

# ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE FABRICACIÓN, SUMINISTRO, INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE PLANTA DESALINIZADORA

## PROYECTO DISEÑOS, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE PLANTA DESALINIZADORA PARA LA CIUDAD 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
Elabora	Agustín Barros Trout M.P. 25202-50476 CND	Director de Proyecto UT EYD SM 2025	

#### Interventor Contrato CMA 001-2025

	NOMBRE	CARGO	FIRMA
Aprueba	Gustavo Adolfo Hernández Cortez M.P. 08202-097720 ATL	Director de Interventoría Universidad del Magdalena	

#### Entidad Contratante Contrato CMA 001-2025

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

<b>PARTE 1 – CONDICIONES GENERALES</b>	<b>5</b>
<b>PARTE 2 – ESPECIFICACIONES POR SISTEMA Y EQUIPO</b>	<b>7</b>
I-1. Cabezal de Toma de Agua (Inmisario)	7
I-2. Compuerta Cuadrada de Fundición de Aleación Ni-Cr – Sellado Bidireccional (HZFN-II 1,6×1,6 m)	8
I-3. Compuerta Cuadrada de Fundición de Aleación Ni-Cr – Sellado Unidireccional (HZFN-II 1,6×1,6 m)	9
I-4. Rejilla Fija de Captación	10
I-5. Filtro Giratorio (Tambor Rotativo) – XKC-1500	10
I-6. Tanque de Agua Bruta	11
I-7. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Agua Bruta	12
I-8. Viga de Pórtico (Grúa Monorriel)	13
I-9. Bomba de Presurización de Agua Bruta (Bomba Sumergible de Eje Largo)	13
I-10. Válvulas para Bombas de Presurización de Agua Bruta (Lote)	15
I-11. Caudalímetro Electromagnético – DN1000	16
I-12. Válvula de Mariposa Manual – DN1000	16
I-13. Junta Telescópica de Transmisión de Fuerza – DN1000	17
I-14. Turbidímetro en Línea – Agua de Mar (Sistema de Captación)	18
I-15. Accesorios para Tuberías – Sistema de Captación (Material 2205)	18
II-1. Flotación por Aire de Alta Eficiencia en Capa Superficial (DAF)	20
II-2. Bomba de Disolución de Aire	21
II-3. Equipo de Disolución de Aire	22
II-4. Tanque de Agua Tratada por Flotación por Aire	23
II-5. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Agua Tratada DAF	23
II-6. Accesorios para Tuberías – Sistema de Pretratamiento DAF (Acero Dúplex)	24
II-7. Turbidímetro en Línea – Efluente DAF	25
III-1. Bombas de Alimentación para Ultrafiltración	26
III-2. Válvulas para Bombas de Alimentación de Ultrafiltración (Lote)	27
III-3. Sistema de Ultrafiltración con Membranas Cerámicas (24 Trenes)	27
III-4. Sistemas de Compresores de Aire para Instrumentación y Control Neumático	30
III-5. Sistema de Limpieza Física (Retrolavado) – Membranas Cerámicas UF	30
III-6. Sistema de Limpieza Química (CIP) – Membranas Cerámicas UF	32
IV-1. Tanque de Agua Producida por Ultrafiltración (Buffer UF-SWRO)	36

IV-2. Bombas de Presurización de Entrada para Ósmosis Inversa _____	<b>36</b>
IV-3. Válvulas para Bombas de Presurización de Ósmosis Inversa (Lote) _____	<b>37</b>
IV-4. Medidor de pH / ORP – Línea de Alimentación SWRO _____	<b>38</b>
IV-5. Conductímetro – Línea de Alimentación SWRO _____	<b>38</b>
IV-6. Filtros de Seguridad (Cartuchos 5 µm) – Línea de Alimentación SWRO _____	<b>39</b>
IV-7. Bombas de Alta Presión para Ósmosis Inversa – SWRO _____	<b>40</b>
IV-8. Bombas de Compensación con Recuperación de Energía (Booster ERD) _____	<b>41</b>
IV-9. Dispositivos de Recuperación de Energía – PX-Q400 _____	<b>42</b>
IV-10. Sistema de Desalinización por Ósmosis Inversa (5 Trenes SWRO) _____	<b>43</b>
IV-11. Caudalímetros Electromagnéticos – Permeado SWRO (DN300) _____	<b>46</b>
IV-12. Caudalímetros de Ultrasonidos – Línea de Rechazo SWRO (DN250) _____	<b>46</b>
IV-13. Sistema de Lavado por Ósmosis Inversa (Low Pressure Flushing) _____	<b>47</b>
IV-14. Sistema de Limpieza Química (CIP) – Membranas SWRO _____	<b>47</b>
IV-15. Válvulas de Mariposa Eléctrica / Regulación – SWRO (DN250, PN16) _____	<b>48</b>
IV-16. Accesorios para Tuberías – Sistema SWRO (HDPE / Dúplex 2507) _____	<b>48</b>
V-1. Caudalímetro Electromagnético – Entrada Remineralización (DN700) _____	<b>50</b>
V-2. Mezclador Estático de Tubería – Remineralización (DN700) _____	<b>50</b>
V-3. Termopar / Termómetro de Inmersión – Remineralización _____	<b>50</b>
V-4. Medidores de pH – Post-Remineralización _____	<b>51</b>
V-5. Tanque de Remineralización (Contactor de Piedra Caliza – Flujo Ascendente) _____	<b>51</b>
V-6. Soplador Roots – Retrolavado con Aire (Remineralización) _____	<b>53</b>
V-7. Bomba de Lavado del Tanque de Remineralización _____	<b>53</b>
V-8. Accesorios para Tuberías – Sistema de Remineralización (304/HDPE) _____	<b>54</b>
VI-1. Depósito de Producto (Tanque de Agua Potable) _____	<b>55</b>
VI-2. Medidor de Nivel Ultrasonico – Depósito de Producto _____	<b>55</b>
VI-3. Bombas de Suministro de Agua Potable a la Red _____	<b>56</b>
VI-4. Válvulas para Sistemas de Suministro de Agua _____	<b>56</b>
VI-5. Caudalímetros Electromagnéticos – Entrega a Red (DN500) _____	<b>57</b>
VI-6. Válvula de Mariposa Manual – Entrega a Red (DN450) _____	<b>57</b>
VI-7. Accesorios para Tuberías – Sistema de Suministro (Acero al Carbono con Anticorrosivo) _____	<b>58</b>
VII-1. Sistema de Dosificación de Coagulantes (FeCl <sub>3</sub> ) _____	<b>59</b>
VII-2. Sistema de Dosificación de Reductores (Bisulfito de Sodio / Metabisulfito) _____	<b>60</b>
VII-3. Sistema de Dosificación de Antiincrustante (Inhibidores de Incrustaciones) _____	<b>60</b>

VII-4. Sistema de Dosificación de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	61
VII-5. Sistema de Dosificación de Hipoclorito de Sodio (Clorito Sódico / NaClO)	61
VII-6. Sistema de Dosificación de Ácidos y Álcalis – Limpieza CIP	62
VIII-1. Tanque de Neutralización	64
VIII-2. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Neutralización	64
VIII-3. Bombas de Neutralización	64
VIII-4. Medidor de pH – Tanque de Neutralización	65
VIII-5. Accesorios de Instalación – Sistema de Neutralización	65
IX-1. Sistema de Distribución de Energía Eléctrica	66
IX-2. Sistema de Control (SCADA / PLC)	67
IX-3. Equipo Host – Estaciones de Trabajo de Control	68
IX-4. Sistema de Monitoreo en Tiempo Real (Análisis IA para O&M)	69
IX-5. Sistema de Comunicaciones	69
IX-6. Fuente UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)	70
IX-7. Cables y Bandejas Portacables	70
X-1. Materiales Auxiliares de Instalación (Pernería, Juntas, Arandelas)	72
X-2. Sistema de Iluminación	72
X-3. Puesta a Tierra y Protección contra Rayos (Pararrayos)	73
XI-1. Equipamiento Completo de Fábrica – Suministro FOB	74
XI-2. Gastos de Instalación y Puesta en Marcha in Situ	74
ANEXO A – Requisitos de Calidad del Agua Permeada (SWRO)	76
ANEXO B – Consumo Energético Específico por Subsistema	76
ANEXO C – Consumo de Productos Químicos por m <sup>3</sup> de Agua Producida	77

## PARTE 1 – CONDICIONES GENERALES

### 1.1 Alcance General

Las presentes Especificaciones Técnicas establecen los requisitos mínimos para la Fabricación, Suministro, Transporte, Instalación, Pruebas y Puesta en Servicio de todos los equipos, sistemas, materiales e instrumentación del proyecto PTAP Desalinizadora para la ciudad de Santa Marta, con capacidad nominal de producción de 600 L/s (2.160 m<sup>3</sup>/h), operando bajo tecnología de Ósmosis Inversa de Agua de Mar (SWRO). El proceso adoptado es: Flotación por Aire Disuelto (DAF) – Membranas Cerámicas de Ultrafiltración – Ósmosis Inversa (SWRO) – Remineralización – Desinfección.

### 1.2 Normativa Aplicable

- Resolución 2115 de 2007 – Calidad del agua para consumo humano (Colombia)
- Decreto 1575 de 2007 – Sistema de protección y control de calidad del agua
- Resolución 0330 de 2017 (RAS) – Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable
- Resolución 0799 de 2021 – Actualiza aspectos de la Resolución 0330
- Decreto 1076 de 2015 – Sector ambiente, permisos de vertimientos
- Ley 373 de 1997 – Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA)
- AWWA Manual M46 – Desalination of Seawater
- ISO 24510 – Criterios de calidad y desempeño en servicios de agua potable
- IEC – Normas para diseño, rendimiento y seguridad de equipos eléctricos
- ASME – Tuberías y recipientes a presión
- ASTM International – Membranas de ósmosis inversa y análisis de agua de mar
- GB/T 43230-2023 – Requisitos de calidad del agua producto de desalinización SWRO
- GB 50013-2018 – Código de diseño de abastecimiento de agua exterior
- CJJ/T 251-2017 – Reglamento técnico para tratamiento con membranas

### 1.3 Calidad del Agua de Mar – Fuente de Abastecimiento

El agua cruda proviene del Mar Caribe, frente al litoral norte de Santa Marta. Los análisis realizados en enero de 2026 en cuatro puntos perpendiculares al litoral, a profundidades de 5, 10 y 15 m, evidencian condiciones típicas de agua marina tropical costera con:

- Ausencia de gradientes fisicoquímicos significativos – mezcla vertical adecuada
- DQO < 15 mg/L – ausencia de contaminación industrial
- Metales pesados y pesticidas por debajo del límite de detección
- Presencia de coliformes termotolerantes y E. coli – origen fecal de baja intensidad
- Riesgo identificado de mareas rojas cíclicas (6 eventos entre 2010-2017)
- Variación estacional de temperatura: 21 °C (estiaje) – 29 °C (lluvias)

#### 1.4 Condiciones Generales de Suministro

- Todo equipo debe ser nuevo, sin uso previo, de primera calidad, diseñado para servicio continuo 24/7 en ambiente marino.
- Los materiales en contacto con agua de mar deben ser resistentes a cloruro con factor de equivalente a pitting (PREN)  $\geq 40$ , o ser de materiales no metálicos aprobados (FRP, HDPE, PVDF, UPVC, PE).
- El Contratista deberá presentar plan de inspección y ensayo (ITP) para aprobación del Interventor antes del inicio de fabricación.
- Todo equipo deberá contar con manual de operación y mantenimiento en español, planos As-Built y certificados de materiales.
- La alimentación eléctrica del proyecto es trifásica 440 V / 60 Hz, salvo indicación contraria.
- Todos los motores serán de clase de aislamiento F, grado de protección IP54 mínimo (IP55 en zonas expuestas), con rodamientos certificados para vida mínima  $L_{10} \geq 50.000$  h.
- Los variadores de frecuencia (VFD) incluirán filtros de armónicos para cumplir IEEE 519 (THD  $\leq 5\%$ ).
- El Contratista deberá coordinar con el Interventor el programa de pruebas FAT (Factory Acceptance Test) y SAT (Site Acceptance Test) para cada sistema.

