
- Hipoclorito de Sodio al 10 [%] con un consumo 51,4 [kg/h]
- Hexametáfosfato de Sodio al 10 [%] con un consumo de 5,14 [kg/h]

**Químicos de postratamiento:** para el consumo potable

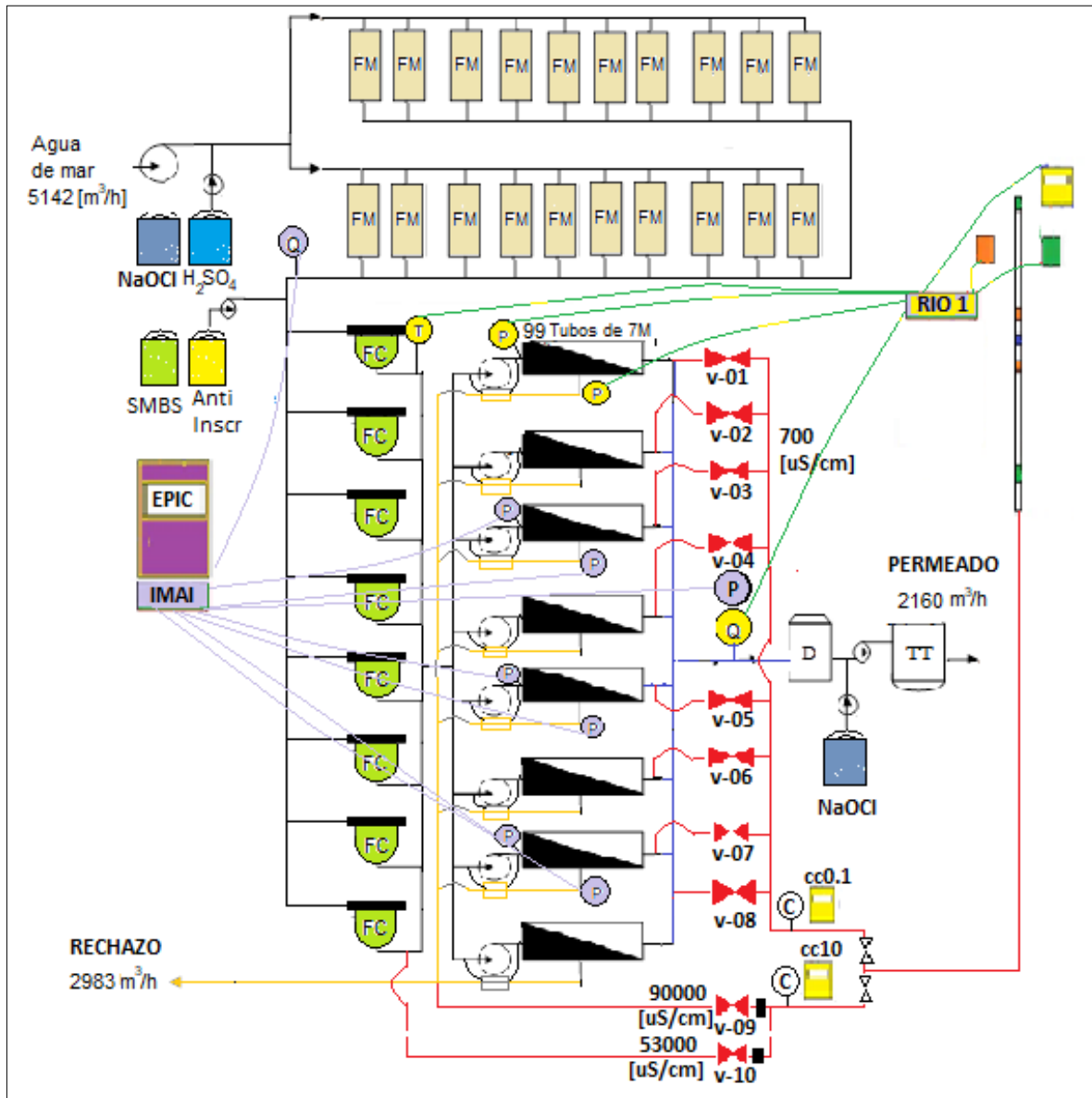
- Hipoclorito de Sodio al 10 [%] con un consumo de 43,2 [kg/h] en el permeado.

**Químicos de lavado de membranas:** en agua de lavado de 100 [μS/cm] con un consumo de 3,5 [m<sup>3</sup>], flujo de 2 [m<sup>3</sup>/min] y 2 [bar] de presión por bastidor.

- Línea base de 1 lavado anual
- Mejora de 4 lavados anuales
- El lavado con Hidróxido de Sodio es agregar 6 [kg/m<sup>3</sup>]
- El lavado con Ácido Cítrico es agregar 1 [kg/m<sup>3</sup>]

Figura 38

Planta desaladora industrial



La planta industrial de osmosis inversa en la **Figura 38**, tiene una celda de conductividad que consiste en el sistema de monitoreo por paso de sal, flujo de permeado, caída de presión, razón de productividad y conductividades: rechazo y alimentación (**Tabla 18**). Se obtienen flujos para conductividades con 10 válvulas correspondientes.

**Tabla 18**

*Canales usados en RIO e IMAI-8 para planta industrial*

<b>Tipo de canales</b>	<b>Canales</b>	<b>Sensores</b>
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA] RIO 1	1	Controlador de conductividad cc0.1 y cc10
	2	Transmisor de presión de alimentación
	3	Transmisor de caudal de permeado
	4	Transmisor de presión de rechazo
Entrada termistor resistor	5	Transmisor de temperatura de alimentación
Salidas digitales con relé	9	Relé para celda: cc0.1
	10	Relé para celda: cc10
Entradas Analógicas 4 a 20 [mA] IMAI-8	1	Transmisor de flujo de alimentación
	2	Transmisor de presión de permeado
	3	Transmisor de presión alimentación 03
	4	Transmisor de presión rechazo 03
	5	Transmisor de presión alimentación 05
	6	Transmisor de presión rechazo 05
	7	Transmisor de presión alimentación 07
	8	Transmisor de presión rechazo 07

#### 4.1 Costos de inversión incumbentes

Por tanto, el costo en monitoreo requiere los siguientes sensores:

- 1 sensor multipunto con constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y constante 10 [cm<sup>-1</sup>]
- 8 sensores de presión PN80 [bar]: 4 para alimentación y 4 para rechazo.
- 1 sensor de presión de permeado de 1 [bar]
- 2 sensores de caudal: permeado y alimentación
- 1 sensor de temperatura

La forma de controlar requiere:

- 1 equipo EPIC
- 1 controlador de conductividad
- 1 equipo IMAI-8: 8 canales de entrada analógica
- 1 equipo RIO: 4 canales analógicos, 1 termistor, 2 relé.
- 9 válvulas de baja presión, que, permite obtener un flujo mínimo de la línea
- 1 válvulas de alta presión PN80 [bar]: rechazo
- 1 regulador de presión, bajo 6 [bar], para válvula de alta presión
- Línea auxiliar para la planta

La forma de calibrar el sensor de conductividad:

- 2 sensor de referencia de conductividad de constante 0.1 [cm<sup>-1</sup>] y 10 [cm<sup>-1</sup>]

Por ello, se estima costos de inversión en instrumentación, cableado e instalación.

#### 4.1.1 Adquisición de instrumentos y válvulas

**Tabla 19**

*Adquisición de instrumentos planta industrial*

<b>Instrumento</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo neto [CLP]</b>	<b>Total acumulado [CLP]</b>
Controlador de conductividad	3	1.320.000	1.320.000
Sensor de referencia cc10	1	460.000	1.780.000
Sensor de referencia cc0.1	1	320.000	2.100.000
Sensor de diseño cc10 y cc0.1	1	1.000.000	3.100.000
Transductor de presión y fuente	9	1.800.000	4.900.000
Sensor de caudal	2	4.000.000	8.900.000
Sensor de temperatura	1	70.000	8.970.000
Groov EPIC, chasis y fuente	1	2.800.000	11.770.000
Groov RIO	1	1.600.000	13.370.000
Groov IMAI-8	1	1.800.000	15.070.000
Válvulas PN10	9	90.000	15.160.000
Válvula PN80 y regulador	1	700.000	15.860.000

Nota. 871,25 [CLP/ USD].

El costo de instrumentos, válvulas y controladores, asociado al nuevo sistema de control de lazo abierto, se observa en la **Tabla 19**. Y se desprende que el costo es de 15.860.000 [CLP]. Los cuales tienen un costo de instalación.

#### 4.1.2 Instalación y puesta en marcha

**Tabla 20**

*Costos de instalación del sistema de control*

Tipo de servicio	Costo neto [CLP]	Costo acumulado [CLP]
32 Horas Hombre Instalador	2.560.000	2.560.000
Cableado y tubería	580.000	3.140.000
12 Horas Hombre Ingeniero	960.000	4.000.000

El costo de instalación de la **Tabla 20**, en cuanto a mano de obra e insumos, tiene los siguientes datos supuestos, equivalente a horas hombre y materiales de instalación:

- 40.000 [CLP/h] instalador
- 80.000 [CLP/h] ingeniero

La cantidad de horas requeridas, está en base a los siguientes supuestos:

- 200.000 [CLP] por punto de caudal: 2 = 400.000 [CLP]
- 300.000 [CLP] por sensor de conductividad diseñado: 1 = 300.000 [CLP]
- 100.000 [CLP] por sensor de referencia: 2 = 200.000 [CLP]
- 100.000 [CLP] por controlador de conductividad: 3 = 300.000 [CLP]
- 50.000 [CLP] por punto de temperatura: 1 = 50.000 [CLP]
- 50.000 [CLP] por punto de presión: 9 = 450.000 [CLP]
- 200.000 [CLP] por IMAI: 1 = 200.000 [CLP]
- 200.000 [CLP] por RIO: 1 = 200.000 [CLP]
- 250.000 [CLP] por EPIC: 1 = 250.000 [CLP]
- 150.000 [CLP] por válvula PN10 y tubería 9 = 1.350.000 [CLP]
- 300.000 [CLP] por válvula PN80 y regulador inc/tubería: 1 = 300.000 [CLP]

Los insumos requeridos son:

- 10.000 [CLP] por cableado por punto: 21 = 210.000 [CLP]
- 30.000 [CLP] por tubería cada válvula PN10: 9 = 270.000 [CLP]
- 100.000 [CLP] por tubería cada válvula PN80: 1 = 100.000 [CLP]

El total de instalación son 4.000.000 [CLP].

