

# DEFINICIÓN DEL ESQUEMA GENERAL DE TRATAMIENTO DEL AGUA HASTA LA POTABILIZACIÓN

## PROYECTO

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA SOLUCIÓN INTEGRAL DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE MEDIANTE DESALINIZACIÓN E INFRAESTRUCTURA DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO DE DESABASTECIMIENTO EN EL DISTRITO DE SANTA MARTA.**

CONTRATO: CMA 001-2025

## UNIÓN TEMPORAL EYD SM 2025

Santa Marta  
 JUNIO DE 2026

### Consultor Contrato CMA 001-2025

	NOMBRE	CARGO	FIRMA
<b>Elabora</b>	Agustín Barros Trout M.P. 25202-50476 CND	Director de Proyecto UT EYD SM 2025	

### Interventor Contrato CMA 001-2025

	NOMBRE	CARGO	FIRMA
<b>Aprueba</b>	Gustavo Adolfo Hernández Cortes M.P. 08202-097720 ATL	Director de Interventoría Universidad del Magdalena	

### Entidad Contratante Contrato CMA 001-2025

	NOMBRE	CARGO	FIRMA
<b>Supervisa</b>	Luis Felipe Gutierrez Castillo M.P. BL230-30375	Gerente de Infraestructura Alcaldía Distrital de Santa Marta	

## CONTENIDO

<b>1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....</b>	<b>3</b>
1.1 Resumen del Proyecto .....	3
1.1.1 Posicionamiento del Proyecto .....	3
1.2 Evaluación de la calidad del agua de mar y recomendaciones .....	3
1.2.1 Comportamiento hidrodinámico y distribución vertical .....	4
1.3 Alcance del diseño .....	6
1.4 Objetivos del Diseño .....	6
<b>2. SELECCIÓN DEL PROCESO Y DISEÑO DEL PROYECTO .....</b>	<b>7</b>
2.1 Principios de diseño de procesos, normas y especificaciones de aplicación .....	7
2.1.1 Principios y requisitos del diseño de procesos .....	7
2.1.2 Normas y estándares de aplicación .....	7
2.2 Selección del proceso .....	9
2.3 Escala del proyecto .....	11
2.4 Diagrama de Flujo del Proceso y del Balance Hídrico .....	11
2.5 Descripción del diseño de los equipos principales .....	12
2.5.1 Sistema de pretratamiento .....	12
2.5.2 Sistema de Ultrafiltración con Membranas Cerámicas .....	14
2.5.3 Sistema de Osmosis Inversa de Agua de Mar .....	21
2.5.4 Sistema de Remineralización .....	32
2.5.5 Sistema de Abastecimiento de Agua .....	35
2.6 Tratamiento de Aguas Residuales .....	35
2.7 Soluciones de Sistemas de Control Automático .....	37
2.7.1 Principios de Diseño de los Sistemas de Control Automático .....	37
2.7.2 Control del Sistema .....	38
2.8 Lista de Equipos Principales con sus Cargas Eléctricas .....	39
2.9 Análisis del Consumo Energético y de Productos Químicos .....	42
2.9.1 Análisis del consumo energético del sistema (calculado en función del agua producida por el sistema de ósmosis inversa) .....	42
2.9.2 Análisis del consumo de productos químicos durante el funcionamiento del sistema (calculado en función del agua producida por el sistema de ósmosis inversa) .....	42

## 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

### 1.1 Resumen del Proyecto

El presente proyecto contempla la ingeniería básica de procesos para la implementación del Sistema de Tratamiento de Agua Potable por medio de Plantas Desalinizadoras para la ciudad de Santa Marta, departamento del Magdalena. La infraestructura será dimensionada para una capacidad nominal de producción de 630 L/s (2257 m<sup>3</sup>/h), operando bajo un esquema de Osmosis Inversa de Agua de Mar (SWRO - Sea Water Reverse Osmosis).

El sistema está concebido para captar agua cruda del Mar Caribe y deberá cumplir los requisitos de calidad de agua para consumo humano establecidos en la Resolución 2115 de 2007, garantizando una oferta hídrica resiliente frente a la variabilidad climática de la región.

#### 1.1.1 Posicionamiento del Proyecto

La superficie disponible para el proyecto es de aproximadamente 2,1 hectáreas, como se muestra en la siguiente imagen.



### 1.2 Evaluación de la calidad del agua de mar y recomendaciones

La ejecución del estudio de caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas marinas se llevó a cabo conforme a los lineamientos establecidos por la organización, los cuales contemplaban la recolección de muestras de aguas marinas en cuatro (4) puntos perpendiculares al litoral que bordea el sur de la ciudad de Santa Marta, departamento del Magdalena, a profundidades que oscilan entre los 5, 10 y 15 metros. Dicho monitoreo fue realizado durante el mes de enero del año en curso.

**INFORME TÉCNICO SOBRE EL ESTUDIO DE  
CARACTERIZACIÓN DE AGUAS MARINAS  
EN EL SECTOR DE POZOS COLORADOS Y  
TAGANGA A LA EMPRESA UNIÓN  
TEMPORAL EYD SM 2025**

**UNIÓN TEMPORAL EYD SM  
2025**

SANTA MARTA – MAGDALENA  
MARZO DE 2026

Con base en los resultados analíticos obtenidos en los seis puntos de monitoreo y considerando el comportamiento vertical de la columna de agua, se establecieron las siguientes conclusiones técnicas:

**1.2.1 Comportamiento hidrodinámico y distribución vertical**

El análisis comparativo entre 5, 10 y 15 metros de profundidad evidencia ausencia de gradientes significativos en los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y orgánicos evaluados, lo que permite inferir:

- Adecuada mezcla vertical del cuerpo de agua.
- Ausencia de estratificación fisicoquímica.
- No se evidencia acumulación de contaminantes en estrato de (15 m).

La homogeneidad observada sugiere condiciones hidrodinámicas favorables para la dispersión y dilución natural de los aportes externos.

**a) Condiciones fisicoquímicas**

- Los valores de acidez y alcalinidad se mantienen dentro de rangos característicos de aguas marinas costeras tropicales, sin evidenciar alteraciones asociadas a procesos de acidificación o vertimientos industriales.
- Los sólidos sedimentables (<1,0 mg/L) y el color verdadero (<5 UPC) indican ausencia de aportes significativos de partículas sedimentables o alteraciones visibles en la calidad del agua.
- Los sólidos suspendidos totales presentan valores compatibles con la dinámica natural de zonas costeras sometidas a procesos de resuspensión por oleaje y corrientes.

**b) Materia orgánica y demanda de oxígeno**

- Los valores de DBO5 reflejan presencia de materia orgánica biodegradable en concentraciones bajas a moderadas; sin embargo:
- No se evidencian condiciones que indiquen contaminación orgánica severa.
- La DQO se mantiene baja (<15 mg/L), descartando presencia significativa de compuestos químicos oxidables de origen industrial.
- Lo anterior sugiere influencia antrópica leve a moderada, posiblemente asociada a actividades turísticas, descargas domésticas y dinámica costera urbana.

**c) Calidad microbiológica**

- Se evidenció presencia de coliformes termotolerantes y Escherichia-coli en las tres profundidades evaluadas, lo que confirma aporte de origen fecal con distribución vertical homogénea en la columna de agua.
- La no detección de enterococos indica ausencia de condiciones sanitarias críticas; sin embargo, la persistencia de indicadores fecales refleja influencia de actividades humanas en zonas costeras. Desde el punto de vista sanitario, se recomienda mantener seguimiento periódico, especialmente en temporadas de alta afluencia turística.

**d) Nutrientes y riesgo de eutrofización**

- Las concentraciones de nitratos, nitritos y fósforo se mantienen bajas o por debajo del límite de detección en la mayoría de los puntos y profundidades evaluadas. No se identifican:
- Procesos de enriquecimiento nutricional.
- Acumulación de nutrientes en profundidad.
- Condiciones propicias para eutrofización.
- El sistema presenta estabilidad trófica en el momento del monitoreo.

**e) Grasas, hidrocarburos y surfactantes**

- Se detectaron concentraciones bajas de grasas, aceites, hidrocarburos totales del

petróleo (TPH) y surfactantes aniónicos en todos los puntos de monitoreo.

- Se observa ligera disminución con la profundidad, lo que sugiere mayor influencia en capas superficiales y comportamiento acorde con procesos de dispersión y dilución natural.
- No se evidencia concentraciones compatibles con derrames recientes ni contaminación aguda.

#### **f) Metales pesados y sustancias tóxicas**

Todos los metales pesados analizados (arsénico, mercurio, plomo, níquel, cromo, zinc, entre otros) y plaguicidas organoclorados y organofosforados se encontraron por debajo de los límites de detección del laboratorio. No se evidencia:

- Contaminación industrial.
- Aporte minero.
- Bioacumulación en el estrato profundo evaluado.

Los parámetros fisicoquímicos medidos in situ muestran:

- Condiciones normales para aguas marinas tropicales.
- Buena calidad ambiental desde el punto de vista fisicoquímico.
- Adecuada oxigenación para el sostenimiento de vida acuática.
- Ausencia de señales evidentes de contaminación o alteración significativa al momento del muestreo.
- El sistema presenta comportamiento típico de zona costera con influencia de dinámica marina y posibles aportes continentales moderados

### **1.3 Alcance del diseño**

El proyecto comprende el diseño general del proceso de tratamiento para una planta desalinizadora para la ciudad de Santa Marta, bajo un enfoque metodológico común y coherente, donde se incluye diseño sistema de pre-tratamiento, diseño sistema de ósmosis inversa (OI), diseño sistema de post-tratamiento, predimensionamiento planta, diagramas de proceso (PFD y P&ID) a nivel conceptual, diseño mecánico, sistema de recuperación de energía (ERD), diseño arquitectura industrial, diseño redes contraincendios, diseño redes hidrosanitarias, diseño eléctrico, subestación y transformadores, instrumentación, automatización y control, ciberseguridad industrial, gestión ambiental (GIRS y químicos), CAPEX - Estimación de costos de inversión - equipos PD, OPEX - estimación de costos de operación y los aportes técnicos detallados para la planta desalinizadora de agua de mar.

### **1.4 Objetivos del Diseño**

Bajo las condiciones del agua cruda indicadas en las muestras analizadas para el proyecto, la calidad del agua final producida por esta planta debe cumplir con los límites de los indicadores físicos, químicos y microbiológicos de agua para consumo humano, establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

## 2. SELECCIÓN DEL PROCESO Y DISEÑO DEL PROYECTO

### 2.1 Principios de diseño de procesos, normas y especificaciones de aplicación

#### 2.1.1 Principios y requisitos del diseño de procesos

Basado en las condiciones específicas de este proyecto y los requisitos establecidos en la norma, combinados con el nivel de desarrollo tecnológico actual en la industria nacional e internacional, se adoptarán activamente tecnologías avanzadas. Los principios de diseño específicos son los siguientes:

**(1) Principio de tecnología avanzada, confiable, y económicamente viable**

La tecnología y los procesos adoptados en el proyecto NO deben quedar obsoletos en las próximas décadas, evitando modificaciones repetidas que causen detrimento económico, mientras se busca minimizar la inversión cumpliendo con los requisitos de calidad del agua potable.

**(2) Principio de bajo costo operativo**

El esquema técnico del proyecto prioriza procesos de bajo costo operativo. La selección de equipos se basa en eficiencia energética, confiabilidad y facilidad de mantenimiento, adoptando instrumentos de medición y tecnologías de automatización adecuadas a las condiciones locales.

**(3) Principio de funcionamiento automatizado**

El sistema y los equipos deberán contar con operación totalmente automatizada, incluyendo arranque con un solo botón, empleando tecnologías modernas de adquisición de datos, procesamiento y control por retroalimentación, para lograr una gestión y control automatizados.

**(4) Principio de ocupación de espacio reducida**

La solución técnica de la obra adopta procesos que ocupan poco espacio y tienen una alta eficiencia operativa. Siempre que se cumplan los requisitos de construcción, instalación y mantenimiento, las estructuras de tratamiento se concentrarán en la medida de lo posible para ahorrar espacio.

**(5) Principio de modularidad de los equipos y de plazos de construcción cortos**

Se adopta un enfoque de diseño modular que permite adaptar la configuración operativa del sistema en función del caudal actual y del aumento previsto en el futuro, con el objetivo de lograr la modularidad y la estandarización de los equipos, así como de acortar los plazos de construcción in situ.