#### 1.5 Garantías Mínimas

- Garantía general de equipos: 36 meses a partir de la Puesta en Servicio Definitiva o 60 meses desde el despacho, lo que ocurra primero.
- Membranas cerámicas de ultrafiltración: garantía por 20 años.
- Membranas de ósmosis inversa SWRO: garantía de desalinización y flujo por 60 meses según especificación del fabricante.
- Dispositivos de recuperación de energía PX: garantía de eficiencia  $\geq 98\%$  por 36 meses.

## PARTE 2 – ESPECIFICACIONES POR SISTEMA Y EQUIPO

### SISTEMA I – TOMA DE AGUA DE MAR

#### I-1. Cabezal de Toma de Agua (Inmisario)

##### Descripción y Función

Estructura de captación submarina ubicada a aproximadamente 1.700 m de la línea de costa, diseñada para captar agua de mar sin introducir organismos marinos ni sedimentos. Perfil elíptico/aerodinámico que minimiza la perturbación de corrientes. Capacidad total de captación: 5.400 m<sup>3</sup>/h mediante dos líneas independientes de tuberías HDPE DN1600, cada una capaz de transportar el 100% del caudal requerido (redundancia N+1). El sistema opera con control de velocidad de entrada para prevenir la succión de biota marina.

##### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad total de captación	5.400 m <sup>3</sup> /h (2 líneas × 2.700 m <sup>3</sup> /h nominales)
Longitud de tuberías de captación	2 × 1.700 m aprox. (definitiva según batimetría)
Diámetro de tuberías	DN 1600 mm
Material tuberías	HDPE PE 100, PN 10 mínimo, fusión a tope certificada
Diseño perfil del cabezal	Elíptico / aerodinámico, antivórtice
Rejillas de protección	Abertura máxima 50 mm, material dúplex 2205 o superior
Profundidad de instalación	Mínimo 5 m bajo nivel de marea baja promedio
Fijación submarina	Bloques de hormigón armado o pilotes cada ≤ 10 m
Anillo de protección contra derrames	Barreras flotantes fijas tipo absorbente marino
Balizas de señalización	Luces de navegación y señalización fluorescente
Cantidad	2 Juegos (inmisario biflexible)

##### Requisitos de Fabricación

- Los cabezales y accesorios en contacto con agua de mar serán fabricados en acero inoxidable dúplex 2205 (PREN ≥ 40) o material equivalente aprobado.
- Las tuberías HDPE tendrán certificación de fusión a tope conforme a ISO 21307 / DVS 2207-1.
- El perfil aerodinámico del cabezal será verificado mediante modelación hidrodinámica CFD antes de la fabricación.
- Se instalará protección catódica tipo ánodos de sacrificio de aluminio-zinc en todos los elementos metálicos sumergidos.
- Las juntas y sellos serán de EPDM resistente a UV y agua marina.

### Requisitos de Instalación

- Estudio batimétrico previo para determinar perfil del lecho marino y rutas óptimas.
- Instalación por medio de barcaza especializada o equipo de buceo certificado.
- Las tuberías se anclarán con bloques de hormigón o pilotes de acero galvanizado.
- Las uniones soldadas o termofusionadas en campo serán verificadas con prueba hidrostática 1,5 × PN.
- Al finalizar la instalación, se realizará inspección submarina con ROV o buzos certificados.

### Pruebas y Puesta en Servicio

- FAT: Prueba de flujo y presión en taller del fabricante para accesorios metálicos.
- SAT: Prueba hidrostática de tuberías instaladas a 1,5 × PN durante 4 horas.
- Prueba de velocidad de flujo en boca de captación (objetivo ≤ 0,15 m/s para protección de biota).
- Registro de caudal y presión diferencial durante las primeras 72 horas de operación continua.
- Verificación de ausencia de obstrucciones mediante inspección con ROV al mes de operación.

## I-2. Compuerta Cuadrada de Fundición de Aleación Ni-Cr – Sellado Bidireccional (HZFN-II 1,6×1,6 m)

### Descripción y Función

Compuerta de cierre instalada en las líneas de captación para aislamiento bidireccional del flujo, permitiendo mantenimiento del inmisario sin afectar la operación del sistema.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Compuerta cuadrada deslizante – Modelo HZFN-II
Dimensiones del tablero	1.600 mm × 1.600 mm
Estanqueidad	Bidireccional (aguas arriba y aguas abajo)
Material del tablero	Fundición de aleación níquel-cromo (PREN ≥ 40)
Material del marco y guías	Acero inoxidable 316L o duplex 2205
Mecanismo de accionamiento	Eléctrico, potencia nominal 3 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Velocidad de apertura/cierre	≈ 0,3 m/min
Protección del actuador	IP68 mínimo (instalación sumergible)
Presión de diseño	PN 10 (10 bar)
Temperatura de operación	0 °C – 40 °C
Cantidad	2 Unidades

### Requisitos de Fabricación

- Certificado de material (Mill Certificate) para todos los componentes metálicos.
- Prueba de estanqueidad hidrostática a 1,5 × PN durante 30 minutos con fuga cero.
- Prueba funcional de accionamiento eléctrico: 10 ciclos de apertura/cierre completos sin falla.
- Recubrimiento anticorrosivo exterior: pintura epoxi marina mínimo 2 capas (DFT ≥ 250 μm).
- Protección catódica con ánodos de sacrificio Zn-Al para instalación submarina.

### Pruebas FAT/SAT

- FAT en fábrica: prueba hidrostática + ciclos de accionamiento documentados.
- SAT en sitio: verificación de accionamiento remoto desde sala de control, prueba de estanqueidad post-instalación.

## I-3. Compuerta Cuadrada de Fundición de Aleación Ni-Cr – Sellado Unidireccional (HZFN-II 1,6×1,6 m)

### Descripción y Función

Compuerta de aislamiento unidireccional para control del flujo de captación, instalada en puntos donde la presión diferencial actúa en un solo sentido.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Compuerta cuadrada deslizante – Modelo HZFN-II
Dimensiones del tablero	1.600 mm × 1.600 mm
Estanqueidad	Unidireccional
Material del tablero	Fundición de aleación níquel-cromo
Mecanismo de accionamiento	Eléctrico, potencia nominal 2,2 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Velocidad de apertura/cierre	≈ 0,3 m/min
Presión de diseño	PN 10
Cantidad	4 Unidades

### Requisitos de Fabricación y Pruebas

- Prueba hidrostática: 1,5 × PN durante 30 minutos.
- Prueba funcional: 10 ciclos apertura/cierre completos.
- Certificado de materiales y protocolos de prueba entregados antes del despacho.

## I-4. Rejilla Fija de Captación

### Descripción y Función

Reja de desbaste grueso instalada en el cabezal de captación para interceptar objetos flotantes y organismos marinos de gran tamaño antes de la entrada al sistema.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Dimensiones por unidad	1.500 mm (ancho) × 9.100 mm (alto)
Separación entre barras	50 mm (luz libre)
Material de barras	Acero inoxidable dúplex 2205
Material del marco	Acero inoxidable dúplex 2205
Protección anódica	Ánodos de sacrificio Zn-Al incluidos
Tipo de instalación	Deslizante sobre guías en el canal de captación
Cantidad	2 Juegos

### Requisitos de Fabricación

- Soldadura certificada WPS/PQR conforme a AWS D1.6 o EN 1011.
- Decapado y pasivado de superficies soldadas conforme a ASTM A380.
- Carga de diseño para corrientes y biofouling: Presión diferencial mínima 2,0 m.c.a.

### Requisitos de Instalación

- Las guías de deslizamiento garantizarán extracción para limpieza sin interrupción del servicio de la línea paralela.
- Inspección submarina de la instalación final con registro fotográfico.

## I-5. Filtro Giratorio (Tambor Rotativo) – XKC-1500

### Descripción y Función

Equipo de filtración de finos instalado aguas abajo de la rejilla fija, elimina partículas en suspensión y organismos menores antes de las bombas de captación. Incluye motor de accionamiento, sistema de lavado por retro chorro y sistema de control automático.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Modelo	XKC-1500
Dimensiones del tambor	2.000 mm (diámetro) × 2.000 mm (ancho)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tamaño de apertura de malla	≤ 2 mm (a definir según biota local)
Caudal de diseño por unidad	2.700 m <sup>3</sup> /h
Motor de accionamiento	440 V / 60 Hz; potencia según fabricante
Sistema de lavado	Retro chorro de agua a presión, automático
Sistema de control	Automático por diferencial de nivel o tiempo programado
Material de la malla	Acero inoxidable 316L
Material del tambor y carcasa	Acero inoxidable 316L con recubrimiento anticorrosivo marino
Protección anódica	Incluida
Cantidad	2 Juegos (uno por línea de captación)

### Requisitos de Fabricación

- Prueba de funcionamiento: operación continua ≥ 4 horas a caudal nominal.
- Verificación del sistema de lavado automático: ≥ 20 ciclos consecutivos sin intervención.
- Certificado de balanceo dinámico del tambor (vibración ≤ ISO 10816 Zona A).

### Requisitos de Instalación

- Alineación del eje horizontal con tolerancia ≤ 0,05 mm.
- Conexión eléctrica del motor con guardamotor y VFD si aplica.
- El sistema de lavado se conectará al suministro de agua del sistema (agua filtrada).

### Pruebas SAT

- Verificación de arranque automático y parada por diferencial de nivel.
- Prueba de ciclo de lavado: observación de limpieza efectiva del tambor.
- Medición de consumo eléctrico del motor en operación nominal.

## I-6. Tanque de Agua Bruta

### Descripción y Función

Estructura de almacenamiento intermedio de hormigón armado que recibe el agua de mar captada antes de las bombas de presurización. Provee volumen buffer para absorber variaciones de caudal y permitir mantenimiento de las líneas de captación.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo de estructura	Hormigón armado f'c ≥ 28 MPa, impermeabilizado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Volumen útil	Suficiente para tiempo de retención mínimo de 10 minutos a caudal punta ( $\geq 5.400 \text{ m}^3/\text{h}$ )
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi marino de alta resistencia ( $\text{DFT} \geq 400 \mu\text{m}$ ) o revestimiento de poliurea
Accesorios	Escalera de acceso en acero inoxidable 316L, ventilación, rebosadero, drenaje de fondo, tubería de entrada y salida con bridas PN10
Cantidad	1 Unidad

### Requisitos

- El diseño estructural cumplirá ACI 350 para estructuras de contención de líquidos.
- Prueba de impermeabilidad: llenado y observación durante 24 horas sin descenso de nivel superior a 10 mm.
- Protección anticorrosiva aplicada conforme a SSPC SP-6 mínimo (limpieza abrasiva).
- Etiquetado permanente de niveles mínimo, operativo y máximo.

## I-7. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Agua Bruta

### Descripción y Función

Instrumento de medición continua de nivel por ultrasonidos para el tanque de agua bruta, con señal de salida analógica para el sistema de control.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Principio de medición	Ultrasonido sin contacto
Rango de medición	0 – 10 m
Señal de salida	4-20 mA (HART opcional)
Diseño	Monobloque (transductor y electrónica integrados)
Alimentación	24 VDC (lazo de corriente o fuente separada)
Grado de protección	IP67 mínimo
Material de la carcasa	ABS o acero inoxidable 316L
Temperatura de proceso	0 °C – 70 °C
Cantidad	4 Unidades (2 por tanque, doble medición para seguridad)

### Requisitos de Calibración

- Calibración en fábrica con certificado trazable a NIST o equivalente.
- Prueba de respuesta: variación de nivel de 0 a 100% en menos de 5 segundos.