Luego, hay un costo por la capacitación al personal y computadores requeridos.

### 4.1.3 Capacitación y computadores

**Tabla 21**

*Costo de capacitación y computadores*

<b>Tipo de costo</b>	<b>Costo neto [CLP]</b>	<b>Costo acumulado [CLP]</b>
Capacitación de 16 Horas	800.000	800.000
Manuales	200.000	1.000.000
Computadores 4	4.000.000	5.000.000

Nota. 871,25 [CLP/USD].

El costo indicado en la **Tabla 21** usa los siguientes datos supuestos:

- 50.000 [CLP] por hora de ingeniero charlista
- 200.000 [CLP] por manual de operación e instrumentos
- Computadores de 10 [años] de vida útil para 2 ingenieros de planta

#### 4.1.4 Equipos e instalación de lavado

Tabla 22

*Equipos e instalación de lavado*

Equipo extra	Vida útil [años]	Cantidad	Costo [\$]	Costo Acumulado [\$]
Sensor de pH	5	4	400.000	400.000
Estanque de 5 [m <sup>3</sup> ]	25	8	8.000.000	8.400.000
Bomba 2 [m <sup>3</sup> /min] 2 [bar] 10 [kW]	25	4	12.000.000	20.400.000
Materiales y mano de obra			6.000.000	26.400.000

En resumen, los costos iniciales incumbentes estimados son 51.260.000 [CLP]:

- Equipos: 15.860.000 [CLP]
- Instalación y puesta en marcha: 4.000.000 [CLP]
- Capacitación y computadores: 5.000.000 [CLP]
- Equipos e instalación de lavado: 26.400.000 [CLP]

Luego, existen costos operativos requeridos.

## 4.2 Costos operativos incumbentes

### 4.2.1 Mantenimiento, consumibles y repuestos

Tabla 23

*Costo de mantenimiento y repuestos*

Instrumento	Vida útil [años]	N° de reemplazos	Costo reemplazo total [CLP]	Total acumulado [CLP]
Controlador de conductividad	10	6	3.240.000	3.240.000
Sensor de referencia cc10	10	2	1.120.000	4.360.000
Sensor de referencia cc0.1	10	2	840.000	5.200.000
Transductor de presión y fuente	10	18	4.500.000	9.700.000
Sensor de caudal	10	4	8.800.000	18.500.000
Sensor de temperatura	10	2	240.000	18.740.000
Groov EPIC, chasis y fuente	10	2	6.100.000	24.840.000
Groov RIO	10	2	3.600.000	28.440.000
Groov IMAI-8	10	2	4.000.000	32.440.000
Válvulas PN10	10	18	5.760.000	38.200.000
Válvula PN80 y regulador	10	2	2.000.000	40.200.000
Sensor de diseño cc10 y cc0.1	0,5	50	65.000.000	105.200.000

El costo de mantenimiento y repuestos considera los siguientes datos supuestos:

- 25 años de vida útil de la planta
- 65.000.000 [CLP] sensor de diseño: 2.600.000 [CLP/año]
- 40.200.000 [CLP] otros sensores:
  - Año 10: 20.100.000 [CLP]
  - Año 20: 20.100.000 [CLP]

Luego existe el costo de energía y otros servicios.

#### 4.2.2 Energía e internet

Tabla 24

Consumo de energía de instrumentos

Equipo	Unidad	Potencia [W]	Consumo [kWh]	Acumulado [kWh]
Controlador de conductividad	1	10	0,010	0,010
Transmisor de presión	8	10	0,080	0,090
Caudalímetro	2	10	0,020	0,110
Groov IMAI	3	1,4	0,004	0,114
Groov RIO	1	10	0,010	0,124
Groov EPIC	1	7,1	0,007	0,131

El consumo de energía se detalla en la **Tabla 24**. Basándose en los datos:

- 156 [CLP/kWh] Tarifa Baja Tensión 3
- 24 horas al día y 30 días al mes con un 90[%] del tiempo en producción

El consumo de energía es 0,131 [kWh].

- $Energía \left[ \frac{CLP}{año} \right] = 0,131 [kWh] \cdot 24 \left[ \frac{h}{d} \right] \cdot 30 \left[ \frac{d}{m} \right] \cdot 12 \left[ \frac{m}{año} \right] \cdot 156 \left[ \frac{CLP}{kWh} \right] \cdot 0,90$

Es equivalente a un costo de energía de 160.000 [CLP/año]. Y, 140.000 [CLP/año] por un plan de internet para los datos.

Luego, existe un costo de operar el lavado.

### 4.2.3 Operación de lavado

Tabla 25

*Costo anual por lavado de planta industrial*

Insumo o servicio	Cantidad recirculación al año	Gasto [m <sup>3</sup> ] o [kg] o [kWh]	Costo unitario [\$/año]	Acumulado [\$/año]
Hidróxido de sodio	6	1008	2.400.000	2.400.000
Ácido Cítrico	3	84	200.000	2.600.000
Agua de permeado	9	252	500.000	3.100.000
Energía bombas	48 horas	1920	250.000	3.350.000

El lavado tiene las siguientes características:

- 3,5 [m<sup>3</sup>] por bastidor
- 100 [μS/cm]
- 1 [m<sup>3</sup>/min]
- 2 [bar] de presión
- Línea base: 1 lavado anual
- Mejora: 4 lavados anuales
- Recirculación entre entrada y salida de membranas:
  - 1 hora con Hidróxido de Sodio agregando 6 [kg/m<sup>3</sup>]. Luego eliminar.
  - 2 horas con Hidróxido de Sodio agregando 6 [kg/m<sup>3</sup>]. Luego eliminar
  - 1 hora con Ácido Cítrico agregando 1 [kg/m<sup>3</sup>]. El pH en el valor 4.

El costo de lavado es 3.350.000 [CLP/año]. Requiere, un costo de personal.

#### 4.2.4 Costos de personal

**Tabla 26**

*Costo de personal para sistema de control*

<b>Tipo de costo</b>	<b>Costo [CLP/año]</b>	<b>Costo acumulado [CLP/año]</b>
Junior	25.200.000	25.200.000
Ingeniero	36.000.000	61.200.000

La **Tabla 26** toma en cuenta estos datos supuestos:

- 3 Junior: unitario 700.000 [CLP/mes]
- 2 Ingeniero: unitario 1.500.000 [CLP/mes]

#### 4.2.5 Costos de pérdida de producción

**Tabla 27**

*Costo de pérdida de producción*

Tipo de costo	Costo [CLP]	Costo acumulado [CLP/año]
12 horas	30.000.000	30.000.000

La **Tabla 27** toma en cuenta estos datos supuestos:

- 12 horas de lavado en el año son pérdida de producción
- 1156 [CLP/m<sup>3</sup>] perdidos (capex y opex de la planta)
- 2160 [m<sup>3</sup>/h] perdido

En resumen, los costos operativos incumbentes son:

- 2.600.000 [CLP/año] en sensor diseñado
- 20.100.000 [CLP/10 años] en resto de instrumentación
- 160.000 [CLP/año] en energía de instrumentos
- 140.000 [CLP/año] en internet
- 3.350.000 [CLP/año] en operación de lavado
- 61.200.000 [CLP/año] en personal
- 30.000.000 [CLP/año] pérdida de producción por lavado

### 4.3 Ingresos incumbentes

#### Ecuación 10

*Ingreso incumbente por membranas*

$$R_m = \frac{(24 - 22) \cdot 693[\text{membrana}] \cdot 950.000 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{membrana}} \right]}{24 \left[ \frac{\text{h}}{\text{d}} \right] \cdot 365 \left[ \frac{\text{d}}{\text{años}} \right] \cdot 25[\text{años}] \cdot 270 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot 0,90}$$

Usando los siguientes datos y supuestos:

- La vida útil de membranas actual de 12 [meses]
  - 24 [reemplazos] en 25 años
- La vida útil de membranas futura es 13 [meses]
  - 22 [reemplazos] en 25 años.
  - Con un lavado es posible aumentar 4 meses de operación (Humire, 2009). Éste estudio, elige por 1 mes más.
- Costo por membrana: 950.000 [CLP]
- 693 [membranas] por bastidor
- 8 bastidores en planta
- 270 [m<sup>3</sup>/h] de capacidad por bastidor

Entonces, la planta tiene:

- Ingreso de 24,8 [CLP/m<sup>3</sup>].
- Ingreso incumbente de 421.344.000 [CLP/año]