**(6) Principio de procesos cortos**

**(7) Principio de larga vida útil.**

#### 2.1.2 Normas y estándares de aplicación

Para el diseño, viabilidad técnica, ambiental y legal de las Plantas Desalinizadoras, se deben aplicar normas estrictas de calidad de agua y protección ambiental, como el Decreto 1575 de 2007, el Decreto 1076 de 2015 y la Resolución 330 de 2017 (RAS). Adicionalmente es importante aplicar estándares internacionales como ISO, ASME para tuberías y membranas, junto con estudios ambientales.

### 1. Normativa Técnica Nacional (RAS)

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) es la base obligatoria para cualquier infraestructura hídrica.

- **Resolución 0330 de 2017:** Establece los requisitos técnicos para todas las etapas de un proyecto, planeación, diseño, construcción y operación.
- **Resolución 0799 de 2021:** Modifica y actualiza aspectos específicos de la Resolución 0330 para optimizar procesos en el sector.

### 2. Calidad del Agua y Control Sanitario

Como el agua desalinizada es para consumo humano, debe cumplir estrictamente con los parámetros de salud pública:

- **Resolución 2115 de 2007:** Define las características físicas, químicas y microbiológicas que debe tener el agua potable en Colombia.
- **Decreto 1575 de 2007:** Establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano.

### 3. Normas Ambientales y de Captación

- **Licencia Ambiental:** Es obligatoria y se tramita ante la ANLA o la corporación autónoma regional correspondiente, para la captación de agua de mar y el vertido de salmuera.
- **Decreto 1076 de 2015:** Regula el sector ambiente, incluyendo los permisos de vertimientos y la evaluación de impacto ambiental.
- **Ley 373 de 1997:** Exige un Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).

### 4. Estándares Internacionales de Diseño (Referencia)

Dado que la tecnología de ósmosis inversa es la más común (70% del mercado mundial), se suelen usar estas referencias internacionales:

- **AWWA Manual M46:** Desalination of Seawater
- Criterios de diseño SWRO: 40–45% recuperación
- Presiones típicas de operación: 55–70 bar
- **ISO 24510:** Criterios de calidad y desempeño en servicios de agua potable.
- **ASTM International:** Normas para membranas de ósmosis inversa y análisis de agua de mar.
- **International Electrotechnical Commission (IEC):** Normas técnicas globales para el diseño, rendimiento y seguridad de equipos eléctricos.

Es importante resaltar que, se trabajará empleando estándares internacionales aplicados por importantes fabricantes líderes del sector. En este sentido, se tendrá en cuenta las normas de diseño referenciadas a continuación:

- (1) “Requisitos de calidad del agua producto de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar” (GB/T 43230-2023);
- (2) “Código de diseño de abastecimiento de agua exterior” (GB 50013-2018);

- (3) “Norma de diseño de drenaje exterior” (GB 50014-2021);
- (4) “Manual de diseño de abastecimiento y drenaje” (3ª edición, Volumen 3);
- (5) “Norma de diseño de estaciones de bombeo” (GB 50265-2022);
- (6) “Reglamento técnico para tratamiento con membranas en abastecimiento urbano” (CJJ/T251-2017);
- (7) “Código de diseño de sistemas de suministro y distribución eléctrica” (GB 50052-2009);
- (8) “Norma de diseño estructural de tuberías de agua y drenaje” (GB 50332-2002);
- (9) “Terminología de tecnologías de separación por membranas” (GB/T 20103);
- (10) “Norma de selección y diseño de instrumentación de automatización” (HG/T 20507-2014);
- (11) “Norma de construcción y aceptación de tuberías de agua y drenaje” (GB 50268-2008);
- (12) “Norma de construcción y aceptación de instrumentación automática” (GB 50093-2013);
- (13) “Norma de instalación y aceptación de equipos eléctricos de baja tensión” (GB 50254-2014);
- (14) “Norma de aceptación de calidad en obras de ventilación y aire acondicionado” (GB 50243-2016);
- (15) “Norma de aceptación de calidad para instalaciones de agua, drenaje y calefacción en edificaciones” (GB 50242-2002);

## 5. Fuentes de Energía

- **Regulaciones de la UPME:** Para integración de energías renovables (ej. fotovoltaica para plantas autosostenibles).

### 2.2 Selección del proceso

La desalinización del agua de mar se puede clasificar, según el mecanismo de desalinización, en métodos térmicos y métodos de membrana. Los procesos térmicos aplicados en la práctica incluyen principalmente la evaporación flash multietapa (MSF), la destilación multiefecto a baja temperatura (MED) y la destilación con vapor a presión (MVC); por su parte, los métodos de membrana están representados por la ósmosis inversa de agua de mar (SWRO), que utiliza membranas semipermeables para retener las sales y permitir el paso del agua bajo presión. Actualmente, la MED se ha convertido en la tecnología dominante entre los procesos térmicos, mientras que la SWRO es el proceso predominante entre los procesos de membrana.

La desalinización térmica del agua de mar se enfrenta a dos retos fundamentales: la corrosión de los equipos y la formación de incrustaciones en los tubos de transferencia de calor. Las medidas tradicionales para hacerles frente incluyen el uso de aleaciones resistentes a la corrosión de alto costo y la adición de agentes antiescalantes y dispersantes. Dado que las tasas de corrosión y formación de incrustaciones están estrechamente relacionadas con la temperatura de

evaporación, la reducción de la temperatura de operación se ha convertido en la clave fundamental para resolver el problema. La destilación multiefecto a baja temperatura (MED) mantiene la temperatura de operación por debajo de los 70 °C. En estas condiciones, cuando el factor de concentración del agua de mar alcanza un valor de 1,8 a 2, la zona de precipitación de cristales de sulfato de calcio y carbonatos se aleja del punto de funcionamiento real, lo que reduce drásticamente la tendencia a la formación de incrustaciones; al mismo tiempo, materiales como las aleaciones de aluminio, los recubrimientos de resina epoxi y los plásticos presentan una buena resistencia a la corrosión por el agua de mar a esta temperatura. Por lo tanto, las plantas MED solo requieren la adición de pequeñas cantidades de inhibidores de incrustaciones y no necesitan el complejo pretratamiento de adición de ácido para eliminar el CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>, como ocurre en la destilación flash multietapa (MSF), lo que reduce significativamente los costos de inversión y operación. Gracias a estas ventajas, la tecnología MED se ha desarrollado rápidamente, y la producción máxima de agua por unidad ha superado los 68 000 m<sup>3</sup>/d, logrando un salto de la viabilidad técnica a la escala industrial y a las grandes instalaciones, lo que confirma plenamente su madurez y confiabilidad como proceso central para la desalinización de agua de mar a gran escala.

En el ámbito de la desalinización térmica del agua de mar, la destilación flash multietapa (MSF) sigue ocupando un lugar importante en los mercados existentes de regiones como Oriente Medio, gracias a sus ventajas, entre las que destacan su alta madurez tecnológica, su fiabilidad operativa y su gran adaptabilidad al agua de mar de alta salinidad. Sin embargo, la destilación multiefecto a baja temperatura (MED), gracias a su menor consumo energético, temperaturas de operación más moderadas y la ventaja única de poder aprovechar de manera eficiente el calor residual de baja calidad, se ha convertido en la opción predominante para los nuevos proyectos de desalinización térmica y en la dirección clara del desarrollo tecnológico futuro.

La tecnología de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) se ha convertido en una de las principales técnicas de desalinización gracias a sus ventajas integrales, entre las que se incluyen una baja inversión en ingeniería, un ciclo de construcción corto, un espacio ocupado reducido, un funcionamiento y mantenimiento sencillos, un bajo consumo energético y un bajo costo de producción de agua. Con la amplia aplicación de dispositivos de recuperación de energía de alta eficiencia y el aumento de la tasa de recuperación del sistema, el consumo energético por unidad de agua producida en el proceso SWRO ha disminuido significativamente. Actualmente, el consumo de energía por tonelada de agua en los grandes proyectos de SWRO se ha reducido a entre 3 y 3,3 kWh/m<sup>3</sup>. Gracias a la continua evolución tecnológica, la ingeniería de la desalinización por ósmosis inversa está cada vez más madura, la capacidad de fabricación de equipos completos se fortalece constantemente y la escala de aplicación se amplía continuamente, ocupando un lugar cada vez más importante en el mercado mundial de la desalinización.

Dado que el proceso térmico depende de una fuente de calor de vapor estable, suele ser necesario construirlo junto a una central eléctrica para aprovechar el calor residual; de lo contrario, la rentabilidad se reduce considerablemente. Tianjian Water, basándose en su experiencia en proyectos similares de tratamiento de agua, y tras considerar de manera integral aspectos como los costos de operación, la inversión total y la estabilidad y conveniencia de la operación y el mantenimiento, recomienda adoptar el proceso central de «flotación por aire (DAF) — membrana de ultrafiltración cerámica (UF) — ósmosis inversa (SWRO)». Mediante una combinación de

tecnologías de pretratamiento eficiente y desalinización profunda, se logra una conversión eficiente de los recursos de agua de mar, al tiempo que se tiene en cuenta la estabilidad operativa, la eficiencia energética y el cumplimiento de las normas medioambientales.

### 2.3 Escala del proyecto

No.	Nombre	Tasa Recuperación (%)	Producción agua (m <sup>3</sup> /h)
1	Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)	≥99	5657
2	Sistema de Membrana de Ultrafiltración	≥95	5374
3	Sistema de Desalación de Agua de Mar	42	2257

El diseño establece una producción nominal de:

$$Q_p = \frac{627 L}{s}$$

$$Q_p = \frac{0.627 m^3}{s}$$

$$Q_p = \frac{2.257 m^3}{h}$$

Producción diaria:

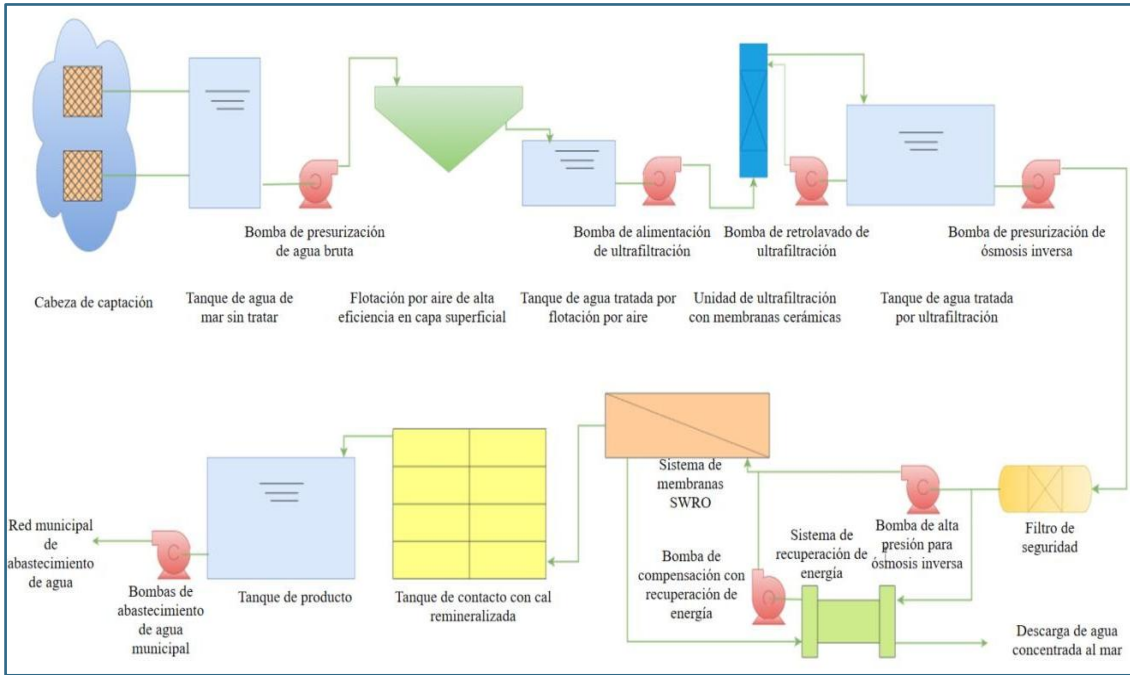
$$Q_d = 2.257 \times 24 = 54.168 m^3/día$$

El diseño se realiza para operación continua 24/7.