## I-8. Viga de Pórtico (Grúa Monorriel)

### Descripción y Función

Sistema de izado para mantenimiento de equipos en la sala de bombas de captación, incluyendo desmontaje y montaje de bombas sumergibles y compuertas.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad de elevación	10 toneladas
Altura de elevación	12 m
Tipo	Viga monorriel o puente grúa según geometría de la sala
Velocidades	Elevación: $\leq 8$ m/min; traslación: $\leq 20$ m/min
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Clase de servicio	FEM/ISO A3 mínimo
Dispositivos de seguridad	Limitador de carga, limitador de altura, parada de emergencia
Cantidad	1 Juego

### Requisitos de Fabricación e Instalación

- Diseño estructural conforme a FEM 1.001 o ASME B30.17.
- Prueba de carga: 125% de la capacidad nominal durante 10 minutos.
- Certificación por entidad acreditada antes de puesta en servicio.

## I-9. Bomba de Presurización de Agua Bruta (Bomba Sumergible de Eje Largo)

### Descripción y Función

Bombas sumergibles de eje largo que elevan el agua de mar desde el tanque de agua bruta hasta la presión y caudal requeridos para alimentar las unidades de pretratamiento DAF. Operan 2 unidades en servicio continuo y 1 de reserva (N+1). Control por variador de frecuencia para ajuste de caudal según demanda.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Bomba sumergible de eje largo (turbina vertical sumergible)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad total	3 Unidades (2 en operación + 1 reserva)
Caudal unitario nominal	2.800 m <sup>3</sup> /h
Caudal total instalado	5.600 m <sup>3</sup> /h (margen 8,9% sobre 5.143 m <sup>3</sup> /h requeridos)
Altura manométrica total (TDH)	15 m
Profundidad de inmersión	9,1 m (provisional – verificar con nivel mínimo del tanque)
Potencia nominal del motor	160 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Material de la carcasa y rodete	Acero inoxidable dúplex 2205 (PREN ≥ 40)
Material del eje	Acero inoxidable 17-4 PH o dúplex 2205
Sello del eje	Mecánico o empaquetadura sumergible
Clase de aislamiento del motor	Clase F (155 °C)
Grado de protección del motor	IP68 (sumergible)
Control	Variador de frecuencia (VFD) con filtro de armónicos THD ≤ 5%
Eficiencia mínima de la bomba	≥ 80% en punto de operación nominal
Eficiencia mínima del motor	IE3 o superior
Rodamientos	Certificados para L10 ≥ 50.000 h

### Requisitos de Fabricación

- Selección de punto de operación verificada mediante curva H-Q suministrada por el fabricante.
- Material de paso certificado con ensayo de corrosión en agua de mar (ASTM G48 o equivalente).
- Balanceo dinámico del rodete e impulsor conforme a ISO 1940 Grado G 2.5.
- Prueba de vibración: ≤ 2,8 mm/s RMS en condición nominal (ISO 10816-3).
- Prueba de temperatura del motor sumergido: no exceder Clase F en condición nominal.
- Prueba de rendimiento en banco hidráulico: medición de caudal, presión y potencia absorbida.

### Documentos Requeridos con el Suministro

- Curvas H-Q, potencia y NPSH a diferentes velocidades.
- Certificado de materiales (Mill Certificates) para todas las partes en contacto con el fluido.
- Informe de prueba de fábrica (FAT Report) firmado.
- Manual de operación y mantenimiento en español.
- Listado de repuestos recomendados para 2 años de operación.
- Planos dimensionales de instalación (general assembly drawing).

### Requisitos de Instalación

- Alineación del eje vertical verificada con nivel de precisión (desviación  $\leq 0,1$  mm/m).
- Espacio libre para desmontaje vertical completo usando la viga de pórtico I-8.
- Cable de potencia y señal del VFD tendido en bandejas con separación mínima 300 mm.
- Conexión de puesta a tierra del motor y del VFD conforme a NEC / RETIE.
- Llenado de sello mecánico con fluido de sellado indicado por el fabricante antes de primera operación.

### Pruebas y Puesta en Servicio

- SAT: Verificación de sentido de giro antes de primera arrancada (inversión de fase si es necesario).
- Medición de corriente de arranque y corriente nominal en operación.
- Prueba de operación a distintas frecuencias VFD: 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz durante 30 minutos c/u.
- Medición de vibración y temperatura de rodamientos durante 2 horas de operación continua.
- Verificación del control automático: arranque/parada por nivel del tanque DAF.
- Prueba de conmutación automática a bomba de reserva ante falla de una unidad en servicio.

## I-10. Válvulas para Bombas de Presurización de Agua Bruta (Lote)

### Descripción y Función

Conjunto completo de válvulas de aislamiento, retención y control para cada bomba de presurización de agua bruta, incluyendo válvulas de succión, descarga y by-pass.

### Especificaciones Técnicas Mínimas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Válvula de aislamiento succión	Mariposa con bridas, DN según diámetro de succión, PN10, cuerpo fundición nodular, disco dúplex 2205, asiento EPDM, accionamiento manual
Válvula de retención descarga	Tipo clapeta o doble disco, DN descarga, PN10, material dúplex 2205, sin resorte sumergido
Válvula de aislamiento descarga	Mariposa con bridas, DN descarga, PN10, dúplex 2205
Junta flexible de absorción	Junta telescópica o flexible en succión y descarga, material compatible con agua de mar
Presión de diseño	PN 10 mínimo
Material general partes húmedas	Acero inoxidable dúplex 2205 o 316L mínimo

### Requisitos Generales

- Todas las válvulas certificadas con prueba hidrostática a  $1,5 \times$  PN.
- Etiquetado permanente con número de tag del sistema de control.
- Planos isométricos de tubería entregados para aprobación antes de fabricación.

## I-11. Caudalímetro Electromagnético – DN1000

### Descripción y Función

Medidor de caudal electromagnético instalado en la línea principal de agua bruta para medición continua del flujo total de captación.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Principio de medición	Electromagnético (Faraday)
Diámetro nominal	DN 1000 mm
Presión nominal	PN 10
Material de los electrodos	Titanio Gr. 2
Material del revestimiento	PTFE (politetrafluoroetileno)
Señal de salida	4-20 mA + pulso + RS485 Modbus RTU
Precisión	± 0,5% del caudal medido
Grado de protección	IP68
Alimentación	220 VCA / 24 VDC
Pantalla local	LCD con indicación de caudal instantáneo y totalizador
Temperatura del fluido	0 °C – 40 °C
Cantidad	1 Unidad

### Requisitos de Instalación

- Tramo recto aguas arriba  $\geq 5 \times DN$  (5 m); aguas abajo  $\geq 2 \times DN$  (2 m).
- Instalación con tubo siempre lleno (instalar en tramo horizontal o inclinado ascendente).
- Puesta a tierra del medidor y tuberías conforme a requerimiento del fabricante.
- Calibración in situ verificada contra referencia trazable (certificado entregable).

## I-12. Válvula de Mariposa Manual – DN1000

### Descripción y Función

Válvula de aislamiento manual de gran diámetro instalada en la línea principal de agua bruta.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Mariposa - conexión de brida (wafer entre bridas o brida-brida)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 1000 mm
Presión nominal	PN 10
Material del cuerpo	Fundición nodular GGG-50 con recubrimiento epoxi epíctrico
Material del disco	Fundición nodular revestida de nailon (PA)
Asiento	EPDM (resistente al agua de mar y cloro a baja concentración)
Eje	Acero inoxidable 316L
Accionamiento	Manual mediante reductor de engranajes
Cantidad	1 Unidad

### Requisitos

- Prueba hidrostática a  $1,5 \times PN$  en cuerpo y asiento.
- Par de operación verificado: desmontaje del actuador manual posible por 1 persona.

## I-13. Junta Telescópica de Transmisión de Fuerza – DN1000

### Descripción y Función

Junta telescópica de absorción de cargas axiales y vibración, instalada en la línea de agua bruta para compensar dilataciones térmicas y facilitar el desmontaje de equipos.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Telescópica de transmisión de fuerza (restringida)
Diámetro nominal	DN 1000 mm
Presión nominal	PN 10
Material de partes húmedas	Acero inoxidable dúplex 2205
Sellado	EPDM (doble O-ring)
Recorrido telescópico	Mínimo 100 mm de desplazamiento axial
Cantidad	2 Juegos

### Requisitos

- Prueba hidrostática a  $1,5 \times PN$ .
- Catálogo técnico con curvas de carga admisible.

## I-14. Turbidímetro en Línea – Agua de Mar (Sistema de Captación)

### Descripción y Función

Medidor continuo de turbidez en la línea de agua bruta para monitorear calidad del agua captada y detectar eventos de mareas rojas o turbulencias.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Principio	Nefelométrico (dispersión de luz a 90°)
Rango de medición	0 – 1.000 FNU (NTU)
Precisión	± 2% de la lectura o ± 0,01 NTU (el mayor)
Diseño específico	Para agua de mar (resistencia a cloruros y biofouling)
Señal de salida	4-20 mA + RS485 Modbus
Alimentación	24 VDC
Grado de protección	IP65 mínimo
Cantidad	1 Juego (celda de flujo en línea)

### Requisitos

- Limpiaparabrisas automático o sistema de autolavado para evitar biofouling en celda óptica.
- Calibración con estándar Formazina trazable.

## I-15. Accesorios para Tuberías – Sistema de Captación (Material 2205)

### Descripción y Función

Conjunto de tuberías, codos, reducciones, bridas, y demás accesorios para el sistema de captación.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material tuberías	Acero inoxidable dúplex 2205 (UNS S32205), Schedule 10S o 40S según diámetro
Material accesorios forjados	Acero inoxidable dúplex 2205, ASTM A815 WP2205
Material bridas	Acero inoxidable dúplex 2205, ASTM A182 F60
Presión nominal	PN 10 (Class 150 ANSI o superior)
Juntas de brida	PTFE o EPDM reforzado con espiral metálica 316L
Pernería	Acero inoxidable A4-70 (316L), tuercas A4
Recubrimiento exterior (zonas aéreas)	Pintura epoxi-poliuretano marino, DFT ≥ 200 μm

### Requisitos de Fabricación e Instalación

- Soldadura certificada WPS/PQR conforme a ASME B31.3.
- Decapado y pasivado de todas las soldaduras conforme a ASTM A380.
- Isométricos de tubería aprobados antes de fabricación.
- Prueba hidrostática de líneas instaladas: 1,5 × PN por 4 horas.
- Pendiente mínima de drenaje 1:200 en líneas con posibilidad de vaciado.