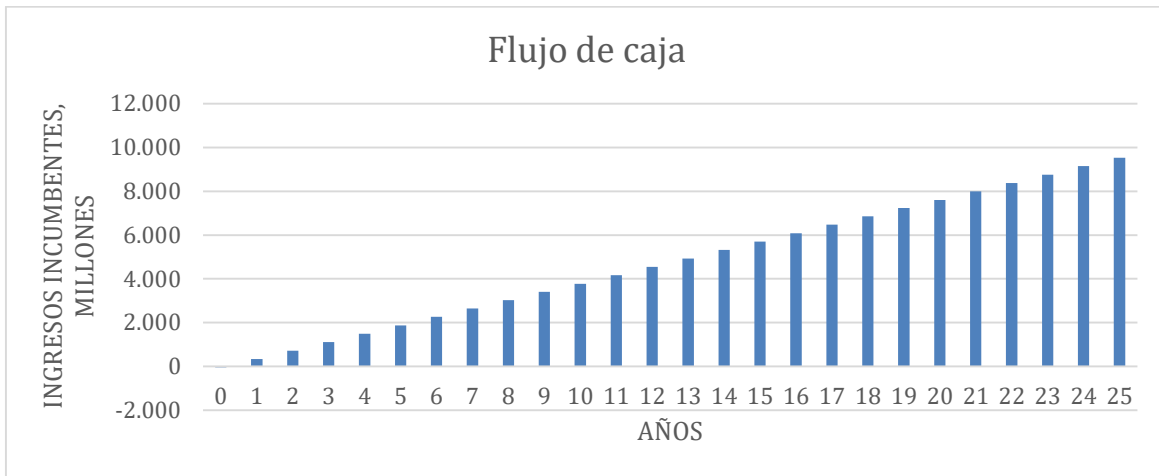
#### 4.4 Análisis de flujo de caja

Usando datos y supuestos como:

- Tasa de descuento 8 [%] (Schroer, 2015).
- 25 años de operación
- El ingreso incumbente por membranas es 421.344.000 [CLP/año]
- El capex incumbente son 51.260.000 [CLP]:
  - Instrumentos: 15.860.000 [CLP]
  - Instalación y puesta en marcha: 4.000.000 [CLP]
  - Capacitación: 5.000.000 [CLP]
  - Equipos de limpieza: 26.400.000 [CLP]
- Los costos operativos incumbentes son:
  - Sensor diseñado: 2.600.000 [CLP/año]
  - Energía eléctrica instrumentación: 160.000 [CLP/año]
  - Internet: 140.000 [CLP/año]
  - Limpieza: 3.350.000 [CLP/año]
  - Reemplazos de instrumentación 20.100.000 [CLP/10 años]
  - Personal: 61.200.000 [CLP/año]
  - Pérdida de producción por lavado 30.000.000 [CLP/año]

**Figura 39**

*Flujo de caja incumbente de sistema de control*



El modelo de flujo de caja de 25 [años] que se proyecta en la **Figura 39 (Anexo 9)**.

**Retorno de la inversión:** El tiempo necesario es de 1 [año] para recuperar la inversión inicial, a través de extender la vida útil de membranas desde 12 a 13 [meses].

**Valor presente neto y tasa interna de retorno:** El retorno económico es favorable, que se traduce en un Índice de Valor Actual Neto (IVAN) de 72, un Valor Actual Neto (VAN) de 3.693 [millones] en 25 [años], una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 751 [%], utilizando una tasa de descuento del 8 [%] y una inversión de 51 [millones].

## CONCLUSIONES

El sistema de control abierto basado en el sensor de conductividad multipunto ha sido evaluado técnicamente viable para mejorar el control de operación en plantas de ósmosis inversa. La integración a una fase piloto, permitirá aportar gráficos de los parámetros de ensuciamiento razón de productividad, conductividades de rechazo y alimentación y caída de presión.

El presente estudio contiene un proyecto en un entorno de laboratorio TRL 4 para estudiar fallas operacionales de planta, con resultados económicos que concuerdan en avanzar a un entorno relevante TRL 5 (Mankis, 1995).

La planta piloto de ósmosis inversa se ha implementado con una configuración modular con cuatro membranas TW30-4021, una capacidad de 576 [lph], presión de 15 [bar], tratamiento de conductividad de entrada de 3.800 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y un permeado de 33 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]. Se recomienda la puesta en marcha para una recuperación hasta 32 [%], y validar a diferentes aperturas de válvulas para cambiar calidad de permeado.

El sensor de conductividad se considera fabricar en tubería de PVC de 40 [mm] y anillos de acero 318, con celda de 3 anillos y constante 0,1 [ $\text{cm}^{-1}$ ], 1 [ $\text{cm}^{-1}$ ] y 10 [ $\text{cm}^{-1}$ ]. Se recomienda realizar pruebas para demostrar la capacidad de soportar una presión de 6 [bar] y una resolución de 2 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ], pues el sensor debe ofrecer una respuesta precisa, para el monitoreo en línea. El sensor muestra una herramienta para el monitoreo de la conductividad en diferentes puntos del proceso.

El sistema de control evaluado usa Groov RIO, IMAI-8 y EPIC en planta industrial. Además, se define el control abierto con 10 válvulas para la conductividad de 8 bastidores en una planta de capacidad de 600 [lps]. Estimando una reducción del reemplazo de membranas desde 24 a 22 cambios en 25 [años], pues la detección anticipada de incrustaciones mejora la vida útil de las membranas con un aumento en la frecuencia de lavado.

La evaluación técnica y económica del caso de estudio, es la incorporación del sistema de monitoreo en una planta de osmosis inversa de Antofagasta que produce 2160 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] de permeado, con 5.544 [membranas] de 950.000 [CLP/elemento]. La extensión de la vida útil de las membranas desde 12 a 13 [meses] y el aumento del costo por lavado presentan un caso económico favorable, con un IVAN de 72, un TIR de 751 [%], un costo de inversión de 51 [millones] para medir 10 puntos de conductividad con una celda.

## RECOMENDACIONES

Para lanzar un start-up en tecnología de ósmosis inversa, se aconseja lo siguiente:

- 1) La certificación de la tecnología con normativas nacionales e internacionales. Porque la credibilidad puede facilitar la entrada al mercado.
- 2) Registrar patente para el diseño del sensor de conductividad y el sistema de control.
- 3) Aplicar el prototipo a escala real para demostrar la funcionalidad y los beneficios de la tecnología en condiciones industriales. Para que pueda convencer a inversores.
- 4) Establecer alianzas entre la start-up y empresas de tecnología, universidades y centros de investigación. Porque mejora la propuesta de valor.
- 5) Enfocar el mercado objetivo en la industria minera, el tratamiento de aguas municipales y/o la agricultura.
- 6) Desarrollar un modelo de negocio. Para ofrecer soluciones y mejoras específicas para plantas existentes.
- 7) Preparar un plan de financiamiento para atraer inversión de capital de riesgo o subvenciones gubernamentales, destacando el retorno de inversión.
- 8) Implementar una estrategia de comercialización que incluya demostraciones en sitio, estudios de caso y pruebas piloto.
- 9) Ofrecer capacitación y soporte técnico para garantizar la correcta instalación, operación y mantenimiento. Porque mejora la experiencia del cliente y la confiabilidad del producto.
- 10) Establecer un mecanismo para recibir retroalimentación continua de los usuarios y aplicar un enfoque de mejora continua para la tecnología y los servicios ofrecidos.

Con estas recomendaciones, se aconseja crear un start-up basado en el monitoreo de ósmosis inversa en línea.

## REFERENCIAS

- Baeza, E. (2022). Plantas desaladoras en Chile. Asesoría Técnica Parlamentaria, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, página 2.
- Banadaki, S. (2022). Application of Deep Learning in Process Fault Diagnosis, Modelling and Optimization, Canadá, Página 68.  
<https://era.library.ualberta.ca/items/a214b448-da08-4211-bc7e-02f3cc2fa99c>
- Banisi, S. (1994). On-use phase holdup measurement and analysis in flotation columns. Tesis de doctorado, Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal, Canada. sección 3.3.3.  
<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/sf2686701>
- Cloete, N. Malekian, R. Nair, L. (2016). Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring. IEEE Access, Volumen 4, páginas 3986-3987.  
[DOI:10.1109/ACCESS.2016.2592958](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2592958)
- Cochilco. (2022). Desal overview in the Chilean mining. Global Water Summit, página 8.  
<https://www.cochilco.cl/Presentaciones/Presentacion%20Global%20Water%20Summit%20mayo%202022.pdf>
- Cortés-López, F. (1998). Design a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis. Tesis de Magister, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, páginas 8-13, 31-35, 45-48, 72.  
<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/Or967584j>
- Di Martino, M. Avraamido, S. Pistikopoulos, E. (2022). A Neural Network Based Superstructure Optimization Approach to Reverse Osmosis Desalination Plants. USA. Página 2.  
<https://www.mdpi.com/2077-0375/12/2/199>
- Dupont. (2021). Filmtec Membranes. Product data sheet, 45-D01525-en, página 2.  
<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-FilmTec-Small-Commercial-PDS-45-D01525-en.pdf>
- Dupont. (2022). Membrane System Design Guidelines for Midsize FilmTec™ Elements. Tech Manual Excerpt, página 2.  
<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Membrane-Sys-Design-Guidelines-Midsize-Manual-Exc-45-D01588-en.pdf>
- Dupont. (2023). FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. páginas 23, 36, 60, 126-136.  
<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>
- Humire, L. (2009). Optimización operacional planta osmosis inversa Minera Radomiro Tomic. Tesis de pregrado, Universidad Católica del Norte, Antofagasta.
- Hydranautics. (2022). ESPA2-LD-4040. Membranes, página 1.  
[https://pureaqua.com/hydranautics-esp2-ld-4040-membrane/?keyword=esp2-ld-4040&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=Hydranautics&gad=1&gclid=CjwKCAiA3aeqBhBzEiwAxFiOBm8t1jT\\_g6ymooLgkfyB1sFGre09BMip-XkffqheHdZr6z6jQ3\\_DBoC\\_OwQAvD\\_BwE](https://pureaqua.com/hydranautics-esp2-ld-4040-membrane/?keyword=esp2-ld-4040&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Hydranautics&gad=1&gclid=CjwKCAiA3aeqBhBzEiwAxFiOBm8t1jT_g6ymooLgkfyB1sFGre09BMip-XkffqheHdZr6z6jQ3_DBoC_OwQAvD_BwE)
- Hydranautics. (2023). Límites de diseño en unidades métricas. Membranes, Software de Diseño de Soluciones de Membranas Integral, página 1.