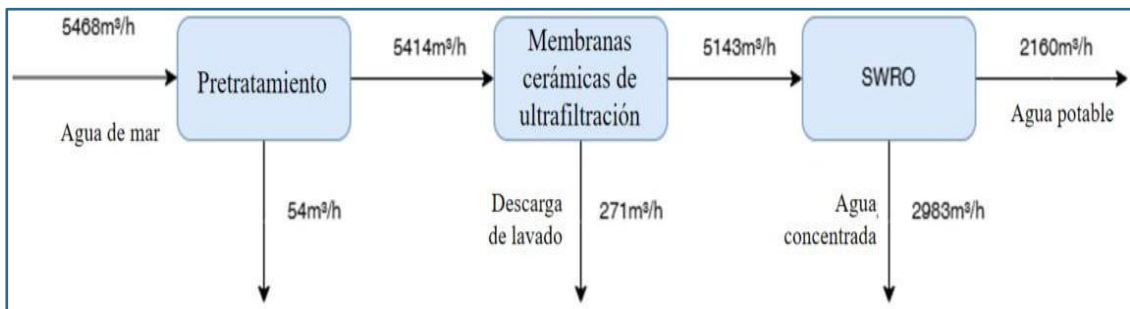
### 2.4 Diagrama de Flujo del Proceso y del Balance Hídrico

El agua cruda (**de mar**), primero pasa por un proceso de pretratamiento compuesto por sistema de flotación por aire disuelto (DAF) y membranas cerámicas de ultrafiltración. El agua producida por la ultrafiltración ingresa a un tanque de agua. Desde este tanque, el agua pasa a través de un filtro de seguridad y luego es impulsada por una bomba de alta presión hacia el sistema de ósmosis inversa para desalación de agua de mar (SWRO). El agua dulce producida pasa a un proceso de post-mineralización y desinfección, para finalmente conducirla a un tanque de almacenamiento, conectado a la red de distribución de agua potable del distrito.

El sistema cuenta con subsistemas auxiliares que incluyen un generador de agua ozonizada, un sistema de dosificación de coagulante, un sistema de dosificación de antiincrustante, un sistema de dosificación de reductor y un sistema de limpieza química.



**Figura 1. Diagrama de flujo del proceso**



**Figura 2. Diagrama de balance hídrico**

## 2.5 Descripción del diseño de los equipos principales

### 2.5.1 Sistema de pretratamiento

El pretratamiento es fundamental en los proyectos de desalinización de agua de mar, debido a que las membranas de ósmosis inversa son más sensibles al agua de entrada y se contaminan fácilmente con sustancias como coloides, materia orgánica, microorganismos y sílice, lo que provoca su obstrucción, incrustaciones y degradación, provocando disminución de la tasa de desalinización y del rendimiento del sistema. Por lo tanto, los sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa tienen requisitos especialmente estrictos en cuanto al pretratamiento del agua de mar, siendo éste una garantía importante para el funcionamiento exitoso de estos sistemas.

Según datos, en las aguas de Santa Marta existe riesgo de brotes cíclicos de marea roja (se

registraron 6 casos entre 2010 y 2017), y las especies de algas causantes de desastres, *Cochlodinium* sp. y *Mesodinium* cf. *rubrum* alcanzaron densidades máximas de  $5 \times 10^6$  células/L y  $9,2 \times 10^6$  células/L, respectivamente. Estos eventos se asociaron tanto con los periodos de altas temperaturas y lluvias abundantes (octubre-noviembre) como con los de corrientes ascendentes de surgencia y bajas temperaturas (enero-marzo). La temperatura del agua de mar presenta fluctuaciones estacionales marcadas (puede descender hasta los 21 °C en la estación seca y ascender hasta los 27-29 °C en la estación lluviosa), por lo que la incidencia de estas floraciones no se limita a una sola época, sino que se activa bajo dos escenarios ambientales totalmente opuestos a lo largo del año. El proceso de flotación por aire tiene un efecto sinérgico en la eliminación de grasas, algas y materia en suspensión, lo que permite hacer frente de manera eficaz a los brotes de marea roja y al riesgo de derrames de combustibles y lubricantes derivados del petróleo en puertos cercanos. Por lo tanto, se recomienda utilizar la Flotación por Aire Disuelto en aguas poco profundas como pretratamiento, con los siguientes objetivos principales: interceptar eficazmente las algas, adaptarse a las fluctuaciones de la temperatura y la calidad del agua, y actuar como primera barrera ante accidentes de derrames de combustibles y lubricantes derivados del petróleo, garantizando así el funcionamiento seguro del sistema de ósmosis inversa.

#### 2.5.1.1 Proceso de Flotación por Aire Disuelto (DAF)

- 1) El agua de mar entra en el dispositivo de flotación por aire a un caudal constante.
- 2) El  $\text{FeCl}_3$  (cloruro férrico) se introduce mediante una bomba en el tubo de entrada del DAF, donde se mezcla con el agua de mar en el fondo; las microburbujas procedentes del sistema de aire disuelto tienen carga positiva y se unen a las partículas floculadas. Las sustancias contaminantes del agua son adsorbidas por los flóculos y fluyen hacia el sistema de distribución de agua.
- 3) La velocidad de distribución del agua es igual a la velocidad del equipo helicoidal en funcionamiento; por lo tanto, se denomina «velocidad cero».
- 4) Los flóculos que contienen contaminantes ascienden a la superficie del agua bajo la acción de las microburbujas.
- 5) Se utiliza un dispositivo de raspado para eliminar los residuos flotantes a través de la cubeta de residuos flotantes.
- 6) El agua purificada del equipo fluye hacia el tanque a través de canales y tuberías.
- 7) Tiempo de Retención Hidráulica de 20 min, Volumen efectivo  $763 \text{ m}^3$ , Altura efectiva 2 m, Área =  $381.5 \text{ m}^2$ , Diámetro = 22 m.
- 8) Tasa de Carga Hidráulica = 5 m/h.
- 9) Cargad de Sólidos =  $0.3 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- 10) Los principales parámetros de diseño de la flotación por aire (DAF) son los siguientes:

N.º	Nombre	Cantidad	Caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Diámetro (m)	Relación de reflujo
1	Tanque de	3 juegos	1905	22	20%

	flotación por aire				
--	--------------------	--	--	--	--



**Figura 3. Sistema de flotación por aire de pretratamiento**

#### 2.5.1.2 Sistema de dosificación de coagulantes

El sistema de dosificación de coagulantes es la instalación central de dosificación de la unidad de pretratamiento de desalinización de agua de mar. Su función consiste en dosificar de forma cuantitativa coagulantes (como el cloruro de aluminio polimerizado o el tricloruro de hierro) en el agua de entrada, con el fin de desestabilizar y coagular las partículas coloidales y los sólidos en suspensión del agua de mar mediante neutralización eléctrica y efectos de puenteo por adsorción, formando así microfloculos que crean condiciones óptimas para la entrada de agua en los procesos posteriores de ultrafiltración con membranas cerámicas o filtración por medios filtrantes, asegurando que los indicadores clave, como la turbidez y los SDI, cumplan con los requisitos de entrada de agua en la posterior unidad de desalinización. Sus parámetros de diseño específicos son los siguientes:

- Dosis de dosificación del coagulante: 50 mg/l;
- Tipo de coagulante: tricloruro de hierro (líquido);
- Concentración del coagulante:  $40 \pm 0,5 \%$ ;
- Punto de dosificación: 1;
- Método de dosificación: dosificación continua;

#### 2.5.2 Sistema de Ultrafiltración con Membranas Cerámicas

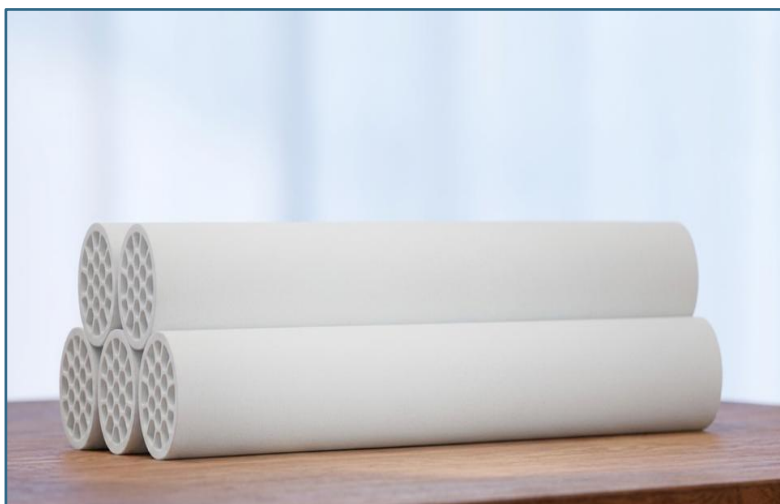
Gracias a su distribución de poros estrechos y su alta precisión de separación, las membranas de ultrafiltración cerámicas retienen de manera eficaz los sólidos en suspensión, los coloides, las bacterias y las algas presentes en el agua de mar, lo que garantiza la estabilidad de la calidad del agua de salida del pretratamiento. Tras el tratamiento con membranas cerámicas, el índice de SDI del agua de salida se mantiene estable por debajo de 2,5 y la turbidez puede reducirse a menos de 0,05 NTU, lo que cumple plenamente con los requisitos de entrada del sistema de ósmosis inversa. Al mismo tiempo, el material de las membranas cerámicas es un óxido inorgánico que se caracteriza por su alta hidrofílicidad y superficie lisa, lo que inhibe eficazmente la adhesión de

contaminantes y reduce la tendencia a la contaminación de la membrana. Su excelente estabilidad química le permite soportar la limpieza con ácidos fuertes, álcalis fuertes y oxidantes, lo que permite una recuperación completa del flujo, prolonga significativamente la vida útil de la membrana y garantiza el funcionamiento eficiente y duradero del sistema.

En el proyecto de Santa Marta, las membranas cerámicas de ultrafiltración y la flotación por aire a baja profundidad conforman un doble sistema de protección: la flotación por aire actúa como primera barrera, interceptando algas, aceite flotante y partículas en suspensión de gran tamaño; las membranas cerámicas actúan como segunda barrera, garantizando la estabilidad de la calidad del agua de salida y haciendo frente a condiciones extremas, como mareas rojas o derrames de petróleo.



**Figura 4. Tipos de Membrana Cerámica; Tubular y Plana**



**Figura 5. Elemento de membrana cerámica**



**Figura 6. Planta completa de membranas cerámicas en columna**



**Figura 7. Sistema completo de membranas cerámicas en tanques**

### 2.5.2.1 Unidad de Membrana Cerámica de Ultrafiltración

El sistema de membranas cerámicas de ultrafiltración se compone principalmente de elementos de membrana cerámicos, bastidores de membranas, válvulas, instrumentos y otros equipos esenciales. Para garantizar el funcionamiento estable de este proyecto, se propone instalar 24 conjuntos de membranas cerámicas (20 en servicio y 4 de reserva), divididos en 3 grupos. Cada grupo de conjuntos permite realizar un retrolavado independiente y una limpieza química in situ (CIP), lo que garantiza un mantenimiento eficaz de los conjuntos de membranas sin interrumpir el funcionamiento del sistema, mejorando así la fiabilidad general y su eficiencia operativa. A continuación, se detallan los parámetros de diseño de un solo equipo de membranas cerámicas:

- Cantidad: 24 grupos (20 en servicio y 4 de respaldo)
- Capacidad nominal de producción de agua: 257 269 m<sup>3</sup>/h;
- Flujo nominal de la membrana: 165,5 LMH;
- Número de membranas por grupo: 68;
- Superficie de cada membrana: ≥24 m<sup>2</sup>;
- Porosidad nominal de la membrana cerámica: ≤30 nanómetros;
- Material de la membrana: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- Material de la carcasa: FRP;
- Modo de funcionamiento: filtración en extremo cerrado;
- Calidad del agua producida: SDI<sub>15</sub> ≤ 2,5, turbidez ≤ 0,05 NTU;
- Rango de pH de operación: 1 a 14;
- Rango de temperatura de operación recomendado: 1 a 45 °C;
- Presión máxima soportada: 0,7 MPa;
- Modo de control: automático;

Distribución de Caudal:

- Trenes de Tratamiento

$$Q_{tren} = \frac{5.374}{20}$$

$$Q_{tren} = 269 \text{ m}^3/\text{h}$$

Verificación del Flujo de Membrana:

- Flujo adoptado: 165 LMH = 0,165 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h
- Área requerida por tren:

$$A = \frac{269}{0.165}$$

$$A = 1.628,5 \text{ m}^2$$

- Área Instalada:  $68 \text{ elementos} \times 24 \text{ m}^2 = 1.632 \text{ m}^2$
- Diseño matemáticamente consistente.