## SISTEMA II – PRETRATAMIENTO (FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO – DAF)

### II-1. Flotación por Aire de Alta Eficiencia en Capa Superficial (DAF)

#### Descripción y Función

Sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) de flujo circular, diseñado para eliminar algas, aceites, grasas y sólidos en suspensión del agua de mar captada. Constituye la primera barrera del sistema de pretratamiento, crítica ante eventos de mareas rojas y derrames de hidrocarburos en el área portuaria aledaña. Opera con inyección de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) como coagulante y microburbujas de aire disuelto con carga positiva para la captura de flóculos.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad de tratamiento por unidad	1.830 m <sup>3</sup> /h
Número de unidades	3 juegos (operación simultánea)
Caudal total tratado	5.490 m <sup>3</sup> /h (tasa de recuperación $\geq$ 99%)
Diámetro del tanque de flotación	22 m
Relación de reflujo	20% (366 m <sup>3</sup> /h por unidad para la bomba de disolución de aire)
Tasa de carga superficial	Según diseño del fabricante para agua de mar con TSS $\leq$ 50 mg/L
Unidad principal giratoria	Incluida – raspador de lodos flotantes motorizado
Sistema de distribución de agua	Colector circular interior de baja turbulencia (velocidad cero)
Sistema de evacuación de residuos	Rasqueta o scraper periférico con canal colector de lodos
Mezclador en línea	Mezclador estático o dinámico para coagulante – incluido
Material del tanque	Acero al carbono con revestimiento epoxi marino interior (DFT $\geq$ 400 $\mu\text{m}$ ) o acero inoxidable 316L
Material de internos (raspador, colectores)	Acero inoxidable 316L
Alimentación eléctrica motor rasqueta	440 V / 60 Hz
Control	Automático con PLC integrado, señal al SCADA

#### Proceso de Operación

- El agua de mar entra al DAF a caudal constante controlado por VFD de las bombas de agua bruta.
- $\text{FeCl}_3$  (cloruro férrico al 40%) se inyecta en el tubo de entrada mediante bomba dosificadora a razón de 50 mg/L.
- Las microburbujas del sistema de disolución de aire (presión  $\geq$  4 bar) tienen carga positiva y se adhieren a los flóculos coagulados.
- Los flóculos cargados ascienden a la superficie a velocidad controlada.

- El mecanismo rasqueta retira la capa flotante hacia el canal de lodos.
- El agua clarificada se recoge por el fondo/perimetral y fluye al tanque de agua tratada por flotación.

### Requisitos de Fabricación

- Tanque fabricado conforme a AWS D1.1 (estructuras de acero) o ASME Sección VIII para zonas a presión.
- Revestimiento interior: preparación superficial Sa 2.5 (ISO 8501-1), sistema epoxi de dos componentes certificado para contacto con agua potable (NSF/ANSI 61 o equivalente).
- Prueba de hermeticidad del tanque: llenado con agua y mantenimiento 24 horas sin fuga.
- Mecanismo rasqueta: prueba de par de arranque y operación a plena carga en fábrica.
- Sistema de disolución de aire: prueba de presión a 1,5 × presión de diseño.

### Requisitos de Instalación

- Nivelación del tanque: tolerancia  $\leq 2$  mm en plano horizontal (verificar con nivel óptico).
- El raspador periférico debe tener holgura ajustable respecto al fondo del tanque.
- Las tuberías de entrada y salida se instalarán sin esfuerzos transmitidos al tanque.
- Se proveerá acceso perimetral para mantenimiento del mecanismo rasqueta.

### Pruebas y Puesta en Servicio

- Prueba de agua limpia: 72 horas de operación continua a caudal nominal con agua sin coagulante para verificar mecanismos.
- Prueba de proceso: 72 horas con agua de mar real y dosificación de coagulante – medición de turbidez entrada vs. salida (objetivo reducción  $\geq 95\%$ ).
- Ajuste de dosificación de coagulante (jar test previo para determinar dosis óptima).
- Verificación del sistema de control automático: arranque/parada, alarmas de nivel.
- Medición de consumo eléctrico total del sistema DAF en condición nominal.

## II-2. Bomba de Disolución de Aire

### Descripción y Función

Bombas centrífugas de alta presión que recirculan una fracción del agua clarificada y la saturan de aire en el tanque de presión, generando las microburbujas características del proceso DAF al reducir la presión a la salida del tanque de presión.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad total	6 Juegos (2 por tren DAF)
Caudal unitario	366 m <sup>3</sup> /h (20% de reflujo de 1.830 m <sup>3</sup> /h)
Altura manométrica	55 m (presión saturación $\geq 4$ bar en tanque de presión)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Potencia nominal del motor	90 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Material de partes en contacto con el fluido	Acero inoxidable dúplex (mínimo 316L)
Control	Variador de frecuencia (VFD) con filtro armónico
Eficiencia mínima de la bomba	≥ 75% en punto nominal
Clase de aislamiento del motor	Clase F
Grado de protección	IP54 mínimo
Tipo	Centrífuga horizontal de etapas múltiples

### Requisitos de Fabricación

- Curva H-Q suministrada por el fabricante con punto de operación claramente marcado.
- Prueba de rendimiento en banco hidráulico con medición de caudal, presión y potencia.
- Certificado de materiales para carcasa, rodete y eje.
- Prueba NPSH para verificar operación sin cavitación en condiciones de sitio.

### Requisitos de Instalación

- Alineación bomba-motor verificada con comparador de cuadrante (desviación ≤ 0,05 mm).
- Instalación de amortiguadores de vibración (anti-vibration mounts) bajo la base.
- Tuberías de succión con reducción excéntrica (parte plana arriba para evitar bolsas de aire).

### Pruebas SAT

- Verificación de caudal de reflujo mediante caudalímetro en línea.
- Verificación de presión del tanque de aire disuelto: ≥ 4 bar.
- Observación de la calidad y tamaño de microburbujas generadas (diámetro 10-100 μm).

## II-3. Equipo de Disolución de Aire

### Descripción y Función

Depósito a presión donde el agua de reflujo se pone en contacto con aire comprimido para lograr la saturación de aire disuelto. Opera a una presión de 4-6 bar.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad de tratamiento	1.830 m <sup>3</sup> /h por tren
Número de unidades	3 (uno por tren DAF)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Presión de diseño	≥ 8 bar (1,5 × presión de operación)
Material	Acero al carbono con revestimiento epoxi interior NSF/ANSI 61 o acero inoxidable 316L
Código de diseño	ASME Sección VIII División 1 o AD-2000 (europeo)
Accesorios	Válvula de seguridad, manómetro, indicador de nivel de agua, válvula de purga
Difusor de aire	Tipo Venturi o difusor especializado para saturación eficiente

### Requisitos

- Estampilla ASME o certificación equivalente para recipientes a presión.
- Prueba hidrostática a 1,5 × presión de diseño.
- Certificado de cálculo de la válvula de seguridad (Código ASME PTC 25).

## II-4. Tanque de Agua Tratada por Flotación por Aire

### Descripción y Función

Depósito de almacenamiento intermedio que recibe el agua clarificada de las unidades DAF y la suministra a las bombas de alimentación de ultrafiltración.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad	1.500 m <sup>3</sup>
Tipo de estructura	Hormigón armado f'c ≥ 28 MPa
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi marino certificado NSF/ANSI 61, DFT ≥ 400 μm
Accesorios	Medidor de nivel ultrasónico, rebosadero, drenaje de fondo, ventilación, escalera 316L
Cantidad	1 Unidad

### Requisitos

- Diseño con la normativa colombiana NSR-10, aplicando lineamiento específicos y conforme a ACI 350 (Código para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto en Contacto con Líquidos).
- Prueba de impermeabilidad: 24 horas llenado sin descenso de nivel > 10 mm.

## II-5. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Agua Tratada DAF

## Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Principio de medición	Ultrasonido sin contacto
Rango de medición	0 – 10 m
Señal de salida	4-20 mA (HART opcional)
Diseño	Monobloque (transductor y electrónica integrados)
Alimentación	24 VDC (lazo de corriente o fuente separada)
Grado de protección	IP67 mínimo
Material de la carcasa	ABS o acero inoxidable 316L
Temperatura de proceso	0 °C – 70 °C
Cantidad	1 Unidad

## Requisitos de Calibración

- Calibración en fábrica con certificado trazable a NIST o equivalente.
- Prueba de respuesta: variación de nivel de 0 a 100% en menos de 5 segundos.

## II-6. Accesorios para Tuberías – Sistema de Pretratamiento DAF (Acero Dúplex)

### Descripción y Función

Tuberías, accesorios y elementos de conexión para el sistema DAF, en acero inoxidable dúplex para resistencia a la corrosión por agua de mar con coagulante.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material	Acero inoxidable dúplex 2205 (UNS S32205) para líneas de proceso
Accesorios de agua de lavado lodos	Acero inoxidable 316L mínimo
Presión nominal	PN 10
Estándar dimensional	ASME B36.19 (Schedule 10S o 40S según diámetro)
Bridas	ASME B16.5 o EN 1092-1, dúplex 2205

### Requisitos de Fabricación e Instalación

- Soldadura certificada WPS/PQR conforme a ASME B31.3.
- Decapado y pasivado de todas las soldaduras conforme a ASTM A380.
- Isométricos de tubería aprobados antes de fabricación.

- Prueba hidrostática de líneas instaladas: 1,5 × PN por 4 horas.
- Pendiente mínima de drenaje 1:200 en líneas con posibilidad de vaciado.

## II-7. Turbidímetro en Línea – Efluente DAF

### Descripción y Función

Medidor de turbidez en la salida del sistema DAF para verificar la eficiencia del pretratamiento y detectar fallas en la dosificación de coagulante.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango de medición	1 – 1.000 FNU (NTU)
Señal de salida	4-20 mA + RS485
Diseño	Para agua de mar, celda de flujo en línea
Alarma	Alta turbidez > 5 NTU – bloqueo de paso a UF
Cantidad	1 Juego (ver especificación base en I-14)

## SISTEMA III – ULTRAFILTRACIÓN CON MEMBRANAS CERÁMICAS

### III-1. Bombas de Alimentación para Ultrafiltración

#### Descripción y Función

Bombas centrífugas horizontales que impulsan el agua clarificada desde el tanque DAF hasta las unidades de membranas cerámicas de ultrafiltración. Operan 3 unidades en servicio y 1 de reserva (N+1).

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad total	4 Unidades (3 en operación + 1 reserva)
Caudal unitario	1.800 m <sup>3</sup> /h
Caudal total instalado	5.400 m <sup>3</sup> /h (margen sobre 5.143 m <sup>3</sup> /h requeridos)
Altura manométrica total (TDH)	20 m
Potencia nominal del motor	160 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Material de partes en contacto con el fluido	Acero inoxidable dúplex (mínimo 316L)
Control	Variador de frecuencia (VFD) con filtro armónico
Clase de aislamiento del motor	Clase F
Grado de protección	IP54
Eficiencia mínima de la bomba	≥ 80% en punto nominal
Eficiencia motor	IE3 o superior

#### Requisitos de Fabricación

- Selección de punto de operación verificada mediante curva H-Q suministrada por el fabricante.
- Material de paso certificado con ensayo de corrosión en agua de mar (ASTM G48 o equivalente).
- Balanceo dinámico del rodete e impulsor conforme a ISO 1940 Grado G 2.5.
- Prueba de vibración: ≤ 2,8 mm/s RMS en condición nominal (ISO 10816-3).
- Prueba de temperatura del motor sumergido: no exceder Clase F en condición nominal.
- Prueba de rendimiento en banco hidráulico: medición de caudal, presión y potencia absorbida.
- Prueba NPSH: cavitation margin ≥ 0,5 m sobre NPSH requerido a caudal máximo.

#### Requisitos de Instalación

- Bancada común con alineación precisa bomba-motor.
- Instalación de amortiguadores de vibración.
- Válvulas de aislamiento en succión y descarga, válvula de retención en descarga.

### Pruebas SAT

- Verificación de caudal total mediante caudalímetro electromagnético DN700 (III-UF).
- Conmutación automática a bomba de reserva ante señal de falla.
- Prueba de vibración y temperatura en operación nominal.

## III-2. Válvulas para Bombas de Alimentación de Ultrafiltración (Lote)

### Descripción y Función

Conjunto de válvulas de aislamiento, retención, conexiones flexibles y accesorios para las bombas de alimentación de UF.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo y material	Mariposa bridada PN10, fundición nodular, disco dúplex 2205, asiento EPDM
Válvula de retención	Doble clapeta PN10, dúplex 2205 o 316L
Junta flexible	DN correspondiente, PN10, EPDM reforzado
Cantidad	1 Lote completo según ingeniería de detalle

### Requisitos Generales

- Todas las válvulas certificadas con prueba hidrostática a  $1,5 \times PN$ .
- Etiquetado permanente con número de tag del sistema de control.
- Planos isométricos de tubería entregados para aprobación antes de fabricación.