Karimanzira, D. Rauschenbach, T. (2021). Performance Prediction of a Reverse Osmosis Desalination System Using Machine Learning. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Alemania, páginas 54-56.

[www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=110684](http://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=110684)

Mankins, J. (1995). Technology readiness level - A white paper. Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA, Página 28.

[https://www.researchgate.net/publication/247705707\\_Technology\\_Readiness\\_Level\\_-\\_A\\_White\\_Paper](https://www.researchgate.net/publication/247705707_Technology_Readiness_Level_-_A_White_Paper)

Nazif, S. Mirashrafi, E. Roghani, B. Bidhendi, N. (2020). Artificial Intelligence–Based Optimization of Reverse Osmosis Systems Operation Performance. *Irán, Journal of Environmental Engineering*, páginas 5-8.

<https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001613>

Opto22. (2018). Groov Epic Processor Data sheet, Form 2245-220422

Opto22. (2021). Groov Rio User's guide. Form 2324, GRV-R7-MM1001-10, 6.

[https://documents.opto22.com/2324\\_groov\\_RIO\\_Users\\_Guide.pdf](https://documents.opto22.com/2324_groov_RIO_Users_Guide.pdf)

Pure Aqua, Inc. Membranas 8" de Toray Para Agua de Mar.

<https://es.pureaqua.com/toray-8-membranas-agua-de-mar/>

Salinas-Rodríguez, S. Kennedy, M. Schippers, J. (2021). Process design of reverse osmosis systems. *Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling*, página 258.

[DOI:10.2166/9781780409863\\_0243](https://doi.org/10.2166/9781780409863_0243)

Srivastava, S. Vaddadi, S., Kumar, P. y Sadistap, S. (2018). Design and development of reverse osmosis (RO) plant status monitoring system for early fault prediction and predictive maintenance. *Applied Water Science*, 8, página 159.

<https://doi.org/10.1007/s13201-018-0821-8>

Tavera, F. (1996). Flow cells to measure electrical conductivity: use in estimating gas holdup in flotation systems. Tesis de doctorado, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, páginas 13, 28, 48, 54-56.

<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/Op096885m>

Trus, I. Gomelya, M. Halysh, V. Skiba, M. (2022). Effect of stabilization treatment of water on the quality of its reverse osmotic desalination. *Water supply and wastewater disposal*, Lublin, página 324.

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47916>

UNEP (2008) Desalination Resource and Guidance Manual for Environmental Impact Assessments. United Nations Environment Programme, Regional Office for West Asia, Manama, and World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, Cairo, ISBN: 978-92-807-2840-8, página 67.

<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/30011>

Zuñiga, F. (2017). Análisis de factibilidad de una planta desalinizadora en la localidad de Los Molles, provincia de Petorca. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de obras civiles, página 37.

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23336/3560900257179UTFSM.pdf?sequence=1>

## ANEXOS

### A1 – Aproximación de número de membranas en Chile

La aproximación (**Figura 40**) indica que: “23 plantas en Chile en 2021 operan aproximadamente con 30.000 [membranas] que producen 5.600 [lps]” (Baeza, 2022). La regresión (**Ecuación 11**) equivale a producir 0,19 [lps] por cada 1 [membrana] de 8 [in].

#### Ecuación 11

*Regresión número de membranas según producción*

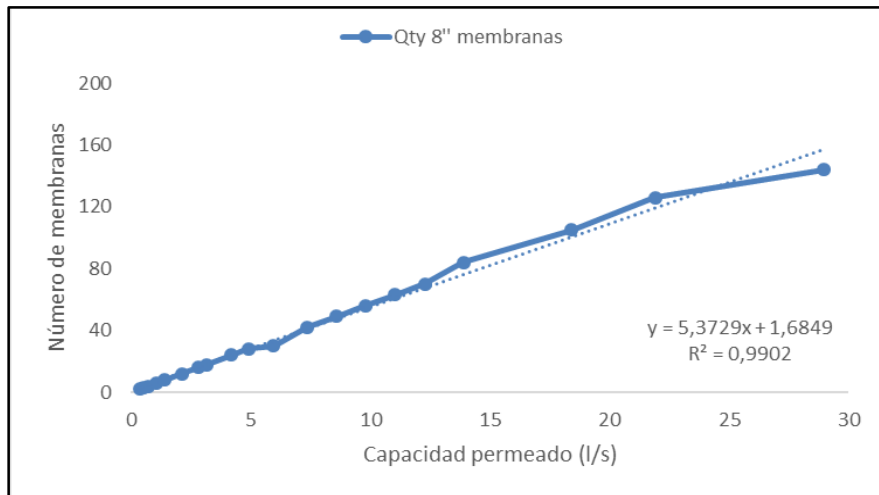
$$N = 5,3729 \cdot Q + 1,6849$$

N: Número de membranas de 8 [in] para agua de mar.

Q: Producción de la planta, [lps].

#### Figura 40

*Proyección número de membranas según producción de permeado*



*Nota.* Adaptado de Análisis de factibilidad de una planta desalinizadora en la localidad de Los Molles, provincia de Petorca, por Zuñiga, 2017.

## A2 – Fórmulas para diseño de celda de conductividad

La conductancia y conductividad es función según la **Ecuación 12** y **Ecuación 13**

### Ecuación 12

*Conductancia función de resistencia*

$$\frac{I}{V} = \frac{1}{R} = K$$

### Ecuación 13

*Conductividad función de constante*

$$Cc = \frac{A}{L} = K/k$$

Conductividad [S/m], k.

Conductancia [S], K.

**Tabla 28***Fórmulas de diseño del sensor de conductividad*

Variable	Sigla	Unidad	Comentario
Diámetro interno	D	cm	Elección
Ancho anillo	W	cm	Elección
Largo entre electrodo	L	cm	Elección
Área electrodo	$A_w$	$\text{cm}^2$	$A_w = \pi \cdot D \cdot W$
Área transversal flujo	A	$\text{cm}^2$	$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$
Constante de celda	$C_c$	cm	$\frac{A}{L}$
Conductividad mínima	$C_{\min}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Elección
Conductividad máxima	$C_{\max}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Elección
Resistencia mínima	$R_{\min}$	Ohm	$\frac{L}{A \cdot C_{\max}}$
Resistencia máxima	$R_{\max}$	Ohm	$\frac{L}{A \cdot C_{\min}}$
Conductancia máxima		S	$\frac{1}{R_{\min}}$
Conductancia mínima		S	$\frac{1}{R_{\max}}$
Voltaje AC producido		V	Elección
Resistencia en serie		Ohm	Elección

*Nota.* Adaptado de Design a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis, por Cortés, 1998. Adaptado de Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring, por Cloete et. al., 2016.

**Problemas de inestabilidad de constante de celda**, aunque, la constante es casi independiente de la conductividad del líquido en el rango de medición (**Figura 41, Figura 42, Figura 43**).