#### Ventajas de las Membranas Cerámicas

La tecnología de membranas de ultrafiltración cerámicas para el tratamiento de agua de mar presenta las siguientes ventajas destacadas:

1. Vida útil extremadamente larga: la vida útil de las membranas supera los 20 años; el flujo de las membranas no disminuye con el uso prolongado y el caudal de agua no se reduce; su vida útil es de 2 a 10 veces mayor que la de las membranas de ultrafiltración orgánicas, lo que se traduce en menores costos de reemplazo;
2. Excelente resistencia mecánica y excelente resistencia a la presión; puede soportar una presión máxima de 0,7 MPa y una presión de operación superior a 0,6 MPa; la presión de retrolavado puede superar los 0,5 MPa; no hay riesgo de rotura de fibras; evita el daño a la membrana causado por partículas sólidas y fibras inorgánicas;
3. Buen rendimiento de separación; funciona de manera estable incluso con agua bruta de alta turbidez; permite filtrar directamente agua con turbidez de hasta varios cientos de grados, lo que reduce los equipos de pretratamiento y simplifica el proceso; dependiendo de la calidad del agua bruta, se puede omitir el pretratamiento (como los filtros de arena) y hacer que el agua bruta pase directamente a la membrana de ultrafiltración cerámica, lo que ahorra energía eléctrica y facilita diversos modos de funcionamiento.
4. Posee estabilidad química y alta tolerancia a los productos químicos; permite la limpieza química en condiciones exigentes y facilita la recuperación en caso de obstrucción;
5. Fácil mantenimiento y operación, funcionamiento totalmente automático, sin riesgo de rotura de fibras; gracias a su excelente resistencia a la corrosión y su alta resistencia mecánica, se puede limpiar con agentes de alta presión y concentración; la recuperación tras obstrucciones es sencilla, sin temor a dañar la membrana y sin riesgo de formación de membrana muerta;
6. Buena hidrofiliación y alto flujo, con un ángulo de contacto reducido ( $\leq 0,3^\circ$ ). Su hidrofiliación es superior y el flujo es de 3 a 10 veces mayor que el de las membranas orgánicas. Cada membrana individual tiene un gran rendimiento, ocupa menos espacio, requiere un período de construcción corto, cuenta con un equipo sencillo y permite una integración y montaje del sistema fáciles, lo que facilita su transporte, desmontaje, instalación y puesta en marcha;
7. La tecnología de ultrafiltración cerámica presenta una alta tasa de eliminación de impurezas en el agua mar; su calidad tras la filtración es buena, y la turbidez del agua producida suele ser inferior a 0,05 NTU;
8. El flujo de agua a través de la membrana cerámica puede alcanzar los 150-200 L/m<sup>2</sup>·h;
9. Ofrece diversas opciones de instalación, pudiendo configurarse en forma de columna o de tanque; presenta una alta densidad de carga y ocupa poco espacio;
10. No requiere líquido de conservación durante el estado de inactividad, pudiendo dejarse

directamente fuera de servicio; es adecuada para aguas con variaciones estacionales.

#### 2.5.2.2 Limpieza Física de Membranas Cerámicas

El sistema de limpieza física es un procedimiento auxiliar para el lavado de los módulos de membrana de las unidades ultrafiltración. Este sistema está compuesto por un tanque de agua de retrolavado, bombas de retrolavado e instrumentos, tuberías, válvulas y otros equipos complementarios.

Después de cierto tiempo de filtración, en la superficie de las membranas se deposita una capa de contaminantes. Cuando el sistema alcanza el tiempo de filtración preestablecido, realiza automáticamente una limpieza física secuencial por cada pila de membranas.

La limpieza física es un proceso de retrolavado con agua: la bomba de retrolavado toma el efluente de la UF, lo presuriza y lo introduce al sistema a través de la tubería de agua producida de la UF. El agua de limpieza a presión arrastra los contaminantes de la superficie de la membrana, expulsándolos del sistema. Además, tras el retrolavado, se puede realizar un lavado directo para eliminar del sistema los contaminantes desprendidos de la superficie de la membrana durante el retrolavado, lo que permite restablecer el flujo del módulo de membrana.

El método de limpieza física consiste en un retrolavado periódico totalmente automático con aire y agua; el cual permite eliminar eficazmente los contaminantes acumulados en la superficie durante el proceso de filtración. El sistema de limpieza física incluye bombas de retrolavado, bombas de dosificación y un compresor de aire.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño de la limpieza física:

- Frecuencia de retrolavado: una vez cada 60 a 90 minutos;
- Método de retrolavado: lavado con agua + lavado con aire;
- Duración del retrolavado: 30 a 45 s por ciclo;
- Presión de retrolavado con agua: 0,25 a 0,30 MPa;
- Caudal de retrolavado con agua: 400 a 500 L/m<sup>2</sup>•h;
- Presión de retrolavado con aire: 0,25 a 0,30 MPa;

#### Parámetros Bomba de Retrolavado

- Tipo: Bomba centrífuga horizontal
- Cantidad: 4 unidades
- Caudal: 980 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica: 30 m
- Material en contacto con el fluido: Acero dúplex
- Potencia: 132 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Clase de aislamiento del motor: F
- Grado de protección del motor: IP54

- Método de control: VFD – con arranque y parada suave

#### Parámetros Compresor de Aire

- Tipo: Compresor de tornillo rotativo sin aceite
- Cantidad: 4 unidades
- Caudal de aire: 5.0 Nm<sup>3</sup>/min
- Presión máxima de trabajo: 0,8 Mpa
- Potencia: 49.5 kW
- Nivel sonoro: ≤ 72 dBA a 1 m
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Método de control: Control automático de presión

#### Parámetros Tanque de Almacenamiento de Aire

- Volumen: 10 m<sup>3</sup>
- Presión: 1 Mpa
- Material: Acero inoxidable 304
- Cantidad: 3 unidades

El tanque de almacenamiento de aire está equipado con válvula de drenaje y válvula de seguridad automático.

#### 2.5.2.3 Sistema de Limpieza Química de Membranas Cerámicas

El sistema de limpieza química es un proceso auxiliar que permite realizar la limpieza química en línea de las pilas de membranas dentro del sistema principal de la unidad de ultrafiltración. Cuando el retrolavado no puede restaurar el flujo de la membrana (generalmente indicado por una disminución del flujo por debajo de cierto nivel o un aumento de la presión transmembrana (TMP) por encima de cierto nivel), es necesaria una limpieza química para restaurar la limpieza de las membranas. Los principales productos químicos de limpieza son el hidróxido de sodio. El sistema de limpieza química está compuesto por bombas de limpieza, tanques de agua de limpieza, dispositivos de dosificación, así como tuberías, válvulas, instrumentos y sistemas de control asociados.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño de la limpieza química:

- Método de limpieza: Circuito CIP (cleaning in place);
- Frecuencia de la limpieza química: Una vez cada 3 a 7 días;
- Duración de la limpieza química: 20 a 60 minutos por sesión (se recomienda aumentar el tiempo si la temperatura del agua es baja);
- Productos químicos de limpieza: Hidróxido de sodio, ácido cítrico;
- Concentración de químicos: Hidróxido de sodio (0,1-0,2 %), ácido (0,2-0,4 %)

#### Parámetros Bomba de Limpieza Química

- Tipo: Bomba centrífuga horizontal
- Cantidad: 6 unidades
- Caudal: 270 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica: 15 m
- Potencia: 30 kW
- Material en contacto con el fluido: Acero inoxidable de doble fase
- Compatibilidad química: pH 0 a 14, cloro ≤ 2000mg/l, NaOH, HCl
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Clase de aislamiento del motor: F
- Grado de protección del motor: IP54
- Método de control: Control por variador de frecuencia

#### Parámetros Tanque de Agua de Limpieza Química

- Cantidad: 6 unidades
- Volumen individual: 20 m<sup>3</sup>
- Material: PE

#### 2.5.2.4 Tanque de Agua Producida por Ultrafiltración

El tanque de agua producida por UF se ubica entre el sistema de UF y el sistema de OI, actuando como un amortiguador central entre la unidad de pretratamiento y la unidad de desalinización. Desempeña múltiples funciones: almacenar el agua producida por la UF, equilibrar el flujo del sistema y garantizar una alimentación estable a la OI.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño de la limpieza química:

- Cantidad: 1 unidad
- Volumen útil: 2000 m<sup>3</sup>
- Tipo de estructura: Estructura de hormigón armado, con protección anticorrosiva en su interior.
- Tiempo de retención:  $TR = 2000/5374 \Rightarrow TR = 0.372 \text{ h} = 22.3 \text{ minutos}$

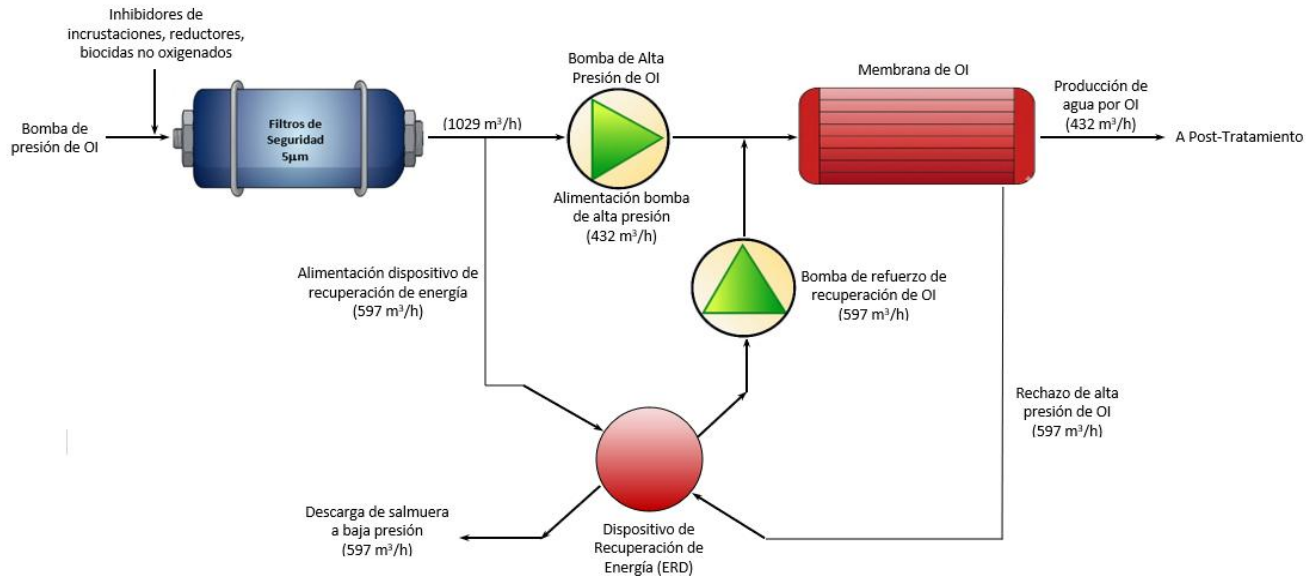
Este tiempo permite:

- Amortiguar retrolavado UF
- Evitar cavitación en bombas OI
- Estabilizar presión de succión
- Cumple criterios de estabilidad RAS.

#### 2.5.3 Sistema de Osmosis Inversa de Agua de Mar

La ósmosis inversa (OI) es una tecnología de separación por membrana que aprovecha la función de las membranas de permeabilidad selectiva (semipermeables) y utiliza la diferencia de presión

como fuerza motriz. Cuando la presión aplicada al sistema es mayor que la presión osmótica de la solución, las moléculas de agua atraviesan continuamente la membrana, pasan por los conductos de agua producida y fluyen hacia el tubo central, para luego salir por el extremo de salida. Las impurezas presentes en el agua de entrada, tales como iones, sustancias orgánicas, bacterias, virus, etc., quedan retenidas en el lado de entrada de la membrana y, posteriormente, salen por el extremo de salida de agua concentrada (rechazo), logrando así el objetivo de desalinización y purificación.



**Figura 8. Diagrama del proceso y balance hídrico de un sistema de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa**

Por diseño, el sistema de membranas de ósmosis inversa de este proyecto tiene una capacidad de producción nominal de 2160 m<sup>3</sup>/h, e incluye un sistema de alimentación de agua, las unidades de membranas de ósmosis inversa, el sistema de enjuague, el sistema de limpieza química y el sistema de dosificación de productos químicos. El sistema está diseñado con cinco (5) unidades de membranas de ósmosis inversa, cada una con una capacidad de producción nominal de 432 m<sup>3</sup>/h.