## III-3. Sistema de Ultrafiltración con Membranas Cerámicas (24 Trenes)

### Descripción y Función

Sistema de ultrafiltración con membranas cerámicas tubulares de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) para eliminar sólidos en suspensión, coloides, bacterias, algas y otros contaminantes presentes en el agua de mar pretratada. El sistema está compuesto por 24 trenes (20 en servicio y 4 de reserva), organizados en 3 grupos de 8 unidades, permitiendo retrolavado y limpieza química (CIP) independiente por grupo sin interrumpir la producción diseñada para  $270m^3/h$ . La calidad del agua producida:  $SDI_{15} \leq 2,5$  y turbidez  $\leq 0,05$  NTU, cumpliendo plenamente los requisitos de alimentación al sistema SWRO.

### Especificaciones Técnicas – Membrana Cerámica Tubular

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material de la membrana	Óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) – $\alpha$ -alúmina o $\gamma$ -alúmina

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tamaño de poro nominal	≤ 30 nanometros (UF)
Superficie activa por membrana	≥ 24 m <sup>2</sup>
Número de elementos por tren	68 unidades
Área total instalada por tren	68 × 24 m <sup>2</sup> = 1.632 m <sup>2</sup>
Material de la carcasa de membrana	FRP (Fibra de Vidrio Reforzada con Poliéster) fabricada a medida
Flujo nominal	165 LMH (L/m <sup>2</sup> ·h) en operación
Flujo máximo admisible	200 LMH
Capacidad de producción por tren	257 m <sup>3</sup> /h (a 165 LMH)
Capacidad total (20 trenes activos)	5.140 m <sup>3</sup> /h
Modo de filtración	Extremo cerrado (dead-end) o tangencial según diseño
Rango de pH de operación	1 a 14 (estabilidad química completa)
Rango de temperatura de operación	1 °C – 45 °C
Presión transmembrana (TMP) normal	0,05 – 0,30 MPa
Presión máxima soportada	0,7 MPa
Ángulo de contacto (hidrofilicidad)	≤ 0,3° – altamente hidrofílica
Vida útil garantizada	≥ 20 años con mantenimientos correctamente programados y asistidos a tiempo
Modo de control	Automático con PLC y comunicación al SCADA

### Especificaciones Técnicas – Bastidor de Membranas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material del bastidor	Acero inoxidable 316L
Fabricación	Conforme a planos aprobados por el Interventor
Diseño	Permite extracción individual de módulos de membrana sin detener el tren
Acabado superficial	Decapado y pasivado

### Especificaciones Técnicas – Instrumentación por Tren

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Transmisor de presión entrada	0-1,0 MPa, 4-20 mA, material 316L, IP67
Transmisor de presión salida	0-1,0 MPa, 4-20 mA, material 316L, IP67

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Manómetro local	0-1,0 MPa, glicerina, esfera 100 mm
Medidor de flujo permeado	Electromagnético o ultrasónico, DN según diámetro, $\pm 1\%$

### Especificaciones Técnicas – Válvulas Neumáticas por Tren

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Válvulas de alimentación y salida	Mariposa neumática, doble efecto, posicionador, material 316L / EPDM
Válvulas de retrolavado	Bola neumática o mariposa neumática, material dúplex 2205
Válvulas de CIP	Bola neumática, material 316L o PVDF
Actuadores neumáticos	Alimentación de aire 4-7 bar, tiempo de cierre $\leq 5$ s

### Requisitos de Fabricación – Membranas Cerámicas

- Certificado de integridad de membrana: prueba de presión de burbuja (bubble point test) por elemento conforme a ISO 4793.
- Prueba de flujo de agua destilada a temperatura estándar (25 °C) para verificar permeabilidad.
- Prueba de rechazo de bacteria (E. coli): log removal  $\geq 4$ .
- Certificado de material  $Al_2O_3$  con análisis químico y porosimetría de mercurio.
- Las carcasas FRP serán probadas a  $1,5 \times$  presión máxima de operación.

### Requisitos de Instalación

- Los bastidores se nivelarán con tolerancia  $\leq 1$  mm/m.
- Las conexiones de tuberías a los bastidores serán flexibles (juntas elastoméricas) para absorber vibraciones.
- El sistema de tuberías de retrolavado y CIP se instalará con pendientes de drenaje completo  $\geq 1\%$ .
- Se verificará que el suministro de aire de instrumentación sea seco (punto de rocío  $\leq -20$  °C) y libre de aceite.

### Pruebas y Puesta en Servicio

- Prueba de integridad en sitio (PDT – Pressure Decay Test) para cada tren antes de poner en servicio.
- Prueba de filtración a agua limpia: medición de flujo, TMP y SDI a 0%, 50% y 100% del caudal de diseño.
- Filtración con agua de mar real durante 72 horas: medición continua de turbidez y  $SDI_{15}$ .
- Verificación de secuencia de retrolavado automático: primera vez cada 60 min, duración 30-45 s.
- Verificación de secuencia de CIP: operación del primer ciclo supervisado por especialista del fabricante.
- Ajuste de setpoints de TMP para alarma de ensuciamiento y disparo de CIP.

### III-4. Sistemas de Compresores de Aire para Instrumentación y Control Neumático

#### Descripción y Función

Sistema de suministro de aire limpio y seco para la operación de válvulas neumáticas del sistema de ultrafiltración y otros actuadores neumáticos del proyecto.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Sistema completo	Compresor de tornillo rotativo sin aceite + tanque de almacenamiento + secador por refrigeración + secador por adsorción
Capacidad del compresor principal	Suficiente para demanda de válvulas neumáticas UF + margen 25%
Presión de suministro	6-8 bar (ajustable)
Compresor	Sin aceite (oil-free), certificación ISO 8573-1 Clase 1 para pureza de aire
Secador por refrigeración	Punto de rocío $\leq +3$ °C a 7 bar
Secador por adsorción	Punto de rocío $\leq -40$ °C a 7 bar (para instrumentos sensibles)
Tanque de almacenamiento	Acero al carbono, ASME Sección VIII, con válvula de seguridad, purga automática, inspección visual
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz
Redundancia	N+1 (un compresor de respaldo)
Cantidad	1 Juego (sistema completo)

#### Requisitos

- Certificado de pureza del aire producido: ISO 8573-1 Clase 1.2.1 (sin partículas  $> 0,1$   $\mu\text{m}$ , punto de rocío  $\leq -40$  °C, sin aceite).
- Programa de mantenimiento preventivo documentado (filtros, separadores, aceite si aplica).

### III-5. Sistema de Limpieza Física (Retrolavado) – Membranas Cerámicas UF

#### Descripción y Función

Sistema de retrolavado automático periódico (aire + agua) para remoción de la torta de ensuciamiento de las membranas cerámicas. Frecuencia: cada 60-90 minutos; duración: 30-45 segundos por ciclo.

#### III-5.1 Bombas de Retrolavado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Centrífuga horizontal
Cantidad	4 Unidades (3 activas + 1 reserva)
Caudal por unidad	980 m <sup>3</sup> /h
Caudal de retrolavado por tren	≈ 490 m <sup>3</sup> /h (2 bombas/tren) → 400-500 L/m <sup>2</sup> ·h sobre 1.632 m <sup>2</sup>
Altura manométrica	30 m
Potencia nominal del motor	132 kW
Material de partes húmedas	Acero inoxidable dúplex (2205 o 316L)
Control	VFD con arranque suave
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Clase de aislamiento	Clase F
Grado de protección	IP54

### III-5.2 Caudalímetro Electromagnético – Retrolavado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 700 mm
Presión nominal	PN 10
Material electrodos	Titanio Gr. 2
Revestimiento	PTFE
Señal de salida	4-20 mA + RS485
Precisión	± 0,5%
Cantidad	1 Unidad

### III-5.3 Compresores de Aire para Retrolavado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Tornillo rotativo sin aceite
Cantidad	4 Unidades (3 activas + 1 reserva)
Caudal de aire	5,0 Nm <sup>3</sup> /min por unidad
Presión máxima de trabajo	0,8 MPa
Potencia nominal	49,5 kW
Nivel sonoro	≤ 72 dBA a 1 m de distancia

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz
Control	Automático por presión

### III-5.4 Depósitos de Aire para Retrolavado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Volumen por depósito	10 m <sup>3</sup>
Presión de diseño	1,0 MPa
Material	Acero inoxidable 304
Código de diseño	ASME Sección VIII División 1
Accesorios	Válvula de seguridad calibrada, válvula de drenaje automático, manómetro, transmisor de presión
Cantidad	3 Unidades

### III-5.5 Transmisor de Presión – Sistema de Retrolavado

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango	0 – 1,0 MPa
Material de la membrana	316L
Señal de salida	4-20 mA
Cantidad	1 Unidad

## III-6. Sistema de Limpieza Química (CIP) – Membranas Cerámicas UF

### Descripción y Función

Sistema de limpieza química en sitio (CIP – Cleaning In Place), encargado en recuperar el flujo de las membranas cerámicas cuando el retrolavado físico no es suficiente. Frecuencia normal: cada 3-7 días; duración: 20-60 minutos por sesión. Reactivos: hidróxido de sodio (0,1-0,2%) para limpieza alcalina y ácido cítrico (0,2-0,4%) para limpieza ácida, con posibilidad de agua caliente (temperatura controlada  $\leq 45$  °C).

### III-6.1 Bombas de Limpieza Química

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Centrífuga horizontal
Cantidad	6 Unidades
Caudal por unidad	270 m <sup>3</sup> /h

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Altura manométrica	15 m
Potencia nominal del motor	30 kW
Material partes en contacto	Acero inoxidable dúplex (resistente a pH 0-14 y cloro $\leq$ 2.000 mg/L)
Control	VFD
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz

### III-6.2 Depósitos de Limpieza Química

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad por depósito	20 m <sup>3</sup>
Material	Polietileno de alta densidad (HDPE o PEAD) – grado químico
Accesorios	Agitador, sensor de nivel, rebosadero, drenaje de fondo, tapa
Cantidad	6 Unidades (3 alcalinos + 3 ácidos, o uso alternado)

### III-6.3 Depósitos de Agua Caliente

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad por depósito	20 m <sup>3</sup>
Material	Acero inoxidable 304 con aislamiento térmico (lana mineral + chapa aluminio)
Temperatura de diseño	Hasta 70 °C
Accesorios	Indicador de nivel, válvula eléctrica de reposición de agua, válvula eléctrica de salida, termómetro, calentador eléctrico incorporado
Cantidad	4 Juegos

### III-6.4 Bombas de Agua Caliente

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	2 Juegos
Caudal	270 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	15 m
Potencia	30 kW
Material	Acero inoxidable dúplex

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Accesorios incluidos	Válvulas de entrada y salida 316L

### III-6.5 Calentadores Eléctricos

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Potencia por unidad	100 kW
Tipo	Calentador de inmersión (heater) o intercambiador eléctrico
Material de resistencia	316L o Inconel 800
Temperatura máxima de salida	70 °C
Control	Termostato + sonda de temperatura PTC/PT100
Cantidad	3 Juegos

### III-6.6 Válvulas de Mariposa Neumáticas – CIP UF

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Entre bridas (wafer), DN 100, PN 10
Material del cuerpo	Fundición nodular recubierta epoxi
Material del disco	Acero inoxidable 316
Asiento	EPDM
Actuador	Neumático doble efecto, 4-7 bar
Posicionador	Electro-neumático 4-20 mA
Cantidad	12 Unidades

### III-6.7 Caudalímetros Electromagnéticos – CIP UF

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 200, PN 10
Material electrodos	Titanio Gr. 2
Revestimiento	PTFE
Señal de salida	4-20 mA
Cantidad	6 Unidades

### III-6.8 Transmisores de Presión – CIP

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango	0 – 0,6 MPa
Material de la membrana	Titanio
Señal	4-20 mA
Cantidad	6 Unidades

### III-6.9 Medidores de Nivel Sumergibles – CIP

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango	0 – 10 m
Principio	Presión hidrostática
Material de la membrana	Cerámica
Señal	4-20 mA
Cantidad	6 Unidades

## SISTEMA IV – ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR (SWRO)

### IV-1. Tanque de Agua Producida por Ultrafiltración (Buffer UF-SWRO)

#### Descripción y Función

Tanque amortiguador entre el sistema de UF y el sistema de ósmosis inversa. Almacena el agua producida por la UF, equilibra los caudales entre ambos sistemas y garantiza una alimentación estable a las bombas de presurización SWRO. Tiempo de retención: 23,3 minutos (suficiente para amortiguar ciclos de retrolavado y evitar cavitación en bombas).