**Figura 41**

*Mayor distancia entre electrodos mejora constante*

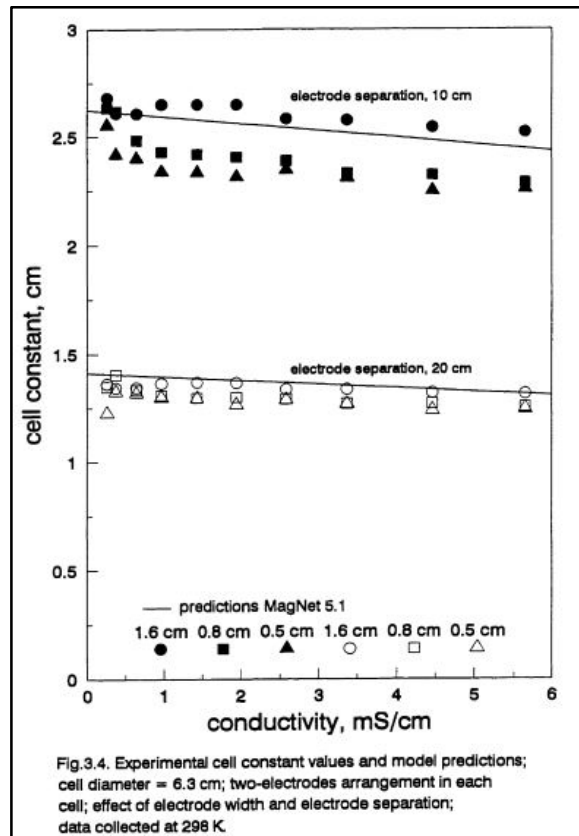
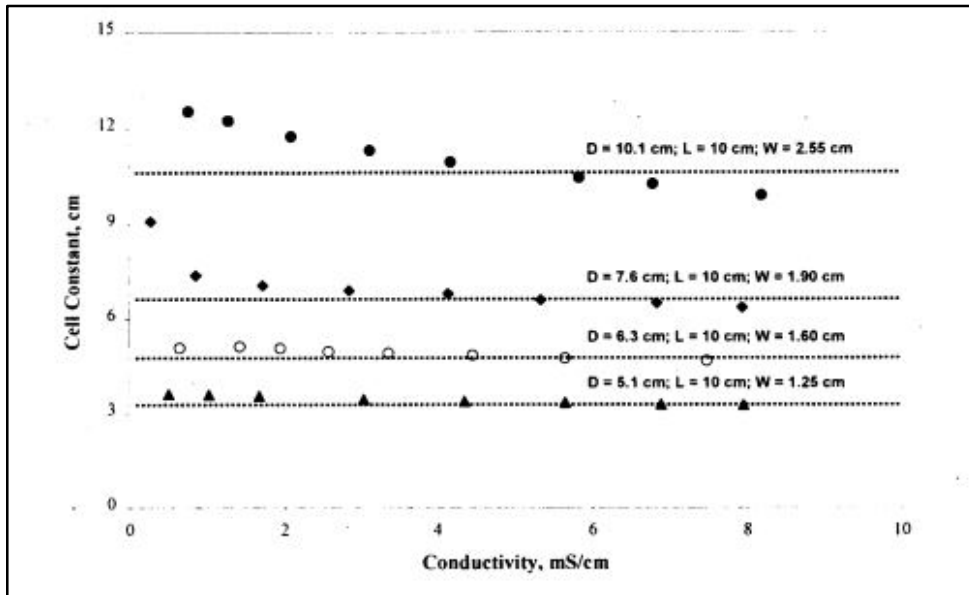


Fig.3.4. Experimental cell constant values and model predictions; cell diameter = 6.3 cm; two-electrodes arrangement in each cell; effect of electrode width and electrode separation; data collected at 298 K.

*Nota.* Reproducido de Flow cells to measure electrical conductivity: use in estimating gas holdup in flotation systems, por Tavera, 1996, pág. 32

**Figura 42**

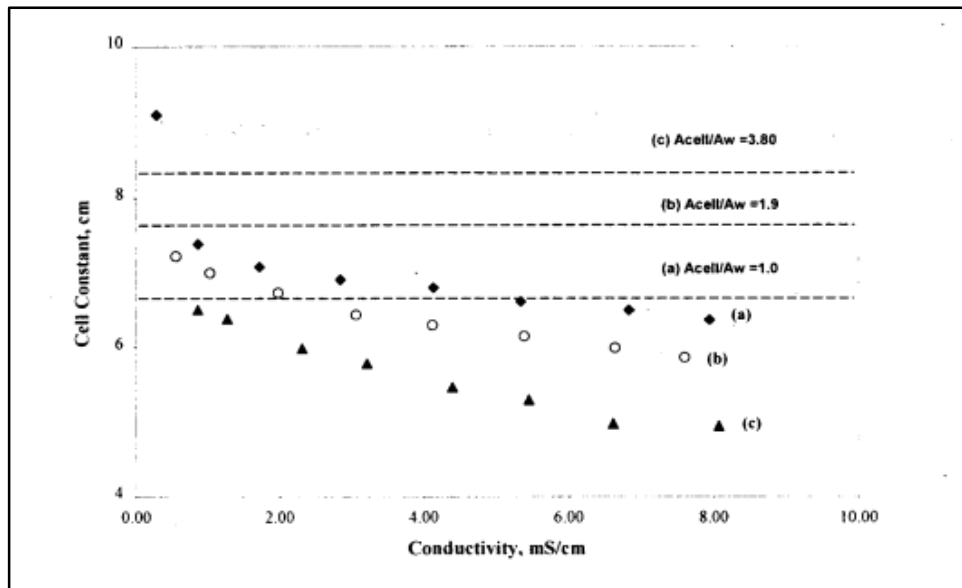
*Constante de celda mejora en función del ancho y diámetro*



*Nota.* Reproducido de Design a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis, por Cortés, 1998.

**Figura 43**

*Constante de celda mejora en función de razones de áreas*



*Nota.* Reproducido de Design a Gas Holdup Sensor for Flotation Diagnosis, por Cortés, 1998.

### A3 – Complementos para celda de conductividad

Figura 44

Versión original de celda de conductividad

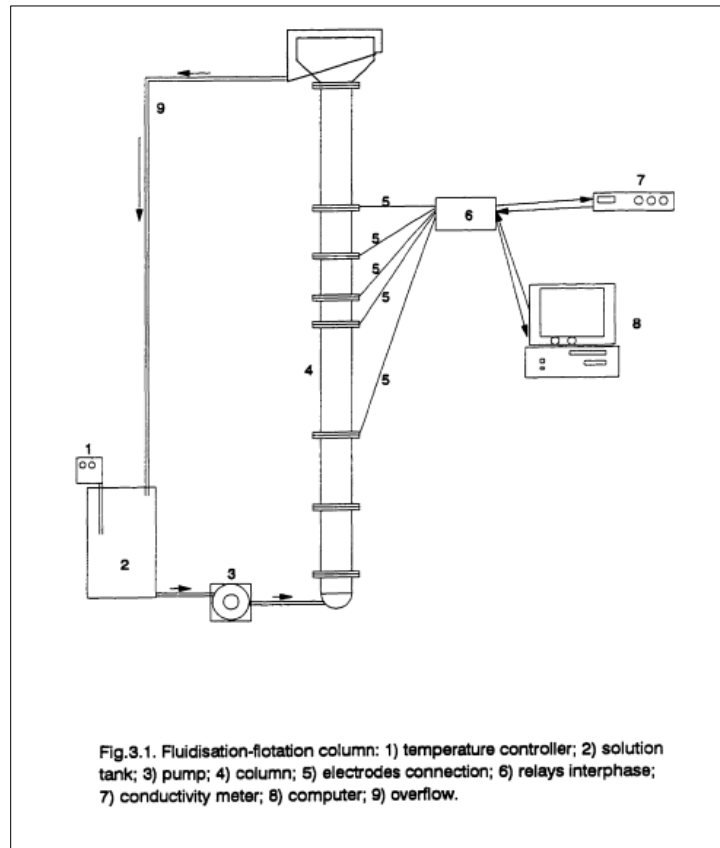


Figura 45

Medidor de conductividad Hanna 8633

 <p><b>450.000 CLP c/i.v.a. (abril 2024)</b></p>	<p>Con sonda de 4 anillos</p> <p>Lectura compensada por temperatura</p> <p>Mide 0-199 [mS/cm](+-1%)</p> <p>Portatil</p>
---	---

Nota. Adaptado de Medidor de CE, por Hannachile, 2024

## A4 – Selección de sensores de monitoreo

**Tabla 29**

Sensores para control operacional en estudios

Autor (año)	Banadaki (2022)	Srivastava y cols. (2018)	Karimanzira y R. (2021)	Nazif y cols. (2020)	Di Martino y cols. (2022)
Temperatura alimentación			•	•	
Caudal alimentación	•	•	•	•	•
Caudal permeado	•	•		•	
Presión alimentación	•	•	•	•	•
Presión rechazo	•	•	•	•	•
Presión permeado	•				
Conductividad alimentación	•	•	•	•	
Conductividad Permeado	•	•	•	•	•
Otros	•	•	•	•	

Banadaki (2022) indica que:

Se deben registrar y controlar, en la alimentación a las membranas, la temperatura. Además, medir, en el concentrado, el porcentaje de apertura de la válvula y la presión. Y monitorear, en el permeado, la conductividad, el flujo y la presión. Estos parámetros sirven para evaluar la recuperación y el rechazo de sal.

Srivastava y cols. (2018) señala que:

Se registra, en la alimentación, el caudal, la presión, los sólidos disueltos totales (TDS), el pH y el nivel del estanque. También, se monitorea, en la corriente de concentrado, la presión. Y se mide, en el permeado, el caudal, sólidos disueltos totales (TDS), el pH y el nivel del estanque. Además, incluye registrar, el tiempo transcurrido entre limpiezas y,

controlar en la bomba de alta presión, las revoluciones por minuto del variador. Considerando, cuatro modos operativos: normal, vacaciones, limpieza química o permeado.

Karimanzira y Rauschenbach (2021) señalaron que:

Se registran, en la alimentación, los mismos datos que en Banadaki (2022). También, se monitorea, en la corriente de rechazo, únicamente la presión, como lo indicado en Srivastava (2018). Y se registra, en el permeado, los sólidos disueltos totales (TDS). E incluye, registrar, el número de lavados y el tiempo de operación.

Nazif y cols. (2020), indica controlar, al igual que los 3 estudios anteriores, la recuperación, la caída de presión entre membranas, el paso de sal y el consumo eléctrico. Registrando, en la alimentación, temperatura, conductividad, presión y caudal. También, medir, en el rechazo, el caudal y la presión. Y registrar, en el permeado, la conductividad y el flujo. E incluye, medir, el tiempo entre limpiezas y el tiempo de operación.

Di Martino y cols. (2022) mencionan que:

Se registra, en la alimentación a las membranas, antes de cada etapa, el caudal y la presión. También, se monitorea, en cada concentrado, la presión, como lo indicado antes, por Srivastava y cols. (2018) y por Karimanzira y Rauschenbach (2021). Y se registra, en cada corriente de permeado, la conductividad.