Cálculo Caudal de Alimentación

$$Q_f = \frac{Q_p}{R}$$

$$Q_f = \frac{2.257}{0.42}$$

$$Q_f = 5.374 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este valor es exactamente la capacidad del sistema de ultrafiltración adoptado.

Cálculo Caudal de Rechazo

$$Q_c = Q_f - Q_p$$

$$Q_c = 5.374 - 2.257 = 3.117 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este valor es fundamental para dimensionar el sistema de recuperación de energía.

#### 2.5.3.1 Bomba de Presurización de Entrada para Osmosis Inversa

La bomba de aumento para SWRO es un equipo clave de elevación de presión entre el tanque de agua producida por UF y la bomba de alta presión de OI. Su función principal es proporcionar un caudal de alimentación estable y suficiente al sistema de OI, superando las pérdidas de carga del filtro de seguridad, las tuberías y los equipos auxiliares, asegurando que la entrada de la bomba de alta presión tenga suficiente presión neta positiva de succión (NPSH) para evitar la cavitación y garantizar la estabilidad operativa a largo plazo de la bomba de alta presión.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño de la bomba de presurización para Osmosis Inversa:

- Tipo: Bomba centrífuga horizontal
- Cantidad: 5 unidades
- Caudal: 1075 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica: 30 m
- Material en contacto con el fluido: Acero inoxidable dúplex
- Potencia: 125 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Clase de aislamiento del motor: F
- Grado de protección del motor: IP54
- Método de control: VFD, con filtro armónico

Los 30 metros de altura manométrica cubren las pérdidas en el filtro de seguridad.

#### 2.5.3.2 Filtro de Seguridad

El filtro de seguridad se instala después de la bomba de aumento de OI y antes de la bomba de alta presión. Es la última barrera contra partículas antes de la unidad de desalinización por OI. Su función principal es retener cualquier sólido suspendido residual, partículas de medios filtrantes rotos, productos de corrosión y restos de tuberías que puedan haber pasado de las etapas anteriores, asegurando que el agua de alimentación que ingresa a los elementos de membrana de OI tenga una turbiedad cercana a cero y un índice de densidad de sedimentos (SDI) que cumpla con los requisitos, previniendo fundamentalmente la obstrucción por partículas y el daño mecánico a los módulos de membrana.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño del Filtro de Seguridad:

- Cantidad: 5 unidades
- Caudal de tratamiento unitario: 1075 m<sup>3</sup>/h
- Presión de diseño: 0.6 MPa
- Material del cuerpo del equipo: Acero al carbono revestido en caucho
- Temperatura de trabajo: Ambiente

- Precisión de filtración: 5  $\mu\text{m}$
- Material del cartucho filtrante: PP

#### 2.5.3.3 Bomba de Alta Presión para Ósmosis Inversa

La bomba de alta presión para OI es el equipo de potencia central del sistema de desalación de agua de mar. Su función es elevar el agua de mar de baja presión, tratada por el filtro de seguridad, a la alta presión necesaria para superar la presión osmótica del agua de mar y la resistencia de los elementos de membrana, proporcionando un flujo de alimentación de alta presión continuo, estable y sin pulsos a la pila de membranas de OI, logrando así la separación eficiente de las sales disueltas y el agua.

A continuación, se detallan los parámetros de diseño de la bomba de alta presión para Osmosis Inversa:

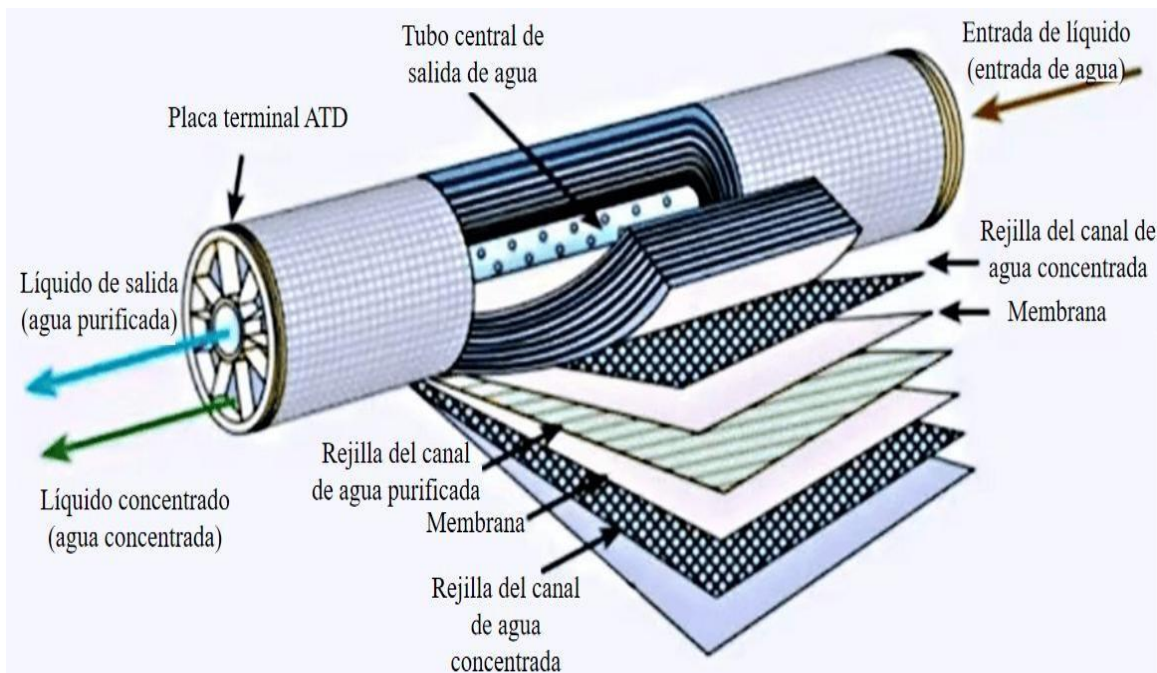
- Cantidad: 5 unidades;
- Caudal: 451.5  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- Altura manométrica: 600 m;
- Altura equivalente a:  $P \approx 60 \text{ bar}$
- Material en contacto con el fluido: Acero inoxidable dúplex
- Potencia: 1000 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Clase de aislamiento del motor: F
- Grado de protección del motor: IP54
- Método de control: Control de frecuencia variable

Suficiente para:

- Superar presión osmótica ( $\sim 27 \text{ bar}$ )
- Compensar pérdidas internas
- Garantizar flujo neto
- La bomba HP no bombea todo el caudal de alimentación porque el sistema usa intercambiador de presión (PX).

#### 2.5.3.4 Unidad de Membrana de Ósmosis Inversa para Agua de Mar

La membrana de ósmosis inversa es uno de los componentes clave del sistema de desalinización de agua de mar. Se encarga de eliminar las sales solubles, los coloides, las sustancias orgánicas y los microorganismos del agua, de modo que la calidad del agua tratada cumpla con los requisitos de los usuarios. En función de las características del agua, se utiliza una membrana compuesta de ósmosis inversa adecuada para la desalinización de agua de mar, con una longitud de 40 pulgadas (1016 mm).



**Figura 9. Elemento de membrana SWRO**

Las tuberías de agua de entrada, agua potabilizada y agua concentrada de la planta de membranas de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) están equipadas con una serie de válvulas de control, instrumentos de monitorización y un sistema de control programable, que garantizan el funcionamiento sistemático de la instalación a largo plazo, manteniendo la calidad y el rendimiento.

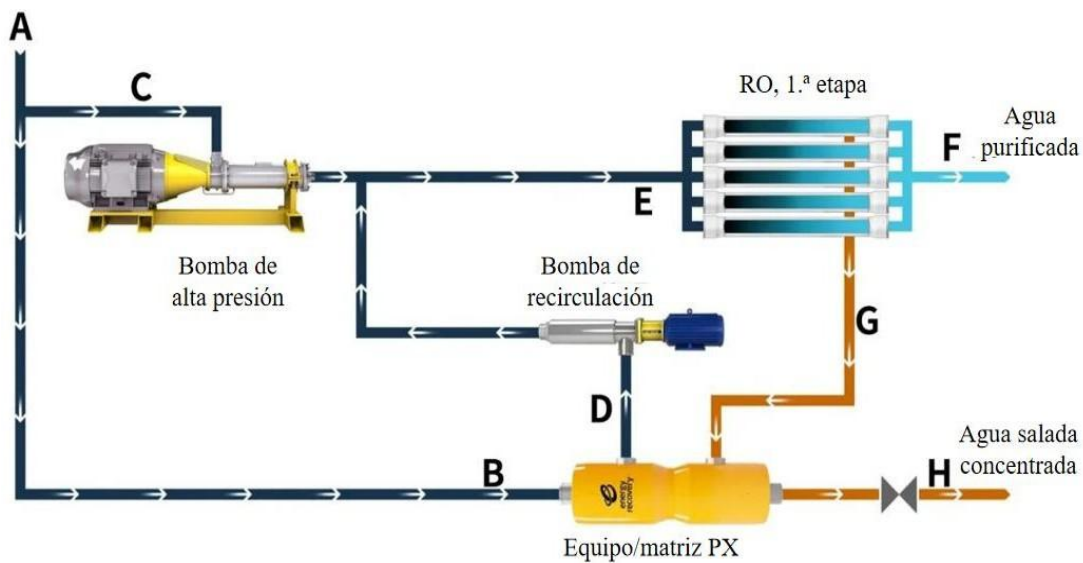
A continuación, se detallan sus parámetros de diseño:

- Número de unidades: 5
- Capacidad de producción de agua por unidad: 451.5 m<sup>3</sup>/h (20 °C);
- Tasa de recuperación nominal: 42 %;
- Temperatura nominal: 20 °C;
- Número total de elementos de membrana por unidad: 896;
- Número total de carcasas de membrana por unidad: 128 (7 núcleos);
- Configuración (etapas, secciones): 1 etapa, 1 sección;
- Material de la membrana: Poliamida;
- Tasa de desalinización: 99,2 %;
- Flujo de la membrana (20 °C): 13 LMH;
- Especificaciones del cartucho: 8 pulgadas, 7 núcleos, 1000 psi;
- Material del cartucho: FRP;
- Presión de trabajo: 10 Mpa;

#### 2.5.3.5 Sistema de Recuperación de Energía

El dispositivo de recuperación de energía es el equipo de ahorro energético fundamental de los sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa; su función consiste en recuperar y reutilizar la energía de presión del flujo de rechazo (agua salada concentrada a alta presión » superior a 5,0 MPa) que se desecha del sistema de ósmosis inversa, lo que permite reducir significativamente el consumo de energía en la producción de agua y los costos de operación. Su principio de funcionamiento es el siguiente: el agua que sale de la bomba de elevación de ósmosis inversa se divide en dos ramales que ingresan al sistema de ósmosis inversa; uno de ellos es presurizado mediante una bomba de alta presión hasta alcanzar la presión de entrada de la ósmosis inversa, y su caudal es ligeramente superior al caudal de agua producida por la ósmosis inversa; la otra entra en el dispositivo de recuperación de energía PX, donde, mediante un intercambio hidráulico directo de energía con el concentrado de ósmosis inversa, la energía del concentrado se convierte en energía de alimentación para la bomba de presurización, lo que aumenta considerablemente la presión de entrada de la bomba de presurización hasta un nivel cercano a la presión de entrada de la ósmosis inversa; a continuación, la bomba de presurización eleva ligeramente la presión hasta alcanzar la presión de entrada de la ósmosis inversa.

Este diseño incluye un sistema de recuperación de energía (ERI) y sus equipos auxiliares. Este sistema alcanza una eficiencia de recuperación de energía superior al 98 %, lo que permite reducir el consumo energético total del sistema entre un 50 % y un 60 %, mejorando considerablemente la rentabilidad de la desalinización de agua de mar.