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad útil	2.000 m <sup>3</sup>
Tipo de estructura	Hormigón armado f'c ≥ 28 MPa
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi marino NSF/ANSI 61, DFT ≥ 400 μm
Tiempo de retención	2.000 / 5.143 m <sup>3</sup> /h = 23,3 minutos
Accesorios	Medidor de nivel ultrasónico 0-5 m (4-20 mA, monobloque), rebosadero, drenaje, ventilación, escalera 316L
Cantidad	1 Unidad

#### Requisitos

- Prueba de impermeabilidad 24 horas.
- Nivel mínimo de seguridad interconectado con parada de bombas de presurización SWRO.

### IV-2. Bombas de Presurización de Entrada para Ósmosis Inversa

#### Descripción y Función

Bombas de aumento que elevan el agua filtrada desde el tanque UF hasta la presión de entrada del filtro de seguridad y bomba de alta presión SWRO, proporcionando NPSH adecuado a las bombas de alta presión y superando las pérdidas de carga intermedias. Configuración: 5 unidades (una por tren SWRO), operando simultáneamente.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	5 Unidades
Caudal por unidad	1.715 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	30 m (cubre pérdidas en filtro de seguridad, tuberías y equipos)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Potencia nominal del motor	200 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Material de partes húmedas	Acero inoxidable dúplex (bimetálico 2205 o 2507)
Tipo	Centrífuga horizontal de una o múltiples etapas
Control	VFD con filtro de armónicos (THD ≤ 5% conforme IEEE 519)
Clase de aislamiento del motor	Clase F
Grado de protección	IP54
Eficiencia mínima de la bomba	≥ 80% en punto nominal

### Requisitos de Fabricación y Pruebas

- Curva H-Q, potencia y NPSH certificadas por el fabricante.
- Prueba hidráulica en banco con medición de caudal, presión y potencia absorbida.
- Certificado de material para todas las partes en contacto con el fluido.

### Requisitos de Instalación

- Reducción excéntrica en succión (plano superior horizontal).
- Soporte independiente para tuberías (sin transmisión de cargas a la carcasa de la bomba).
- Instalación de indicador de presión en succión y descarga de cada bomba.

## IV-3. Válvulas para Bombas de Presurización de Ósmosis Inversa (Lote)

### Descripción

Lote de válvulas de aislamiento, retención y conexiones flexibles para las 5 bombas de presurización SWRO.

### Especificaciones Técnicas Mínimas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Válvulas de aislamiento	Mariposa bridada DN correspondiente, PN16, disco dúplex 2205, asiento EPDM
Válvulas de retención	Clapeta PN16, dúplex 2205
Presión de diseño mínima	PN 16
Cantidad	1 Lote completo

### Requisitos Generales

- Todas las válvulas certificadas con prueba hidrostática a 1,5 × PN.
- Etiquetado permanente con número de tag del sistema de control.

- Planos isométricos de tubería entregados para aprobación antes de fabricación.

#### IV-4. Medidor de pH / ORP – Línea de Alimentación SWRO

##### Descripción y Función

Analizadores en línea de pH y ORP para monitorear continuamente la calidad del agua de alimentación al sistema SWRO, asegurar dosificación correcta de reductor (dióxido de azufre o bisulfito) y verificar ausencia de cloro oxidante que dañaría las membranas de poliamida.

##### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango pH	0 – 14
Rango ORP	-1.500 mV a +1.500 mV
Señal de salida del transmisor	4-20 mA (HART opcional)
Alimentación del transmisor	220 VCA
Tipo de instalación	Celda de flujo en línea (flow-through cell)
Material del electrodo	Vidrio de alta pureza con referencia Ag/AgCl
Material de la celda	PVDF o PVC alimentario
Temperatura de operación	5 °C – 45 °C
Alarma	pH alto/bajo, ORP alto (cloro residual) → bloqueo de paso a membranas
Cantidad	1 Juego por tren SWRO = 5 juegos + 1 en la línea común (según P&ID)

##### Requisitos

- Calibración con buffers certificados pH 4, 7 y 10 antes de la puesta en servicio.
- Mantenimiento preventivo: Incluir procedimiento en manual.

#### IV-5. Conductímetro – Línea de Alimentación SWRO

##### Descripción y Función

Medidor de conductividad eléctrica para verificar la calidad del agua de alimentación y del permeado SWRO, detectando fugas de membrana y controlando la eficiencia de desalinización.

##### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango del electrodo	0 – 100 mS/cm

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Señal de salida	4-20 mA (HART)
Alimentación	220 VCA
Tipo de célula	Inductiva o de 4 electrodos para alta conductividad
Material	PVDF o acero inoxidable 316L
Temperatura de proceso	5 °C – 45 °C
Cantidad	1 Juego (alimentación) + 1 Juego (permeado) por tren = 10 juegos total

## IV-6. Filtros de Seguridad (Cartuchos 5 μm) – Línea de Alimentación SWRO

### Descripción y Función

Última barrera de filtración de partículas antes de las membranas SWRO. Retiene cualquier sólido residual, fragmentos de medios filtrantes y productos de corrosión que puedan dañar mecánicamente los elementos de membrana. Instalados entre la bomba de presurización OI y la bomba de alta presión.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	5 Unidades (una por tren SWRO)
Caudal de tratamiento por unidad	1.050 m <sup>3</sup> /h
Presión de diseño	0,6 MPa (6 bar)
Precisión de filtración	5 μm (absoluto)
Material del cartucho filtrante	Polipropileno (PP) – profundidad o plisado
Material de la carcasa	Acero al carbono con revestimiento de caucho natural o caucho EPDM (resistente a agua de mar)
Temperatura de operación	Ambiente (5 °C – 45 °C)
Indicador de diferencial de presión	Manómetro diferencial + transmisor 4-20 mA para alarma de saturación
Alarma de saturación	$\Delta P \geq 0,5$ bar → alerta de cambio de cartucho
Frecuencia de cambio de cartuchos	Cuando $\Delta P$ alcance 0,5 bar o cada 3 meses (lo que ocurra primero)

### Requisitos de Fabricación

- La carcasa se fabricará conforme a ASME Sección VIII.
- Prueba hidrostática a 1,5 × presión de diseño.

- Los cartuchos filtran con eficiencia  $\geq 99,9\%$  a 5  $\mu\text{m}$  (certificado del fabricante del cartucho).
- El sistema de cierre permite cambio de cartuchos sin herramientas especiales.

### Requisitos de Instalación

- Instalados en posición vertical con la tapa de acceso hacia arriba.
- Espacio libre superior para extracción de cartuchos  $\geq 1.200$  mm.
- Válvulas de venteo y drenaje en cada filtro.

## IV-7. Bombas de Alta Presión para Ósmosis Inversa – SWRO

### Descripción y Función

Bombas de alta presión que elevan el agua filtrada a la presión necesaria para superar la presión osmótica del agua de mar ( $\approx 27$  bar a 35 g/L de salinidad) y la resistencia de los elementos de membrana, hasta una presión de trabajo de aproximadamente 60 bar (600 m.c.a.). Son el equipo de mayor consumo energético de la planta. El sistema de recuperación de energía PX permite que estas bombas solo procesen el caudal de agua producida (432  $\text{m}^3/\text{h}$ ), mientras el caudal de rechazo es presurizado por la bomba booster del sistema PX.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	5 Unidades (una por tren SWRO)
Caudal unitario	432 $\text{m}^3/\text{h}$ (agua permeada equivalente)
Altura manométrica	600 m ( $\approx 60$ bar)
Potencia nominal del motor	1.000 kW (1 MW)
Alimentación eléctrica	10.000 V (10 kV), trifásico, 60 Hz (alta tensión)
Material de partes en contacto con el fluido	Acero inoxidable dúplex 2507 (UNS S32750, PREN $\geq 42$ )
Tipo	Centrífuga multietapa horizontal o vertical de alta presión
Control	VFD de alta tensión con filtro de armónicos
Clase de aislamiento del motor	Clase F
Grado de protección	IP54
Eficiencia mínima de la bomba	$\geq 80\%$ en punto nominal
NPSH disponible	$\geq$ NPSH requerido + 0,5 m de margen

### Requisitos de Fabricación

- Prueba de rendimiento completa en banco hidráulico: curva H-Q a múltiples caudales, potencia absorbida, eficiencia y NPSH.

- Prueba de vibración:  $\leq$  ISO 10816-3 Zona A para máquinas de potencia  $> 15$  kW.
- Inspección de partículas magnéticas (MT) o líquidos penetrantes (PT) en soldaduras críticas del cuerpo.
- Prueba de presión hidrostática:  $1,5 \times$  presión de diseño ( $\geq 90$  bar) durante 30 minutos.
- Certificado de material ASTM A240 o equivalente para acero dúplex 2507.

### Requisitos de Instalación

- Base de hormigón de inercia calculada para reducción de vibración.
- Alineación bomba-motor: desviación angular  $\leq 0,05$  mm/m; desplazamiento paralelo  $\leq 0,05$  mm.
- El VFD de alta tensión se instalará en sala climatizada (temperatura  $\leq 40$  °C).
- Cable de alta tensión tendido en conduit o bandeja con separación mínima 500 mm de señal.
- Transformador de MT dedicado por bomba o por par de bombas (según diseño eléctrico).

### Pruebas y Puesta en Servicio

- FAT: Prueba de rendimiento completa documentada con curvas y registros de vibración y temperatura.
- SAT: Verificación de presión de operación: 55-65 bar con agua de mar real a caudal nominal.
- Medición de THD de corriente en VFD:  $\leq 5\%$  conforme IEEE 519.
- Prueba de trip de emergencia: parada segura del sistema ante pérdida de agua de alimentación.
- Operación continua de 72 horas con monitoreo de temperatura de rodamientos y vibraciones.

## IV-8. Bombas de Compensación con Recuperación de Energía (Booster ERD)

### Descripción y Función

Bombas centrífugas que reciben el agua de mar presurizada a la salida del sistema PX (recuperador de energía) y la elevan ligeramente hasta alcanzar la presión de entrada al sistema SWRO. El caudal de rechazo del sistema SWRO (597 m<sup>3</sup>/h/tren) transfiere su energía al agua de alimentación en el dispositivo PX, y estas bombas compensan las pérdidas de presión del intercambiador.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	5 Unidades (una por tren SWRO)
Caudal por unidad	597 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	40 m (presión diferencial de compensación del PX)
Material de partes húmedas	Acero inoxidable dúplex 2507 (UNS S32750)
Temperatura del medio	-15 °C a 110 °C (rango de diseño)
Potencia nominal del motor	90 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Clase de aislamiento del motor	Clase F

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Grado de protección	IP55
Control	VFD

### Nota Técnica

Q. salmuera por tren = 1.029 m<sup>3</sup>/h (alimentación) – 432 m<sup>3</sup>/h (permeado) = 597 m<sup>3</sup>/h. Este valor coincide exactamente con la capacidad de la bomba booster, confirmando la coherencia del balance hídrico del sistema.