## A5 – Indicadores de limpieza química

Según Dupont (2023), en el flujo de permeado normalizado, se indica la limpieza química cuando se reduce el 10 [%] según las **Ecuaciones 14, 15 16, 17 y 18.**

### Ecuación 14

*Flujo de permeado normalizado*

$$Qp_s = \frac{\left(P_f - \frac{\Delta P}{2} - P_p - \pi_{fc}\right)_s}{\left(P_f - \frac{\Delta P}{2} - P_p - \pi_{fc}\right)_o} \cdot \frac{TCF_s}{TCF_o} \cdot Qp_o$$

Con:

$P_f$ : Presión de alimentación

$\Delta P$ : Caída de presión del elemento

$P_p$ : Presión de permeado

$\pi$ : Presión osmótica de la mezcla alimentación – rechazo

$TCF$ : Factor de corrección de temperatura

$Qp$ : Flujo de permeado

$s$ : condición estandar

$o$ : condición de operación

### Ecuación 15

*Factor de corrección de temperatura*

$$TCF = e^{3020 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)}; T \leq 25^\circ C$$

Con:

$T$ : Temperatura [ $^\circ C$ ]

### Ecuación 16

*Presión osmótica*

$$\pi_{fc} = \frac{C_{fc} \cdot (T + 320)}{491000} [bar]; C_{fc} < 20000 \left[\frac{mg}{L}\right]$$

Con:

$C_{fc}$ : Concentración de mezcla alimentación – rechazo

### Ecuación 17

Concentración de mezcla alimentación-rechazo

$$C_{fc} = C_f \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)}{Y}$$

Con:

$C_f$ : Concentración de alimentación  $\left[\frac{mg}{L}\right]$

$Y$ : recuperación flujo de producto sobre flujo de alimentación

### Ecuación 18

Disminución de permeado

$$\left(\frac{Q_{po} - Q_p}{Q_{po}} \cdot 100\right) \% < 10\%$$

Según Dupont (2023), la limpieza química se indica al alcanzar un incremento del 5-10% en la salinidad del permeado (TDS) normalizada, según las **ecuaciones 19 y 20**.

### Ecuación 19

Salinidad de permeado normalizado

$$C_{ps} = \frac{\left(P_f - \frac{\Delta P}{2} - P_p - \pi_{fc} + \pi_p\right)_o}{\left(P_f - \frac{\Delta P}{2} - P_p - \pi_{fc} + \pi_p\right)_s} \cdot \frac{C_{fc_s}}{C_{fc_o}} \cdot C_{p_o}$$

Con:

$C_p$ : Concentración de permeado  $\left[\frac{mg}{L}\right]$

$\pi_p$ : Presión osmótica de permeado [bar]

### Ecuación 20

Incremento de salinidad

$$\left(\frac{C_{ps} - C_{po}}{C_{po}} \cdot 100\right) [\%] < 10 [\%]$$

Según Nazif (2020), el aumento de la caída de presiones entre alimentación y rechazo de cada etapa indica una resistencia debido a la incrustación. Se indica la caída de presión según **Ecuaciones 21, 22 y 23**.

#### **Ecuación 21**

*Caída de presión inicial*

$$\Delta P_o = (P_{fo} - P_{ro})$$

#### **Ecuación 22**

*Caída de presión*

$$\Delta P = (P_f - P_r)$$

#### **Ecuación 23**

*Aumento de caída de presión*

$$\left( \frac{\Delta P - \Delta P_o}{\Delta P_o} \cdot 100 \right) [\%] < 15 [\%]$$

## A6 – Configuración de membranas con Hydranautics

Las ecuaciones de diseño en el software de simulación Hydranautics. Con éstas se presentan los cálculos para producir 13,6 [m<sup>3</sup>/d]:

- Para el flux por módulo,  $J_m$ :

1) Obtener la permeabilidad dada por A [lmh bar<sup>-1</sup>]

Los datos son:

- $P = 15,5$  [bar]
- $T = 25$  [°C]
- $C_f = 2.000$  [ppm NaCl]
- $J = 42$  [lm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>] (Dupont, 2022)
- $n = 2$
- $M = 58,5$
- $RT = 2475$

Usando las fórmulas:

- $J = A \cdot (P - P_o)$
- $P_o = RT \cdot C_f \cdot \frac{n}{M}$

Con:

- $J = \text{flux}$  [lm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>]
- $P_o = \text{Presión osmótica}$  [bar]
- $P = \text{Presión de diseño}$  [bar]

Resultados:

- $P_o = 1,69 \cdot 10^5$  [Pa] = 1,69 [bar]
- $A = 3,0$  [lmh bar<sup>-1</sup>], la permeabilidad es 3,0 [lmh bar<sup>-1</sup>]

2) Obtener la presión osmótica promedio

Los datos son:

- $P_i = 1,69$  [bar]
- $S = 0,32$
- $R = 0,995$
- $C_f = 2000$  [ppm]

- $RT=2.475$
- $n=2$
- $M=58,5$

Usando las fórmulas:

- $P_{o\_promedio} = \frac{P_o + P_{o_r}}{2}$
- $C_r = C_f \cdot (1 - S)^{-R}$
- $P_{o_r} = RT \cdot C_r \cdot \frac{n}{M}$

Con:

- $P_{o_r}$  = Presión osmótica de rechazo, [Pa]
- $C_r$  = Concentración de rechazo, [ppm]

Resultados:

- $C_r = 2.936$  [ppm]
- $P_{o_r} = 2,48 \cdot 10^5$  [Pa] = 2,48 [bar]
- $P_{o\_promedio} = 2,1$  [bar], la presión osmótica promedio es 2,1 [bar]

3) Obtener concentración de permeado y comparar con la calidad esperada para agua potable que es 250 [ppm].

Datos:

- $C_f = 2.000$  [ppm]
- $S = 0,32$
- $R = 0,995$
- $A = 3$  [lmh bar<sup>-1</sup>]
- $P = 15,5$  [bar]
- $P_{o\_promedio} = 2,1$  [bar]
- $Area_{mod} = 3,4$  [m<sup>2</sup>]

Usando la fórmula:

- $C_p = \frac{C_f}{S} \cdot (1 - (1 - S)^{1-R})$
- $J = A \cdot (P - P_{o\_promedio})$
- $J_{mod} = J \cdot A_{mod}$

Con:

- $C_p$  = Concentración de permeado

Resultados:

- $C_p = 12$  [ppm], la concentración de permeado es menor a 250 [ppm]
- $J = 41$  [ $\text{lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ] = 41 [lmh], el flux es 41 [lmh]
- $J_{\text{mod}} = 3,3$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] el flux por módulo es 3,3 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

- Para el área requerida:  $A_{\text{req}}$

4) Obtener área requerida

Datos:

- $J_{\text{mod}} = 3,3$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
- $Q_p = 13,6$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
- $\text{Area}_{\text{mod}} = 3,4$  [ $\text{m}^2$ ]

Usando las fórmulas:

- $\text{Número}_{\text{módulos}} = \frac{Q_p}{J_{\text{mod}}}$
- $A_{\text{req}} = \text{Número}_{\text{módulos}} \cdot A_{\text{modulos}}$

Resultados:

- $\text{Número}_{\text{módulos}} = 4,1$  [módulos]
- $A_{\text{req}} = 13,9$  [ $\text{m}^2$ ], el área requerida es 13,9 [ $\text{m}^2$ ]

- Para la energía consumida por la bomba,  $E_b$

5) Obtener energía consumida

Datos:

- $Q_p = 13,6$  [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
- $S = 0,32$
- $P = 15,5 \cdot 10^5$  [Pa]
- $\eta_{\text{bomba}} = 0,49$

Fórmulas:

- Energía consumida= $E_b = \frac{(P \cdot Q_f)}{\eta}$
- $Q_f = \frac{Q_p}{s}$

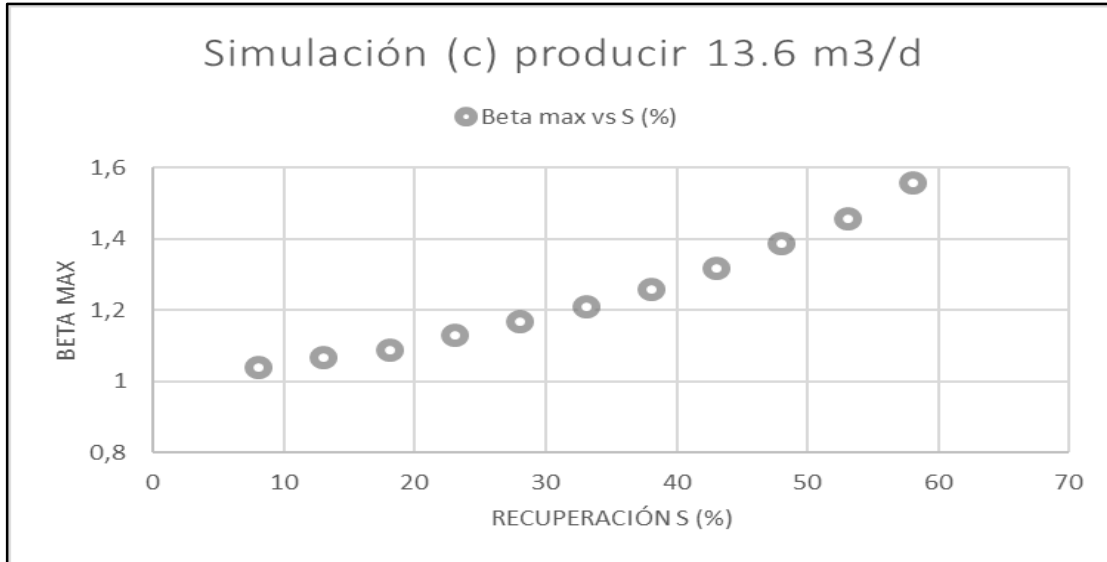
Resultados:

- $Q_f = 43,0 \text{ [m}^3/\text{d]} = 0,00049 \text{ [m}^3/\text{s]}$
- $E_b = 1,556 \cdot 10^3 \text{ [J/s]} = 1,5 \text{ [kW]}$ , la potencia de bomba es 1,5 [kW]

La simulación con Hydranautics, refiere que el límite de factor beta se cumple si la recuperación es de 32 [%] según las Figuras 46, 47, 48 y 49.