**Figura 10. Esquema del funcionamiento del dispositivo de recuperación de energía PX**

En la figura 9, todas las magnitudes de flujo guardan la siguiente relación:

$$A = E = B + C = F + G$$

$$G = H$$

En la ecuación:

- **A** es el caudal de entrada de agua de mar de un sistema de ósmosis inversa de agua de mar ( $m^3/h$ );

- **B** es el caudal de entrada de agua de mar de la planta de PX (m<sup>3</sup>/h);
- **C** es el caudal de la bomba de alta presión (m<sup>3</sup>/h);
- **D** es el caudal de salida de agua de mar de la planta de PX (m<sup>3</sup>/h);
- **E** es el caudal de entrada de agua de mar de un sistema de ósmosis inversa de agua de mar (m<sup>3</sup>/h);
- **F** es el caudal de agua producida por un sistema de ósmosis inversa de agua de mar (m<sup>3</sup>/h);
- **G** es el caudal de agua concentrada de entrada a la planta de PX (m<sup>3</sup>/h);
- **H** es el caudal de agua concentrada de salida de la planta de PX (m<sup>3</sup>/h)

### 1) Cálculos de diseño

Los cálculos técnicos del sistema de recuperación de energía PX pueden realizarse mediante el software especializado de la empresa fabricante. La

eficiencia de recuperación de energía del equipo PX puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{D \times P_D + H \times P_H}{G \times P_G + B \times P_B} \times 100\%$$

En la ecuación:

- $\eta$  es la eficiencia de recuperación de energía (%);
- $P_B$  es la presión del agua de mar a la entrada de la unidad de PX (MPa);
- $P_D$  es la presión del agua de mar a la salida de la unidad de PX (MPa);
- $P_G$  es la presión del agua concentrada a la entrada de la unidad de PX (MPa);
- $P_H$  es la presión del agua concentrada a la salida de la unidad de PX (MPa);

Los demás símbolos se definen anteriormente.

Cabe señalar que, debido a que esta instalación utiliza una transferencia de energía directa de líquido a líquido, se produce una cierta mezcla entre el concentrado de ósmosis inversa y el agua de mar de entrada a la planta de PX, que suele ser del 2% al 3%. Esta mezcla provocará un ligero aumento en la salinidad del agua de entrada a la instalación de ósmosis inversa, lo que incrementará ligeramente el consumo de energía para la producción de agua. La salinidad del agua de entrada al sistema de ósmosis inversa se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

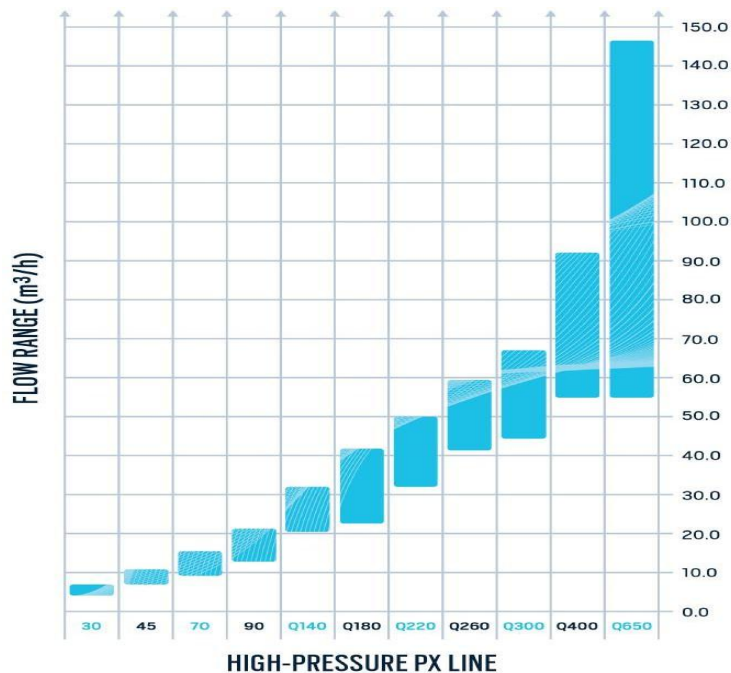
Salinidad del agua de entrada al sistema de ósmosis inversa = Salinidad del agua de origen  $\times$  (1 + tasa de mezcla de sal)

La tasa de mezcla de sal se puede calcular mediante la siguiente fórmula empírica:

Tasa de mezcla de sal  $\approx$  tasa de recuperación del sistema  $\times$  0,0624.

## 2) Configuración y selección de equipos

La presión máxima de funcionamiento del dispositivo de recuperación de energía PX es de 8,3 MPa. Se pueden conectar en paralelo varios elementos de intercambio de energía PX según los requisitos de caudal. La Figura 10 muestra los modelos y caudales de los elementos de intercambio de energía PX. Los elementos de intercambio de energía PX deben seleccionarse con el mayor caudal posible en función de la capacidad de la planta desalinizadora, a fin de reducir el número de elementos conectados en paralelo y mejorar la eficiencia; para este proyecto, se prevé utilizar 7 unidades del dispositivo de recuperación de energía modelo PX-Q400 por cada unidad de membrana de ósmosis inversa, lo que suma un total de 35 unidades, más 2 unidades de reserva en frío, lo que da un total de 37 unidades.



**Figura 11. Caudal y modelos de los dispositivos de recuperación de energía PX**

- 1) Cuando varias unidades de PX se conectan en paralelo, la configuración del sistema puede adoptar dos modalidades: Z-flow o U-flow. En el Z-flow, las entradas y salidas de las tuberías principales de las unidades de PX están orientadas en direcciones opuestas, mientras que en el U-flow están orientadas en la misma dirección. Dado que el U-flow suele ofrecer un mejor reparto del caudal que el Z-flow, en este proyecto se propone adoptar la configuración U-flow.
- 2) Para evitar la cavitación, la tubería de descarga de agua concentrada de la unidad de PX debe estar equipada con una válvula de estrangulamiento que genere contrapresión y evite daños por cavitación. La presión mínima de descarga de agua concentrada no debe ser inferior a 0,06 MPa; por lo general, se diseña para 0,1 MPa.
- 3) Las bombas de presurización de ósmosis inversa de agua de mar deben contar con control de frecuencia variable para estabilizar el caudal de entrada de la unidad de ósmosis inversa.

### 3) Parámetros de la bomba booster recuperación de energía

- Cantidad: 5 unidades;
- Caudal: 623.5 m<sup>3</sup>/h;
- Altura manométrica: 40 m;
- Material en contacto con el fluido: Acero inoxidable dúplex;
- Temperatura del medio: -15 ~ 110°C;
- Potencia: 100 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V, 60Hz
- Clase de aislamiento del motor: F
- Grado de protección del motor: IP55
- Método de control: Control por variador de frecuencia

### 4) Parámetros del dispositivo de recuperación de energía seleccionado

- Cantidad: 37 unidades;
- Modelo: PX-Q400;
- Rango de caudal: 65.9 - 90.9 m<sup>3</sup>/h;
- Tipo: Intercambiador de presión;
- Material: FRP, cerámica;
- Eficiencia: 98%;

El caudal de salmuera (»597 m<sup>3</sup>/h por tren) transfiere energía al agua de alimentación. Esto reduce potencia requerida por bomba HP.

$$Q_{salmuera} = 1075 - 451.4$$
$$Q_{salmuera} = \frac{623.6 \text{ m}^3}{h}$$

Este valor corresponde a la capacidad del booster del sistema de recuperación de energía (» 630 m<sup>3</sup>/h).

#### 2.5.3.6 Sistema de Dosificación para Ósmosis Inversa

##### (1) Sistema de dosificación de reductores

El módulo de dosificación de reductores es el elemento clave para la protección contra la oxidación de los elementos de membrana en los sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa. Su función consiste en dosificar con precisión el reductor en el agua de entrada a la ósmosis inversa, neutralizando los desinfectantes oxidantes (cloro residual) que quedan en el sistema de pretratamiento, y controlando estrictamente la concentración de cloro residual en el agua de entrada a los elementos de membrana por debajo de 0,05 mg/L, para evitar la disminución irreversible de la tasa de desalinización de las membranas compuestas de poliamida debido a la oxidación. Los parámetros de diseño son los siguientes:

- Dosis de diseño: 3 mg/L;
- Punto de dosificación: 1;
- Modo de dosificación: dosificación continua;
- Concentración de la solución: 10 %

## **(2) Sistema de dosificación de inhibidores de incrustaciones**

El sistema de dosificación de inhibidores de incrustaciones es la instalación clave para la protección contra incrustaciones de los elementos de membrana en los sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa. Su función consiste en dosificar con precisión un inhibidor de incrustaciones específico en el agua de entrada de la ósmosis inversa, lo que retrasa y previene eficazmente la cristalización y sedimentación de sales inorgánicas poco solubles, como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$  y  $\text{SiO}_2$ , en la superficie de la membrana de ósmosis inversa, garantizando así el funcionamiento estable y prolongado del sistema de ósmosis inversa en condiciones de alta tasa de recuperación. Los parámetros de diseño son los siguientes:

- Dosis de dosificación prevista: 5 mg/L;
- Puntos de dosificación: 5;
- Modo de dosificación: dosificación continua;
- Concentración de la solución: 10 %

### **2.5.3.7 Módulo de Lavado por Ósmosis Inversa**

El módulo de lavado por ósmosis inversa se utiliza para realizar lavados periódicos del paquete de membranas a baja presión y alto caudal, con el fin de eliminar el agua de alta concentración salina dentro de los elementos de membrana, eliminar los sedimentos de la superficie de las membranas y prevenir el riesgo de proliferación microbiana y formación de incrustaciones. El sistema está compuesto por un tanque de lavado, una bomba de lavado, válvulas eléctricas y un controlador PLC; donde el agua de lavado proviene del agua producida por ósmosis inversa. El programa de lavado está interconectado con la unidad principal y se inicia automáticamente cuando el sistema se detiene o a intervalos de tiempo preestablecidos; el lavado dura entre 10 y 15 minutos, y las aguas residuales del lavado se descargan a través de la tubería de agua concentrada. Los parámetros de diseño son los siguientes:

- Frecuencia de lavado: cada 24 horas/parada;
- Caudal de lavado: elemento de membrana individual de 8 pulgadas  $\leq 10,9 \text{ m}^3/\text{h}$  (28 mil) o  $12,1 \text{ m}^3/\text{h}$  (34 mil);
- Presión de lavado:  $\leq 0,4 \text{ MPa}$

#### **1) Parámetros bomba de lavado**

- Cantidad: 2 unidades;
- Caudal:  $1050 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- Altura manométrica: 35 m;
- Potencia: 132 kW

- Material en contacto con el fluido: acero inoxidable 304
- Fuente de alimentación: 3P, 440V/60Hz
- Método de control: Control de frecuencia variable

## **2) Parámetros Filtro de Seguridad**

- Cantidad: 1 unidad,
- Caudal de tratamiento: 1050 m<sup>3</sup>/h
- Presión de diseño: 0.3 MPa
- Material del cuerpo del equipo: acero inoxidable 304
- Temperatura de trabajo: Ambiente
- Precisión de filtración: 5 µm
- Material del cartucho filtrante: PP

## **3) Parámetros del Tanque de Agua de Limpieza**

- Cantidad: 1 unidad;
- Volumen útil: 300 m<sup>3</sup>;
- Tipo de estructura: Estructura de hormigón armado, con tratamiento anticorrosivo interior

### 2.5.3.8 Módulo de limpieza química por ósmosis inversa

Este módulo se utiliza para recuperar el rendimiento de los elementos de membrana de ósmosis inversa contaminados. Es necesario limpiar los elementos de membrana cuando se dan las siguientes circunstancias: ① la producción de agua normalizada se reduce en un 15 %; ② la permeabilidad salina normalizada aumenta en más de un 5 %; ③ la diferencia de presión normalizada entre el agua de entrada y el concentrado aumenta un 15 %.