## IV-9. Dispositivos de Recuperación de Energía – PX-Q400

### Descripción y Función

Intercambiadores de presión isobáricos que transfieren directamente la energía hidráulica del agua de rechazo concentrado (alta presión ≈ 60 bar) al agua de alimentación (baja presión), reduciendo el consumo energético total de la desalinización en 50-60%. Eficiencia de recuperación ≥ 98%. La mezcla entre corrientes es del 2-3%, controlada por la geometría interna de cerámica de alta precisión.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Modelo	PX-Q400 (o equivalente aprobado)
Cantidad total	37 Unidades (35 activos: 7 por tren × 5 trenes + 2 en frío de reserva)
Rango de caudal por unidad	65,9 – 90,9 m <sup>3</sup> /h
Tipo	Intercambiador de presión isobárico (Pressure Exchanger)
Material de la carcasa	FRP, DN ≥ 6 pulg.
Material de las cámaras internas	Cerámica de alta densidad (alúmina o circonio)
Presión máxima de operación	8,3 MPa (83 bar)
Eficiencia de recuperación	≥ 98%
Tasa de mezcla	≤ 3% del caudal de rechazo
Configuración de conexión	U-flow (para mejor distribución de caudal en paralelo)
Temperatura de operación	5 °C – 45 °C
Vida útil diseñada	≥ 25 años

### Cálculo del Sistema ERD por Tren

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Caudal de alimentación total por tren	1.029 m <sup>3</sup> /h
Caudal bomba de alta presión (C)	432 m <sup>3</sup> /h (igual al caudal de permeado)
Caudal por el PX (B)	597 m <sup>3</sup> /h (igual al caudal de rechazo)
Presión de entrada PX (agua de mar baja)	≈ 3 bar (salida bomba presurización OI)
Presión de salida PX (agua de mar alta)	≈ 58 bar (cerca de presión de operación SWRO)
Número de unidades PX por tren	7 (PX-Q400 cada uno ≈ 85 m <sup>3</sup> /h)

### Requisitos de Fabricación y Certificación

- Certificación del fabricante de la eficiencia de recuperación  $\geq 98\%$  con prueba de tipo.
- Prueba de presión hidrostática:  $1,5 \times 8,3 \text{ MPa} = 12,45 \text{ MPa}$  en carcasa FRP.
- Certificado de tasa de mezcla: análisis de conductividad del efluente de alta presión.
- Documento de Material Data Safety Sheet (MSDS) para materiales de cerámica.

### Requisitos de Instalación

- Configuración U-flow: tuberías de alta y baja presión en el mismo extremo del colector.
- Válvula de estrangulamiento de contrapresión en descarga de agua concentrada: presión mínima  $\geq 0,1 \text{ MPa}$  para prevenir cavitación.
- Soporte anti-vibratorio bajo cada unidad PX.
- Todos los manifolds de conexión en dúplex 2507.

### Pruebas SAT

- Verificación de eficiencia PX: medición de presiones de entrada y salida de ambas corrientes.
- Verificación de tasa de mezcla: conductividad del agua de alimentación antes y después del PX (aumento esperado  $< 3\%$ ).

## IV-10. Sistema de Desalinización por Ósmosis Inversa (5 Trenes SWRO)

### Descripción y Función

Sistema central de desalinización que separa el agua dulce del agua de mar mediante membranas semipermeables de poliamida de hoja en espiral bajo alta presión (55-65 bar). Cada tren es una unidad autónoma con bastidor estructural, membranas, carcasas, instrumentación, válvulas de control y sistema de monitoreo integrado. Capacidad: 5 trenes  $\times 432 \text{ m}^3/\text{h} = 2.160 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua desalinizada (tasa de recuperación 42%).

### Especificaciones Técnicas – Bastidor de Membranas (por tren)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material del bastidor estructural	Acero al carbono con tratamiento anticorrosivo (pintura epoxi)
Diseño	A medida según planos propuestos por el fabricante
Configuración	1 etapa, 1 sección por tren
Módulos de instrumentación	Transmisores de presión entrada, salida y diferencial; caudalímetros permeado y rechazo
Sistema de control	Panel local con PLC, comunicación Modbus/Profibus al SCADA

### Especificaciones Técnicas – Membrana SWRO

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo de elemento de membrana	Arrollamiento en espiral (spiral wound) de 8 pulgadas (201 mm de diámetro)
Longitud del elemento	40 pulgadas (1.016 mm)
Superficie activa por elemento	≥ 37,2 m <sup>2</sup>
Material de la membrana	Poliamida de capa delgada compuesta (TFC)
Tasa de desalinización nominal	≥ 99,2% (rechazo de sales totales a 25 °C, 32 g/L, 55 bar)
Flujo de diseño	13 LMH (L/m <sup>2</sup> ·h) a condiciones nominales
Presión máxima de operación	10 MPa (100 bar)
pH de operación	3 – 10
Temperatura de operación	5 °C – 45 °C
Número de elementos por carcasa	7 elementos en serie
Número de carcasas por tren	128
Número total de elementos por tren	128 × 7 = 896 elementos
Número total de elementos (5 trenes)	4.480 elementos
Número total de carcasas (5 trenes)	640 unidades

### Especificaciones Técnicas – Carcasa de Membrana

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	8 pulgadas
Configuración	7 núcleos (7 elementos en serie)
Presión de diseño	1.000 PSI (69 bar)
Material	Fibra de vidrio reforzada (FRP) – Filamento wound

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Conexiones	Cabezales de acero inoxidable dúplex 2507 en ambos extremos

### Especificaciones Técnicas – Accesorios de Tubería SWRO

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material tuberías alta presión ( $\geq 40$ bar)	Acero inoxidable dúplex 2507 (ASTM A790 o A928)
Material tuberías baja presión permeado/rechazo	UPVC PN10 o acero inoxidable 316L
Diámetro línea de alimentación por tren	DN $\geq 300$ mm (verificar según velocidad 1,5-2,5 m/s)
Diámetro línea de permeado por tren	DN $\geq 250$ mm
Diámetro línea de rechazo por tren	DN $\geq 250$ mm
Presión de diseño tuberías alta presión	Class 600 ANSI o PN 100

### Requisitos de Fabricación y Suministro de Membranas

- Las membranas serán de marca reconocida internacionalmente (DowDuPont FilmTec, Toray, Hydranautics, LG Chem u equivalente aprobado).
- Cada elemento viene con certificado de rendimiento individual (caudal de permeado, rechazo de sales y presión diferencial).
- Las membranas se almacenarán en envase hermético con solución de conservación hasta el momento de la instalación.
- Temperatura de almacenamiento: 5 °C – 35 °C; no congelar.
- El certificado de cada lote de membranas incluye: número de serie, fecha de fabricación, prueba de rechazo y flujo.

### Requisitos de Instalación de Membranas

- Las membranas se instalarán con la dirección de flujo correcta (verificar marcas del elemento).
- Antes de insertar los elementos, verificar que las carcasas estén limpias y libres de cuerpos extraños.
- Los adaptadores y O-rings de unión entre elementos serán lubricados con glicerina alimentaria.
- O-rings de sello de los cabezales: EPDM o Buna-N según especificación del fabricante de la carcasa.
- No se instalarán elementos bajo presión hasta verificar la corrección de instalación de todos los sellos.

### Pruebas y Puesta en Servicio SWRO

- Pre-flushing: lavado a baja presión ( $\leq 10$  bar) con agua permeada o agua de pozo durante 1 hora para retirar conservantes.
- Arranque gradual de presión: incrementos de 5 bar cada 5 minutos hasta alcanzar presión nominal.
- Medición de caudal de permeado y conductividad en cada tren (objetivo: SDT permeado  $\leq 400$  mg/L).
- Verificación de tasa de recuperación por tren: 42%  $\pm$  2%.

- Operación continua de 72 horas con monitoreo de: caudal permeado, conductividad permeado, presión diferencial, temperatura.
- Prueba de integridad de membranas: análisis de conductividad por sección para detectar O-rings defectuosos.
- Ajuste de los controladores PLC para operación autónoma 24/7.

## IV-11. Caudalímetros Electromagnéticos – Permeado SWRO (DN300)

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	10 Unidades (2 por tren: entrada y permeado)
Diámetro nominal	DN 300, PN 10
Material electrodos	Titanio Gr. 2
Revestimiento	PTFE
Señal de salida	4-20 mA + RS485 Modbus
Precisión	± 0,5%
Grado de protección	IP68

## IV-12. Caudalímetros de Ultrasonidos – Línea de Rechazo SWRO (DN250)

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	5 Unidades (uno por tren)
Diámetro nominal	DN 250
Tipo	Clamp-on ultrasónico de montaje exterior en tubería
Rango de velocidad de flujo	0 – 25 m/s
Grado de protección	IP68
Señal de salida	4 - 20 mA + RS485 Modbus
Precisión	± 1,5% del valor medido

### Nota

Instalados en la línea de agua concentrada (rechazo) de cada tren para monitoreo del balance hídrico.

## IV-13. Sistema de Lavado por Ósmosis Inversa (Low Pressure Flushing)

### Descripción y Función

Sistema de lavado periódico a baja presión y alto caudal de los elementos de membrana SWRO para eliminar agua de alta concentración salina remanente, prevenir la formación de incrustaciones y reducir el riesgo de proliferación biológica. Frecuencia: cada 24 horas o ante cada parada del sistema; duración: 10-15 minutos; caudal de lavado:  $\leq 10,9 \text{ m}^3/\text{h}$  por elemento de 8 pulgadas; presión de lavado:  $\leq 4 \text{ bar}$ .

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Bombas de lavado	2 Unidades, $Q = 1.050 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 35 \text{ m}$ , $P = 132 \text{ kW}$ , acero inox. 304, VFD
Tanque de agua de lavado	1 Unidad, $300 \text{ m}^3$ , hormigón armado con recubrimiento anticorrosivo
Medidor de nivel del tanque	Ultrasónico, rango 0-5 m, 4-20 mA, monobloque, 1 Unidad,
Filtro de seguridad	1 Juego, capacidad $1.050 \text{ m}^3/\text{h}$ , carcasa 304, precisión $5 \mu\text{m}$ , cartucho PP
Caudalímetro electromagnético	DN450, PN10, electrodos 316, revestimiento caucho, comunicación RS485, alimentación 220 V
Transmisor de presión	0-0,6 MPa, 4-20 mA
Fuente del agua de lavado	Agua permeada del sistema SWRO (baja conductividad)
Control	Automático por PLC, integrado con sistema SWRO

### Requisitos de Instalación y Operación

- El programa de lavado está interconectado con la unidad principal SWRO y se inicia automáticamente ante parada o señal de tiempo programado.
- El agua de lavado proviene exclusivamente del agua permeada para evitar re-salinización.
- Las aguas residuales del lavado (alta salinidad) se descargan a través de la línea de agua concentrada.