**Figura 46**

*Sensibilización del Factor Beta*



**Figura 47**

*Concentración de alimentación en valores de entrada*

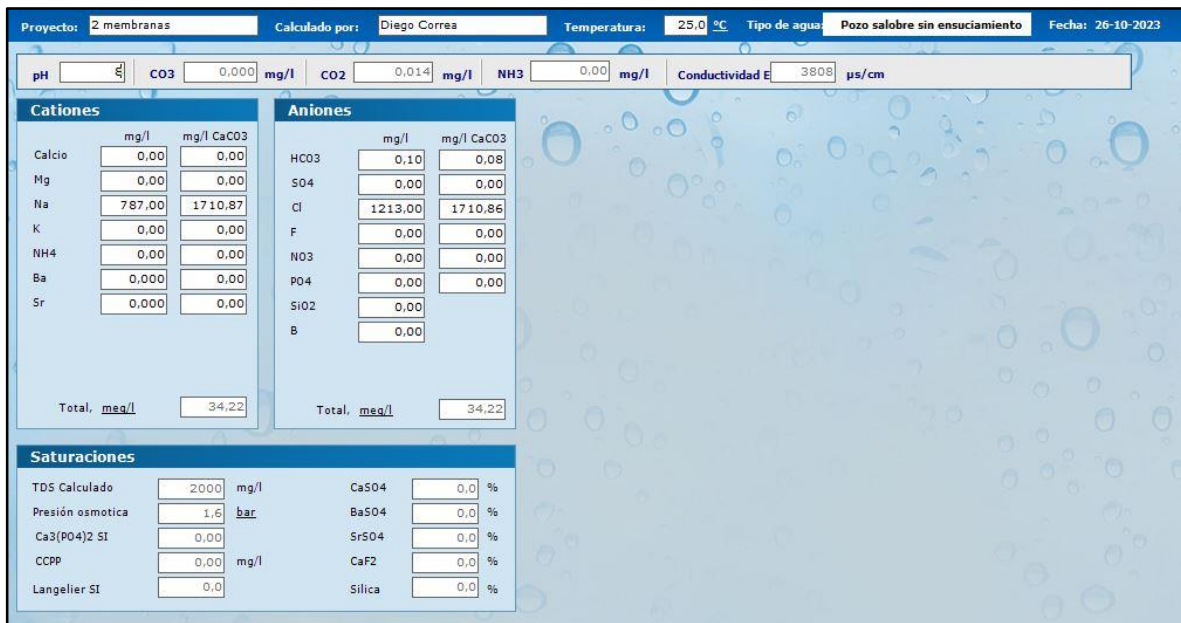


Figura 48

Membrana seleccionada ESPA2-LD-4040

**Trenes** Paso 1

pH alimentación: 8,00

Conversión: 60,00 %

Flujo/tren de permeado: 13,6 m3/d

Flujo promedio: 38,1 lmh

Caudal de alimentación: 22,7 m3/d

Caudal de rechazo: 9,1 m3/d

---

**Especificación del Sistema**

Etapa 1

Tipo de elemento: ESPA2-LD-4040

Elementos / tubo de presión: 2

Nº de tubos de presión: 1

**Selección de elemento**

Membranas recomendadas hoja de especificaciones elementos

	Modelo	Producción nominal (GPD)	Rechazo de sal, %	Tipo de elemento	Tamaño (in x in)	Área (Pies cuadrados)	spaciado (mil)	Presión de prueba (psi)	Presión de imentación (bar)	Permeate TDS (mg/l)
<input checked="" type="checkbox"/>	ESPA2-LD-40...	2000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	4 X 40	80	34	150	10,8	19,0
<input type="checkbox"/>	ESPA4-LD-40...	2350	99,20	BWRO Lowest Pressure	4 X 40	80	34	100		
<input type="checkbox"/>	SanRO-HS2-4...	3000	99,60	Sanitary Highest Flow	4 X 40	90	32	225		

Figura 49

Operación dentro de límites de diseño

**Trenes** Paso 1

pH alimentación: 8,00

Conversión: 32,00 %

Flujo/tren de permeado: 13,6 m3/d

Flujo promedio: 38,1 lmh

Caudal de alimentación: 42,5 m3/d

Caudal de rechazo: 28,9 m3/d

**Paso 1**

Producto químico: H2SO4

Concentración de la solución, %: 100

Tasa de dosificación de productos quimic mg/l: 0,000

Edad membrana años: 0,0

Disminución Flujo por año: 5,00

Factor de ensuciamiento: 1,00

Incremento de paso de sales/año, %: 10,0

**Sistema**

Caudal total de permeado/Planta: 13,60 m3/d

Número de trenes: 1

**Resultados de Cálculo** (Flows are per vessel)

Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo (lmh)	Beta máximo
1-1	1	10,2	9,9	1,77	1,2	38	39,4	1,20

**Concentración de permeado**

Ca	0,000	K	0,000	Sr	0,000	Cl	8,332	PO4	0,000	CO2	0,002
Mg	0,000	NH4	0,000	HCO3	0,001	NO3	0,000	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	5,407	Ba	0,000	SO4	0,000	F	0,000	B	0,000	pH	6,1
NH3	0,000									TDS	13,74 mg/l

**Saturaciones del rechazo y parámetros**

CaSO4, %	0	SrSO4, %	0	Presión osmótica	2,3 bar	pH	8,1
BaSO4, %	0	SiO2, %	0	CCPP	0,00 mg/l	TDS	2933,8 mg/l
Ca3(PO4)2	0,00	CaF2, %	0	Langellier	0,00		

## A7 – Opciones de canales Groov

Figura 50

Canales del RIO

Channel	Internal Wiring	Pin	INPUT						OUTPUT					
			Discrete		Voltage	Current <sup>2</sup>	Analog			DC Sinking <sup>1,3</sup>	Analog Current / Voltage	Mechanical Relay		
			Discrete	Switch Input, Powered			ICTD	Thermistor/Resistor	Thermocouple/Millivolt <sup>3</sup>			Form C-NO <sup>1</sup>	Form C-NC <sup>1</sup>	
Ch 0	1	2												
		3												
		4												
Ch 1	5	6												
		7												
Ch 2	8	9												
		10												
Ch 3	11	12												
		13												
Ch 4	14													
Ch 5	15	16												
		17												
Ch 6	18	19												
		20												
Ch 8	21	22										-NC		
		23											-COM	-COM
		24												-NO
Ch 9	25	26											-NC	
		27											-COM	-COM
		28												-NO

Se dispone de las siguientes opciones:


- 8 canales de entrada discretos
- 8 canales para entrada de voltaje
- 4 canales para entrada de corriente
- 4 canales para entrada de termocupla
- 4 canales para salida de voltaje
- 8 canales de salida discreta
- 2 canales de salida para relé

**Convertidor OAC:** Es una opción para plantas (Figura 51).

**Convertidor IMAI:** Es una opción para plantas (Figura 51).

### Figura 51

*Groov OAC*

 <p><b>750.000 CLP c/i.v.a. (enero 2024)</b></p>	<p>12 canales salida digital</p> <p>Montaje en chasis</p> <p>Conexión directa relés 12-250 [VAC]</p> <p>Consumo 1,3 [W]</p> <p><i>GRV-OAC-12</i></p>
---	--

*Nota.* Adaptado de GRV-OAC-12, por Opto22, 2024.

### Figura 52

*Groov IMAI-8*

 <p><b>1.800.000 CLP c/i.v.a. (enero 2024)</b></p>	<p>8 canales entradas analógicas</p> <p>Montaje en chasis</p> <p>0-20 [mA]</p> <p>Consumo 4,5 [W]</p> <p><i>GRV-IMAI-8</i></p>
---	--

*Nota.* Adaptado de GRV-IMAI-8, por Opto22, 2024.