La limpieza de las membranas de ósmosis inversa se divide en limpieza ácida y limpieza alcalina: la limpieza ácida se utiliza principalmente para eliminar los depósitos de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> de la superficie de la membrana; la limpieza alcalina se utiliza principalmente para eliminar la contaminación orgánica de la superficie de la membrana. Los parámetros de diseño para la limpieza química son los siguientes:

- Método de limpieza: Circuito CIP + remojo + enjuague con agua limpia;
- Frecuencia de la limpieza química: Una vez cada 30 días;
- Duración de la limpieza química: Circuito CIP (45 min a varias horas) + remojo (≥30 min) + enjuague con agua limpia cada (20 a 60 min); en caso de contaminación grave, se pueden prolongar los distintos pasos;
- Productos químicos de limpieza: hidróxido de sodio, ácido;
- Concentración de productos químicos de limpieza: hidróxido de sodio (0,1-0,2 %), ácido (0,2 %);
- Caudal de circulación por recipiente a presión individual: 10 m<sup>3</sup>/h;
- Presión de circulación: ≤0,4 Mpa;

### **1) Parámetros Bomba de Limpieza Química**

- Cantidad: 2 unidades;
- Caudal: 1050 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica: 35 m
- Potencia: 132 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V/60Hz
- Material en contacto con el fluido: acero inoxidable 316
- Método de control: Control de frecuencia variable

### **2) Parámetros Filtro de Seguridad**

- Cantidad: 1 unidad
- Caudal de tratamiento: 1050 m<sup>3</sup>/h
- Presión de diseño: 0.3 MPa
- Material del cuerpo del equipo: acero inoxidable 316
- Temperatura de trabajo: Ambiente
- Precisión de filtración: 5 µm
- Material del cartucho filtrante: PP

### **3) Parámetros Tanques Agua de Limpieza**

- Cantidad: 2 unidades;
- Volumen: 20 m<sup>3</sup>;
- Material: PE

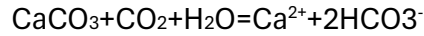
#### **2.5.4 Sistema de Remineralización**

El agua producida por ósmosis inversa a partir de agua de mar presenta una alcalinidad y una dureza bajas, y la presencia de CO<sub>2</sub> da lugar a un pH bajo, lo que provoca corrosión en las tuberías y tanques del sistema de distribución. Debido a esto, en caso de introducirse el flujo directamente a las redes, causará el deterioro acelerado de las redes de distribución, e incluso podría provocar el «fenómeno del agua roja». Así las cosas, es imprescindible someter el agua producida por ósmosis inversa a un tratamiento de mineralización para aumentar su contenido de minerales y su alcalinidad, con el fin de que la calidad del agua alcance un estado de estabilidad química.

El sistema de postmineralización debe diseñarse de manera que la calidad del agua tratada cumpla con los requisitos de la Resolución 2115 de 2007 y las normas que sugiere la Organización Mundial de la Salud. En este proyecto se adopta un proceso de mineralización que combina la «adición de CO<sub>2</sub>» con un «contactador de caliza de flujo ascendente»; esta solución es adecuada para grandes proyectos de desalinización de agua de mar y se caracteriza por su estabilidad operativa y su alta rentabilidad.

En el contactador de caliza de flujo ascendente, el agua de ósmosis inversa acidificada con CO<sub>2</sub>

fluye de abajo hacia arriba a través del lecho filtrante de caliza triturada. A medida que el agua fluye hacia arriba, el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se disuelve continuamente, produciendo la siguiente reacción:



El pH de equilibrio de esta reacción depende de diversos factores, entre ellos el contenido de  $\text{CO}_2$  en el agua, la alcalinidad, los sólidos totales disueltos (TDS), la temperatura del agua y la velocidad de la corriente ascendente. Siempre que se proporcione un tiempo de reacción suficiente dentro del lecho filtrante de caliza, el carbonato de calcio puede alcanzar un estado cercano a la saturación, lo que hace que el índice de saturación de Langelier (LSI) del agua de salida se acerque a cero o sea superior a cero, garantizando así una calidad del agua estable y sin tendencia a la corrosión.

#### 2.5.4.1 Adición de Dióxido de Carbono

El sistema de dosificación de dióxido de carbono es la unidad de pretratamiento fundamental del proceso de mineralización tras la desalinización por ósmosis inversa. Como unidad de acidificación previa al contactador de caliza, ajusta el pH del agua de entrada al rango óptimo de disolución de 4,8 a 5,2 mediante la adición de dióxido de carbono al agua producida por ósmosis inversa, lo que favorece la reacción de disolución en el lecho filtrante de carbonato de calcio ocurrida posteriormente. Esta dosificación es el eslabón clave que conecta el agua de producción de la ósmosis inversa con el tanque de remineralización, y afecta directamente a la estabilidad de la calidad del agua remineralizada. Sus parámetros de diseño son:

- Cantidad de inyección prevista: 50 mg/L;
- Punto de inyección: 1;
- Método de inyección: continua;

#### 2.5.4.2 Contactador de Piedra Caliza (flujo ascendente)

El contactador de piedra caliza es una instalación especializada para el tratamiento de la estabilidad química del agua producida por ósmosis inversa. Su función principal consiste en aumentar la alcalinidad y la dureza del agua mediante la reacción de disolución del carbonato de calcio, así como en ajustar el valor del pH, con el fin de que la calidad del agua alcance un estado de estabilidad química y se elimine la tendencia a la corrosión en las redes de distribución de agua posteriores.

Esta instalación, diseñada para abordar las características del agua de ósmosis inversa con baja dureza, baja alcalinidad y bajo pH, debido al contenido de  $\text{CO}_2$ , utiliza el proceso de «adición de  $\text{CO}_2$  + contacto con caliza en flujo ascendente». El agua de producción acidificada fluye de abajo hacia arriba a través del lecho filtrante de piedra caliza, donde se produce la reacción de disolución del  $\text{CaCO}_3$ . El  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{HCO}_3^-$  generados se incorporan al agua, lo que hace que el índice de saturación de Langelier (LSI) se acerque a cero o sea mayor que cero, garantizando así la estabilidad y fiabilidad de la calidad del agua a la salida de la planta. Los parámetros de diseño son los siguientes:

### 1) Parámetros Calidad del Agua

Condiciones del agua antes de la postmineralización	Requisitos de la calidad del agua tras la postmineralización
TDS (mg/L): 100-400	TDS (mg/L): ≤500
pH: 6,45-6,5	pH: 7,5~8,2
CO <sub>2</sub> , mg/L: 1	Índice de Langelier: ≈+0,2
Calcio (Ca <sup>2+</sup> , mg/L): 1	Calcio (Ca <sup>2+</sup> , mg/L): ≥20
	Turbidez: <0,5

### 2) Parámetros Contactor de Piedra Caliza

- Cantidad: 10 celdas
- Caliza Disposición: doble fila 2×5 (10 compartimentos);
- Tipo de estructura: hormigón armado;
- Dimensiones de cada compartimento: 6,6 m × 3,6 m;
- Modo de funcionamiento: flujo ascendente;
- Carga hidráulica: 9,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h;
- Altura de la zona de distribución de agua: 0,85 m;
- Altura de la capa de placas filtrantes: 0,3 m;
- Altura de la capa de piedra caliza: 2 m;
- Tiempo de contacto en lecho vacío: 13,2 min;
- Altura de la zona de agua purificada: 1,5 m;
- Modo de retrolavado: aire + agua;
- Intensidad de lavado con aire: 12 L/s.m<sup>2</sup>;
- Intensidad de lavado con agua: 6 L/s.m<sup>2</sup>;
- Área requerida:

$$A = 2160 / 9,1$$

$$A = 237,36 \text{ m}^2$$

Área instalada: 10 celdas × 23,76 m<sup>2</sup> = 237,6 m<sup>2</sup>

Coincidencia exacta, adecuado para estabilización química

Parámetros Soplador tipo Roots para Lavado con Aire

- Cantidad: 2 unidades
- Caudal de aire: 26 m<sup>3</sup>/min = 0.433m<sup>3</sup>/s

- Presión de descarga: 70 kPa (sobrepresión sobre la atmosférica)
- Presión atmosférica: 101.325 kPa (nivel del mar, Santa Marta)
- Eficiencia global estimada ( $\eta$ ): 0,7 (eficiencia mec. + eficiencia motor eléctrico)
- Fuente de alimentación: 3P, 440V/60Hz
- Intensidad lavado con aire: 12 L/s.m<sup>2</sup>
- Potencia: 45 kW

$$P = \frac{Q \times \Delta P}{\eta}$$

$$P = \frac{0,433 \text{ m}^3/\text{s} \times 70.000 \text{ Pa}}{0,7} = 43.300 \text{ Watts} \approx 43,3 \text{ kW}$$

### 3) Parámetros Bomba de Lavado con Agua

- Cantidad: 1 unidad
- Caudal: 720 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica: 15 m
- Potencia: 45 kW
- Fuente de alimentación: 3P, 440V/60Hz
- Material en contacto con el fluido: acero inoxidable 304
- Método de control: Control de frecuencia variable
- Intensidad de lavado con agua: 6 L/s.m<sup>2</sup>

### 2.5.5 Sistema de Abastecimiento de Agua

#### 2.5.5.1 Sistema de Dosificación de Hipoclorito de Sodio

El sistema de desinfección con hipoclorito de sodio es la unidad que garantiza la seguridad de la calidad del agua al final del proceso de mineralización tras la

desalinización por ósmosis inversa; su función principal consiste en añadir una solución de hipoclorito sódico para desinfectar el agua de salida antes de que esta entre en el tanque de agua potable o en la red de distribución, eliminar los microorganismos que puedan introducirse durante el proceso de mineralización, garantizar que los índices de cloro residual del agua de salida cumplan con los requisitos establecidos en la Resolución 2115 de 2007, y mantener una capacidad de desinfección continua en la red de distribución para prevenir la contaminación secundaria. Los parámetros de diseño son los siguientes:

Dosis de diseño: 1 mg/L; Punto de dosificación: 1;

Método de dosificación: dosificación continua;

### 2.6 Tratamiento de Aguas Residuales

La siguiente tabla presenta un resumen de la clasificación de las aguas residuales del presente

proyecto; los métodos de tratamiento que se indican constituyen una propuesta preliminar. Los procesos definitivos para su tratamiento y las vías de descarga de cada tipo de agua residual deberán someterse a revisión y confirmación, ajustándose estrictamente a la normatividad ambiental vigente. En las fases posteriores, será necesario evaluar a fondo los métodos de tratamiento de aguas residuales y realizar los ajustes necesarios, teniendo en cuenta los requisitos específicos de la autoridad ambiental competente, a fin de garantizar el pleno cumplimiento normativo.

TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	FUENTE	PRINCIPALES CONTAMINANTES	MÉTODOS DE TRATAMIENTO PRELIMINAR	DESTINO FINAL
Aguas con residuos de flotación por aire	Tanque de flotación por aire	Algas, grasas, partículas en suspensión.	Pretratamiento de separación de grasas/deshidratación	Descarga al mar a través de la tubería de aguas residuales (sujeto a evaluación)
Aguas de retrolavado de ultrafiltración	Unidad de ultrafiltración	Partículas en suspensión, coloides	No requiere tratamiento	Descarga directa al mar a través de la tubería de aguas residuales
Aguas residuales de CIP de ultrafiltración	Unidad de ultrafiltración	Altas concentraciones de ácidos y álcalis, agentes complejantes	Tratamiento de neutralización	Descarga al mar a través de la tubería de aguas residuales tras neutralización
Aguas de lavado de ósmosis inversa	Unidad de ósmosis inversa	Alta salinidad	No requiere tratamiento	Conexión directa a la tubería de agua concentrada para su vertido al mar
Tipos de aguas residuales	Fuente	Principales contaminantes	Métodos de tratamiento preliminar	Destino final
Aguas residuales de CIP de ósmosis inversa	Unidad de ósmosis inversa	Altas concentraciones de ácidos y álcalis, inhibidores de incrustaciones	Tratamiento de neutralización	Tras la neutralización, se vierte al mar a través de la tubería de aguas residuales
Aguas salinas concentradas de ósmosis inversa	Unidad de ósmosis inversa	Alta salinidad	No requiere tratamiento	Vertido al mar (dilución mediante difusores)

## **2.7 Soluciones de Sistemas de Control Automático**

### **2.7.1 Principios de Diseño de los Sistemas de Control Automático**

Teniendo en cuenta el avance tecnológico y las características específicas del proceso de tratamiento de agua de este proyecto, se ha diseñado un sistema que funciona con mínima cantidad de personal y con un modo de gestión totalmente automatizado. El objetivo concreto es mejorar la fiabilidad y la seguridad de la producción, lograr un suministro de agua de alta calidad, bajo consumo de energía y alta eficiencia, con el objeto de obtener buenos resultados económicos y sociales.

#### **2.7.1.1 Gestión Centralizada, Control Local**

Consiste en un sistema de monitoreo remoto centralizado basado en Ethernet Industrial; donde la configuración se implementará bajo un modelo operación y gestión remota "sala de control no atendida in situ, con operación completamente automatizada de los equipos", por medio de un sistema de control basado en PLC que se encargará de la adquisición de datos del proceso, el control de los equipos como bombas, sensores, actuadores, etc., y la coordinación de los procesos en cada etapa. facilitando la coordinación del proceso dentro de cada segmento del proceso, el diagnóstico de problemas en tiempo real y reduciendo los tiempos de inactividad.

#### **2.7.1.2 Funcionalidad Completa y Gestión Ordenada**

El circuito de control automático cuenta con tres modos de funcionamiento: manual, secuencial y totalmente automático. Se ha configurado el manejo local para el control y la puesta a punto in situ; los equipos de control eléctrico disponen de control manual in situ (caja de control junto a la máquina), control paso a paso local (pulsadores locales e interfaz de control con pantalla táctil) y control central y automático (sistema de control in situ o sistema de control central). La configuración de los instrumentos es sencilla, confiable y práctica, cumple con los requisitos del proceso de suministro secundario de agua y monitorea de manera continua el proceso de tratamiento.

#### **2.7.1.3 Diseño de Confiabilidad**

El uso de un control distribuido totalmente digital mediante bus de campo contribuye a mejorar la fiabilidad general del sistema de control. En situaciones extremas, como en caso de fallo del sistema de control que provoque la pérdida de control del funcionamiento de equipos locales, el proceso de producción de la planta de tratamiento de agua puede continuar con normalidad mediante el manejo manual in situ.

#### **2.7.1.4 Principios de Diseño del Sistema de Control Automatizado**

El sistema debe ser altamente confiable, maduro, avanzado y ofrecer una buena relación costo - rendimiento. Aprovechando al máximo las tecnologías avanzadas del ámbito informático, el sistema alcanzará el nivel de vanguardia internacional actual. Se trata de un sistema de control automatizado totalmente distribuido y abierto, que facilita la ampliación de funciones y hardware, al tiempo que protege plenamente los recursos de aplicación y la inversión. El diseño de la base de datos distribuida y la estructura modular del software permiten que el sistema se adapte al aumento de funciones y a la expansión de su escala; ofreciendo capacidad de respuesta en tiempo

real y alta resistencia a las interferencias, utiliza software de configuración de uso internacional, cuenta con una interfaz hombre-máquina intuitiva y fácil de manejar además de cumplir con las normas nacionales e internacionales.

## **2.7.2 Control del Sistema**

### **2.7.2.1 Función de Autodiagnóstico del Sistema**

La función de autodiagnóstico del sistema se ha implementado a partir de las funciones de diagnóstico del PLC, combinada con la experiencia del futuro operador. Esta función proporciona información sobre fallas del sistema e instrucciones de mantenimiento, así como alarmas de reemplazo por fallo de componentes consumibles del sistema, lo que juega un papel complementario importante en el sostenimiento y la reparación del sistema.

### **2.7.2.2 Circuito de Control Principal**

Además del control programado, el sistema cuenta con un panel de control local en el que se pueden leer los parámetros de proceso relevantes del sistema de ultrafiltración. Los parámetros de proceso detectados se utilizan para controlar el arranque y la parada del sistema de ultrafiltración, así como para monitorear el rendimiento de la membrana de ultrafiltración.

### **2.7.2.3 Configuración del Sistema de Control**

#### **a) Hardware**

El hardware del sistema de control consta de una red de control formada por un Controlador Lógico Programable (PLC). El PLC es un producto de rendimiento fiable ampliamente utilizado en el ámbito del control industrial.

#### **b) Software**

El software del sistema de control está compuesto por: el Software del PLC, que se ejecuta en el PLC y permite llevar a cabo diversas funciones de control.

### **2.7.2.4 Descripción de las Funciones del Sistema de Control**

#### **c) Adquisición de Datos**

Recopila información importante, como los parámetros de proceso y el estado de funcionamiento de los equipos de toda la instalación.

#### **d) Interbloqueo (Enclavamiento)**

Proporciona protección mediante enclavamientos a los equipos en caso de situaciones peligrosas o anómalas.

#### **e) Control Manual**

El sistema permite alternar entre modo manual y automático; en condiciones de funcionamiento anómalas, es posible controlar manualmente cada bomba y válvula de control.

#### **f) Integración del Control Eléctrico y de Instrumentos**

El control de los equipos eléctricos y del proceso se lleva a cabo mediante un único sistema de control, lo que mejora la integridad y la confiabilidad del sistema.

#### 2.7.2.5 Instrumentación

##### a) Descripción General

Los instrumentos de campo incluyen medidores de presión, nivel y caudal, así como válvulas de control, entre otros.

##### b) Selección de Instrumentos

El principio para selección de instrumentos de campo son que cumplan con los requisitos del proceso y que sean de calidad confiable.

#### 2.7.2.6 Instalación Eléctrica

##### a) Suministro y Distribución de Energía Eléctrica

La tensión de los equipos eléctricos de la Planta Desalinizadora de Agua de Mar para la ciudad de Santa Marta es de 380/220 VCA.

##### b) Control de los Equipos Eléctricos

Los motores cuentan con dos modos de funcionamiento: automático y manual. Además, los equipos eléctricos disponen de funciones como alarma de fallos.

##### c) Protección contra rayos y puesta a tierra

- Protección contra rayos: el diseño se realiza de conformidad con las regulaciones y normas pertinentes.
- Puesta a tierra: De acuerdo con las regulaciones y normas pertinentes, todos los equipos eléctricos que requieran puesta a tierra de protección se conectarán de manera confiable al sistema de puesta a tierra correspondiente. Esto incluye principalmente los dispositivos de distribución de energía, entre otros.

#### 2.7.2.7 Pantalla Táctil

Permite la adquisición de datos de todo el proceso de producción, incluyendo la alarma de fallas en tiempo real y la monitorización remota, entre otras funciones. A través de la función de configuración gráfica del software de la pantalla táctil, se puede mostrar dinámicamente el flujo del proceso de todo el sistema y el estado de trabajo de los equipos; además, mediante el ratón permite controlar remotamente todos los equipos del sistema.

## 2.8 Lista de Equipos Principales con sus Cargas Eléctricas

N.º	Nombre del equipo	Tensión de CAV	Potencia Nominal (kW)	Cantidad		Potencia Habitual (kW)	Capacidad Instalada (kW)	Modo de Funcionamiento
I	<b>SISTEMA DE PROCESO PRINCIPAL</b>							
1	Filtro giratorio	440/254	4.5	2	0	9	9	Con frecuencia y de manera continua
2	Bomba de presurización de agua bruta	440/254	160	2	1	320	480	Con frecuencia y de manera continua

3	Variador de velocidad del sistema de flotación por aire con recirculación	440/254	4.5	3	0	3.5	13.5	Con frecuencia y de manera continua
4	Variador de velocidad del sistema de flotación por aire con desfangado	440/254	7.5	3	0	22.5	22.5	Con frecuencia y de manera continua
5	Bomba de recirculación	440/254	90	3	3	270	540	Con frecuencia y de manera continua
6	Bomba de alimentación de UF	440/254	160	3	1	480	640	Con frecuencia y de manera continua
7	Bomba de retrolavado de UF	440/254	132	3	1	396	528	Breve
8	Bomba de CIP de UF	440/254	30	6	0	180	180	Breve
9	Bomba de presurización de Osmosis Inversa	440/254	200	5	0	1000	1000	Con frecuencia y de manera continua
10	Bomba de alta presión de Osmosis Inversa	10000	1000	5	0	5000	5000	Con frecuencia y de manera continua
11	Bomba de compensación del sistema de recuperación de energía	440/254	90	5	0	450	450	Con frecuencia y de manera continua
12	Bomba de CIP para ósmosis inversa	440/254	185	1	1	185	370	Breve
13	Bomba de lavado para ósmosis inversa	440/254	185	1	1	185	370	Breve
14	Soplador Roots	440/254	45	1	1	45	90	Breve
15	Bomba de lavado para remineralización	440/254	45	1	0	45	45	Breve
16	Bomba de agua con CO <sub>2</sub> disuelto	440/254	5.5	1	1	5.5	11	Con frecuencia y de manera continua
17	Bomba de suministro de agua	440/254	160	3	3	480	960	Con frecuencia y de manera continua
18	Bomba de neutralización	440/254	18.5	1	1	18.5	37	Breve
<b>II</b>	<b>SISTEMA DE DOSIFICACIÓN</b>							
1	Bomba de descarga de Coagulante	440/254	1.5	1	1	1.5	3	Breve
2	Bomba de dosificación de coagulante	220/127	0.42	1	1	0.42	0.84	Con frecuencia y de manera continua

3	Generador de hipoclorito de sodio	440/254	60	1	1	60	120	Con frecuencia y de manera continua
4	Unidad combinada de agua fría y caliente	440/254	6	1	1	6	12	Con frecuencia y de manera continua
5	Bomba de dosificación de hipoclorito de sodio en la toma de agua	440/254	1.5	2	1	3	4.5	Con frecuencia y de manera continua
6	Bomba de dosificación de hipoclorito de sodio para desinfección	220/127	0.42	3	2	1.26	2.1	Con frecuencia y de manera continua
7	Bomba de descarga de Sosa	440/254	1.5	3	1	4.5	6	Breve
8	Bomba de dosificación de sosa para CIP	440/254	0.37	3	1	1.11	1.48	Breve
9	Dosificación de neutralización	440/254	0.37	1	1	0.37	0.74	Breve
10	Bomba de descarga de Ácido	440/254	1.5	1	1	1.5	3	Breve
11	Bomba de dosificación de ácido CIP	440/254	0.37	3	1	1.11	1.48	Breve
12	Dosificación de neutralización	440/254	0.37	1	1	0.37	0.74	Breve
13	Mezclador para la preparación de reductores	440/254	2.2	2	0	4.4	4.4	Breve
14	Bomba de dosificación de reductores	220/127	0.42	1	1	0.42	0.84	Con frecuencia y de manera continua
15	Mezclador para la preparación de inhibidores de incrustaciones	220/127	2.2	2	0	4.4	4.4	Con frecuencia y de manera continua
16	Bomba de dosificación de inhibidores de incrustaciones	220/127	0.11	5	1	0.55	0.66	Con frecuencia y de manera continua
<b>III</b>	<b>OTROS SISTEMAS AUXILIARES</b>							
1	Compresor de aire para lavado con aire	440/254	49.5	3	1	148.5	198	Breve
2	Compresor de aire para instrumentos	440/254	5.5	1	1	5.5	11	Breve
3	Secador de aire frío para instrumentos	220/127	2.2	1	1	2.2	4.4	Con frecuencia y de manera continua
4	Bomba de agua caliente	440/254	30	1	1	30	60	Breve
5	Calentador eléctrico	440/254	100	4	0	400	400	Breve

6	Carro de vigas de la sala de bombeo	440/254	10	1	0	10	10	Poco frecuente
7	Otras cargas no consideradas					500	500	
<b>TOTAL</b>						<b>10292.11</b>	<b>12095.58</b>	

## 2.9 Análisis del Consumo Energético y de Productos Químicos

### 2.9.1 Análisis del consumo energético del sistema (calculado en función del agua producida por el sistema de ósmosis inversa)

N.º	PROYECTO	CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO (KWH/M <sup>3</sup> )	OBSERVACIONES
1	Consumo energético en el pretratamiento	0.290	
2	Consumo energético en la ultrafiltración	0.263	
3	Consumo energético en la ósmosis inversa (SWRO)	2.24	Se considera una presión de entrada, de ósmosis inversa de 5,5 MPa
4	Consumo energético en el postratamiento	0.025	
5	Consumo energético en el sistema de suministro de agua	0.222	Se considera provisionalmente una altura de elevación de 50 m
<b>TOTAL</b>		<b>3.04</b>	

### 2.9.2 Análisis del consumo de productos químicos durante el funcionamiento del sistema (calculado en función del agua producida por el sistema de ósmosis inversa)

N.º	PRODUCTOS	CONSUMO DE PRODUCTO QUÍMICO (KG/M <sup>3</sup> )	NOTAS
1	Solución de hipoclorito de sodio	0.257	Solución de cloro activo al 0,8 %
2	Tricloruro de hierro	0.127	Solución madre de cloruro de hierro al 40 %
3	Reductor	0.007	
4	Inhibidor de incrustaciones	0.012	
5	Dióxido de carbono	0.05	
6	Caliza	0.120	≥95% CaCO <sub>3</sub>
7	Hidróxido de sodio	0.009	Solución concentrada de hidróxido de sodio al 30 %

8	Ácido clorhídrico	0.018	Solución concentrada de ácido clorhídrico al 31 %
---	-------------------	-------	---