## A8 – Capex y opex de planta piloto

Figura 53

*Dimensiones en vista superior*

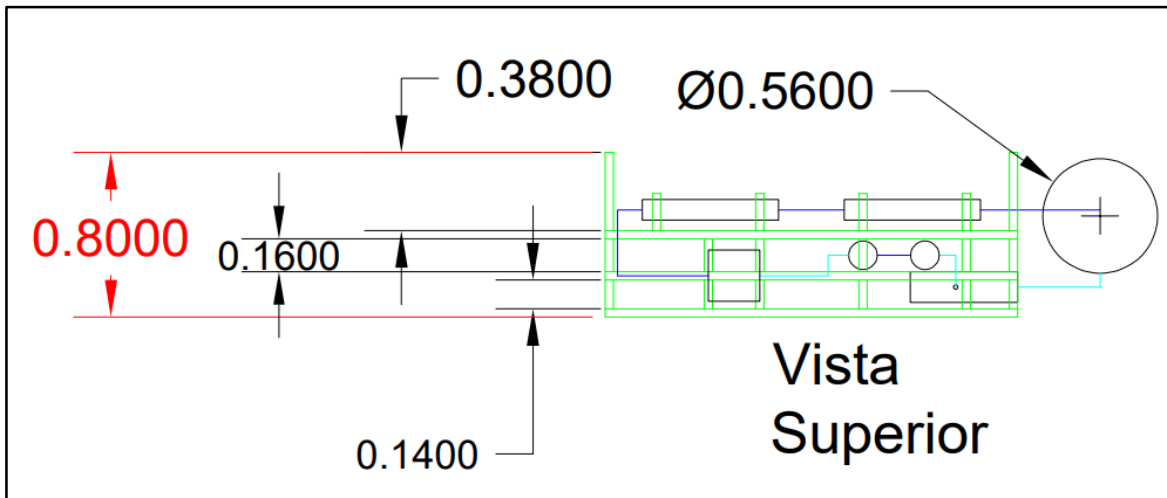
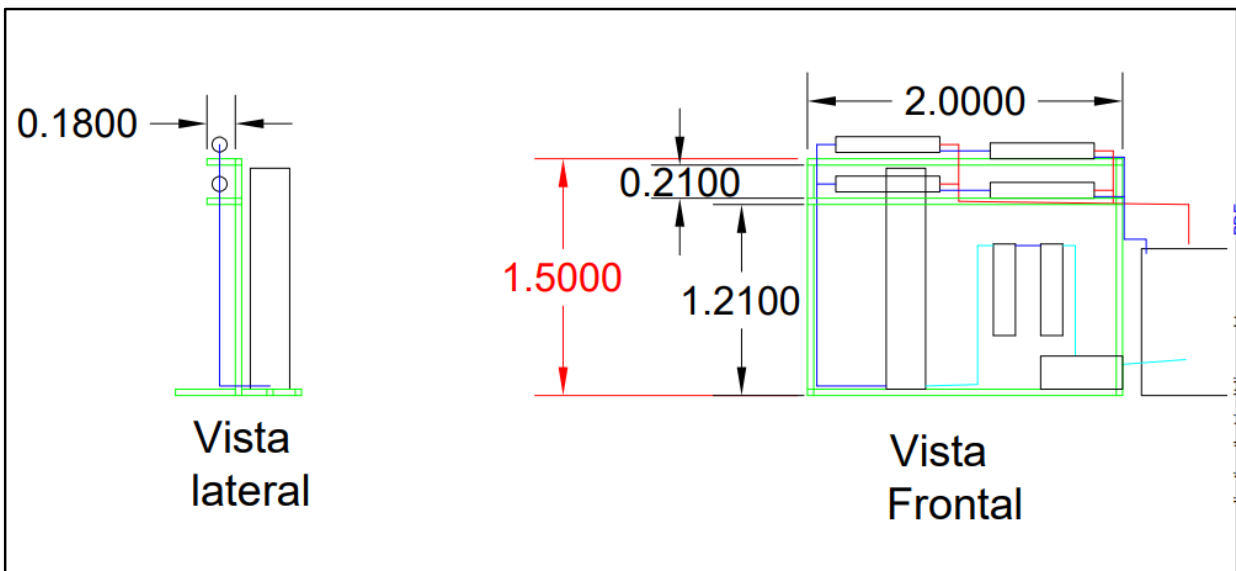


Figura 54

*Dimensiones en vista frontal y en vista lateral*



**Figura 55**

*Inversión en planta piloto*

<b>DESCRIPCIÓN :</b> Planta de 4 membranas 600 l/h de permeado					
<b>FECHA :</b> 07-11-2023					
<b>EVALUACIÓN :</b> 1 RIO, 1 EPIC, CONTROL DE CONDUCTIVIDAD Y PRESIÓN					
ÍTEMS	PARTIDAS	UNID.	NETO	IVA	BRUTO
1.-	EQUIPOS, MEMBRANAS, FILTROS ESTANQUES	gl			\$ 8.150.208
2.-	INSTRUMENTOS PRESIÓN Y ROTAMETRO	gl			\$ 1.079.030
3.-	CAÑERÍA, FITTINGS Y ENFIERREADURA	gl			\$ 1.165.727
4.-	MONITORIZACIÓN Y CONTROL	gl			\$ 5.063.925
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 15.458.890</b>

Datos para **Ecuaciones 24, 25, 26, 27, 28 y 29:**

- 15.500.000 [CLP] de inversión
- 2,6 [kWh/m<sup>3</sup>] el consumo de energía
- 132 [USD/kWh] el costo energético trifásico: C<sub>el</sub>
- 4.000.000 [CLP] el costo de reposición de 4 membranas
- 5 [años] de vida útil de membranas.
- 3 [%] de la inversión es la mantención: I<sub>ma</sub>
- 15 [años] de vida útil de la planta: V<sub>up</sub>
- 90 [%] el factor de planta: F
- 4,5 [%] de la tasa de interés anual: t<sub>i</sub>

**Ecuación 24**

*Potencia bomba de osmosis*

$$P_e = (Q_F \cdot P) / \eta$$

P<sub>e</sub>: Consumo eléctrico, [W]

Q<sub>F</sub>: Alimentación 1,8 [m<sup>3</sup>/h] a [m<sup>3</sup>/s]

P: Presión 14,9 [bar] a [Pa]

η: Eficiencia global de bomba 49 [%]

### **Ecuación 25**

*Consumo eléctrico bomba de osmosis*

$$C_e = \frac{P_e}{1000 \cdot Q_p}$$

### **Ecuación 26**

*Costo de capital*

$$C_t = \frac{I_e}{365 \cdot V_{up} \cdot F \cdot t_i}$$

$C_t$ : Capital, [CLP/m<sup>3</sup>]

$I_e$ : Inversión específica [CLP/(m<sup>3</sup>/d)]

### **Ecuación 27**

*Costo de energía*

$$C_{et} = C_e \cdot C_{el}$$

$C_{et}$ : Costo de energía referenciado al producto, [CLP/m<sup>3</sup>]

$C_e$ : Consumo de energía referenciado [kWh/m<sup>3</sup>]

### **Ecuación 28**

*Costo de membranas*

$$R_m = \frac{R_{mt}}{365 \cdot V_{up} \cdot F}$$

$R_m$ : Reposición de membranas, [CLP/m<sup>3</sup>]

$R_{mt}$ : Reemplazos de membranas específico [CLP/(m<sup>3</sup>/d)]

### **Ecuación 29**

*Costo de mantenimiento*

$$C_m = \frac{C_t \cdot I_{mc}}{365 \cdot F}$$

$C_m$ : Costo de mantenimiento, [CLP/m<sup>3</sup>]

En resumen, la planta piloto:

- Inversión de 15,5 millones de pesos.
- Tiempo instalación: 1 [mes]
- Espacio: 4,5 [m<sup>2</sup>].
- Capacidad: 0,58 [m<sup>3</sup>/h]
- Recuperación: 32 [%]
- Consumo de energía: 2,6 [kWh/m<sup>3</sup>].
- Costo del agua: 828 [CLP/m<sup>3</sup>]
  - Siendo el capital de 218 [CLP/m<sup>3</sup>]
  - El energético de 346 [CLP/m<sup>3</sup>]
  - La reposición de membranas de 157 [CLP/m<sup>3</sup>]
  - El mantenimiento de 105 [CLP/m<sup>3</sup>].

## A9 – Flujo de caja incumbentes control planta industrial

Figura 56

Flujo de caja incumbentes control planta industrial

INGRESO INCUMBENTE		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
SActual - \$Futuro Membranas	SM/MC/P/AÑO	0	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421
INGRESO Total	SM/MC/P/AÑO	0	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421
COSTOS INCUMBENTES															
Reemplazo sensor diseñado	SM/MC/P/AÑO	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Energía eléctrica e internet	SM/MC/P/AÑO	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Limpieza	SM/MC/P/AÑO	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Pérdida de producción por lavado	SM/MC/P/AÑO	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Reemplazo de instrumentación	SM/MC/P/AÑO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	0
COSTOS VARIABLES TOTAL	SM/MC/P/AÑO	0	36	36	36	36	36	36	36	36	36	57	36	36	36
COSTOS FIJOS															
PERSONAL	SM/MC/P/AÑO	0	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
DEPRECIACION	SM/MC/P/AÑO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COSTOS FIJOS TOTAL	SM/MC/P/AÑO	0	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
COSTOS TOTAL	SM/MC/P/AÑO	0	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	118	98	98
MARGEN OPERACIONAL	SM/MC/P/AÑO	0	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	365	385	385
CAPITAL DE TRABAJO	SM/MC/P/AÑO														
INVERSIONES	SM/MC/P/AÑO	51													
VALOR RESIDUAL	SM/MC/P/AÑO												0		
DEPRECIACION	SM/MC/P/AÑO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO NETO	SM/MC/P/AÑO	-51	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	365	385	385
FLUJO ACUMULADO	SM/MC/P/AÑO	0	334	719	1.104	1.488	1.873	2.258	2.643	3.028	3.413	3.778	4.163	4.548	4.933
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421
421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421	421
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	0	0	0
36	36	36	36	36	36	57	36	36	36	36	36
61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
98	98	98	98	98	98	118	98	98	98	98	98
385	385	385	385	385	385	365	385	385	385	385	385
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
385	385	385	385	385	385	365	385	385	385	385	385
5.318	5.703	6.088	6.473	6.857	7.242	7.607	7.992	8.377	8.762	9.147	9.532
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25