## IV-14. Sistema de Limpieza Química (CIP) – Membranas SWRO

### Descripción y Función

Sistema para recuperar el rendimiento de las membranas SWRO cuando la producción normalizada cae  $\geq 15\%$ , la permeabilidad salina aumenta  $\geq 5\%$ , o el diferencial de presión normalizado aumenta  $\geq 15\%$ . Incluye limpieza ácida (elimina depósitos  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ) y limpieza alcalina (elimina contaminación orgánica). Ciclo: CIP + remojo ( $\geq 30 \text{ min}$ ) + enjuague; frecuencia normal: cada 30 días.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Bombas de limpieza CIP SWRO	2 Unidades, Q = 1.050 m <sup>3</sup> /h, H = 35 m, P = 132 kW, acero inoxidable 316, VFD
Filtro de seguridad CIP	1 Juego, Q = 1.050 m <sup>3</sup> /h, carcasa 316, precisión 5 µm, cartucho PP
Tanques de agua de limpieza	2 juegos, 20 m <sup>3</sup> cada uno, material PE, con medidor de nivel y válvulas
Caudalímetro electromagnético	DN450, PN10, electrodos 316, revestimiento caucho, comunicación RS485, alimentación 220V
Caudal de circulación CIP	10 m <sup>3</sup> /h por recipiente a presión individual
Presión de circulación CIP	≤ 4 bar
Control	Manual supervisado + semi-automático

### Requisitos de Seguridad

- Neutralización del efluente CIP antes de descarga al sistema de neutralización.

## IV-15. Válvulas de Mariposa Eléctrica / Regulación – SWRO (DN250, PN16)

### Descripción y Función

Válvulas de control de caudal en la línea de rechazo concentrado para regular la tasa de recuperación del sistema SWRO y mantener el caudal de alimentación a las unidades PX.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Mariposa de compuerta (gate) o mariposa regulación, DN250, PN16
Material del cuerpo	Fundición nodular con recubrimiento epoxi
Material del disco	Fundición nodular revestida de nailon
Asiento	EPDM
Actuador	Eléctrico con posicionador 4-20 mA
Cantidad	1 Unidad por tren

## IV-16. Accesorios para Tuberías – Sistema SWRO (HDPE / Dúplex 2507)

### Descripción

Conjunto de tuberías y accesorios para el sistema SWRO, incluyendo líneas de baja presión (HDPE), alta presión (dúplex 2507) y permeado (UPVC o 316L).

## Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tuberías de baja presión (< 10 bar)	HDPE PE 100 PN10 o UPVC PN10
Tuberías de alta presión (40-65 bar)	Acero inoxidable duplex 2507, ASME B36.19, Schedule 40S o 80S
Accesorios alta presión	Duplex 2507, ASTM A815 WP2507, Class 600
Bridas alta presión	Duplex 2507, ASTM A182 F53, Class 600
Pernería alta presión	Acero inoxidable A4-70 (316L)
Tuberías de permeado	UPVC PN6 o acero inoxidable 316L

## Requisitos de Fabricación e Instalación

- Soldadura certificada WPS/PQR conforme a ASME B31.3.
- Decapado y pasivado de todas las soldaduras conforme a ASTM A380.
- Isométricos de tubería aprobados antes de fabricación.
- Prueba hidrostática de líneas instaladas: 1,5 × PN por 4 horas.
- Pendiente mínima de drenaje 1:200 en líneas con posibilidad de vaciado.

## SISTEMA V – MINERALIZACIÓN POSTERIOR A LA ÓSMOSIS INVERSA

El agua producida por ósmosis inversa presenta baja alcalinidad, baja dureza y pH bajo por presencia de CO<sub>2</sub> libre, lo que la hace corrosiva para tuberías y tanques de distribución. El sistema de postmineralización eleva el contenido mineral mediante la adición de CO<sub>2</sub> y el paso por contactores de piedra caliza (flujo ascendente), logrando que el Índice de Saturación de Langelier (LSI) sea  $\approx +0,2$ , eliminando la tendencia corrosiva del agua.

### V-1. Caudalímetro Electromagnético – Entrada Remineralización (DN700)

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 700, PN 10
Material electrodos	Titanio Gr. 2
Revestimiento	PTFE
Señal de salida	4-20 mA + RS485
Precisión	$\pm 0,5\%$
Cantidad	1 Unidad

### V-2. Mezclador Estático de Tubería – Remineralización (DN700)

#### Descripción y Función

Mezclador estático instalado en la línea de permeado SWRO para asegurar la distribución homogénea del CO<sub>2</sub> añadido antes de la entrada al contactor de caliza.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 700
Material	Acero inoxidable dúplex 2205
Tipo	Elementos de mezcla tipo Kenics o Sulzer SMX
Pérdida de presión	< 0,2 bar a caudal nominal
Número de elementos mezcladores	Mínimo 6 (según especificación de diseño)
Cantidad	1 Juego

### V-3. Termopar / Termómetro de Inmersión – Remineralización

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	PT100 (Resistencia de temperatura)
Montaje	En manguito (termovaina) extraíble
Material del manguito	Acero inoxidable 316
Señal de salida	4 - 20 mA
Rango	0 °C – 50 °C
Precisión	± 0,1 °C
Cantidad	1 Juego

#### V-4. Medidores de pH – Post-Remineralización

##### Descripción y Función

Medidores de pH en línea para verificar que el agua remineralizada cumple pH objetivo de 7,5-8,2 conforme a la Resolución 2115 de 2007.

##### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango	0 – 14
Comunicación	RS485 Modbus
Instalación	Celda de flujo
Señal de salida	4 - 20 mA
Cantidad	2 Juegos (entrada y salida del contactor)

#### V-5. Tanque de Remineralización (Contactor de Piedra Caliza – Flujo Ascendente)

##### Descripción y Función

Contactores de piedra caliza de flujo ascendente donde el agua de permeado acidificada con CO<sub>2</sub> asciende a través de un lecho de caliza triturada (CaCO<sub>3</sub> ≥ 95%), disolviéndola gradualmente y enriqueciendo el agua con Ca<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. El resultado es un agua estable química con LSI ≈ +0,2, cumpliendo los parámetros de la Resolución 2115 de 2007.

##### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo de estructura	Hormigón armado (compartimentos)
Número de compartimentos	10 celdas (disposición 2 filas × 5 compartimentos)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Dimensiones por compartimento	6,6 m × 3,6 m = 23,76 m <sup>2</sup>
Área total instalada	10 × 23,76 m <sup>2</sup> = 237,6 m <sup>2</sup> (exactamente igual a la requerida de 237,36 m <sup>2</sup> )
Modo de funcionamiento	Flujo ascendente
Carga hidráulica de diseño	9,1 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h
Caudal de diseño	2.160 m <sup>3</sup> /h
Altura de distribución de agua	0,85 m
Altura de capa de placas filtrantes	0,30 m
Altura del lecho de caliza	2,0 m
Tiempo de contacto en lecho vacío	13,2 minutos
Altura zona de agua tratada	1,50 m
Material de la caliza	CaCO <sub>3</sub> ≥ 95%, granulometría 2-5 mm, certificada apta para agua potable
Modo de retrolavado	Aire + agua (air-water backwash)
Intensidad de lavado con aire	12 L/s·m <sup>2</sup>
Intensidad de lavado con agua	6 L/s·m <sup>2</sup>
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi NSF/ANSI 61, DFT ≥ 400 μm

### Calidad del Agua Requerida Post-Remineralización

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
TDS (mg/L)	100 – 500 mg/L (objetivo ≤ 500 conforme Res. 2115)
pH	7,5 – 8,2
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	≥ 20 mg/L
Índice de Langelier (LSI)	≈ +0,2 (ligeramente incrustante, no corrosivo)
Turbidez	< 0,5 NTU

### Requisitos de Instalación

- Suministro de caliza certificada NSF/ANSI 61 para contacto con agua potable.
- El sistema de distribución de agua en la base de cada celda garantizará distribución uniforme del flujo ascendente.
- Las placas de soporte del lecho de caliza serán de HDPE o FRP.
- Sistema de retrolavado controlado por temporizador o diferencial de presión.

## Pruebas y Puesta en Servicio

- Prueba de funcionamiento con agua permeada y CO<sub>2</sub>: medición de pH, Ca<sup>2+</sup>, alcalinidad y turbidez a la salida.
- Ajuste de la dosificación de CO<sub>2</sub> para lograr pH de entrada al contactor de 4,8-5,2.
- Operación continua de 72 horas con análisis de agua remineralizada en laboratorio.
- Verificación del ciclo de retrolavado: secuencia aire-agua, frecuencia y duración.

## V-6. Soplador Roots – Retrolavado con Aire (Remineralización)

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	2 Juegos (1 activo + 1 reserva)
Caudal de aire	26 m <sup>3</sup> /min (0,433 m <sup>3</sup> /s)
Presión de descarga	70 kPa (sobrepresión)
Potencia calculada	$P = (0,433 \text{ m}^3/\text{s} \times 70.000 \text{ Pa}) / 0,7 = 43,3 \text{ kW}$
Potencia nominal instalada	45 kW
Tipo	Roots (lóbulos)
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Silenciador	En descarga y aspiración ( $\leq 85 \text{ dBA}$ a 1 m)
Filtro de aspiración	Cartucho filtrante $\leq 10 \mu\text{m}$ , carcasa de fundición

## V-7. Bomba de Lavado del Tanque de Remineralización

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	1 Unidad
Caudal	720 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	15 m
Potencia	45 kW
Alimentación	440 V / 60 Hz, trifásico
Material partes húmedas	Acero inoxidable 304
Control	VFD

## V-8. Accesorios para Tuberías – Sistema de Remineralización (304/HDPE)

### Descripción

Tuberías y accesorios para el sistema de remineralización, incluyendo líneas de permeado (HDPE), líneas de caliza (304) y drenajes.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material tuberías proceso (agua tratada)	HDPE PE 100 PN6 o acero inoxidable 304
Material tuberías aire	Acero al carbono galvanizado o acero inoxidable 304
Presión nominal	PN 6 – PN 10

### Requisitos de Fabricación e Instalación

- Soldadura certificada WPS/PQR conforme a ASME B31.3.
- Decapado y pasivado de todas las soldaduras conforme a ASTM A380.
- Isométricos de tubería aprobados antes de fabricación.
- Prueba hidrostática de líneas instaladas: 1,5 × PN por 4 horas.
- Pendiente mínima de drenaje 1:200 en líneas con posibilidad de vaciado.

## SISTEMA VI – SISTEMA MUNICIPAL DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

### VI-1. Depósito de Producto (Tanque de Agua Potable)

#### Descripción y Función

Tanque de almacenamiento de agua potable lista para distribución, receptor del agua remineralizada y desinfectada. Capacidad 5.000 m<sup>3</sup> equivalente a ≈ 2,3 horas de producción a caudal nominal, proporcionando buffer para la red de distribución.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad útil	5.000 m <sup>3</sup>
Tipo de estructura	Hormigón armado f'c ≥ 28 MPa
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi certificado NSF/ANSI 61 para agua potable, DFT ≥ 500 μm
Accesorios	Rebosadero, drenaje de fondo, ventilación con malla antimosquito, acceso para limpieza, escalera 316L
Tapa de acceso	Hermética, con sello de caucho alimentario
Cantidad	1 Unidad

#### Requisitos

- Diseño conforme a ACI 350.
- Prueba de impermeabilidad: 24 horas sin descenso de nivel > 10 mm.
- Limpieza interior y desinfección con solución clorada antes de puesta en servicio.

### VI-2. Medidor de Nivel Ultrasónico – Depósito de Producto

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango de medición	0 – 5 m
Señal	4-20 mA (HART opcional)
Diseño	Monobloque (transductor y electrónica integrados)
Alimentación	24 VDC (lazo de corriente o fuente separada)
Grado protección	IP67
Material de la carcasa	ABS o acero inoxidable 316L
Cantidad	1 Unidad

### Requisitos de Calibración

- Calibración en fábrica con certificado trazable a NIST o equivalente.
- Prueba de respuesta: variación de nivel de 0 a 100% en menos de 5 segundos.

## VI-3. Bombas de Suministro de Agua Potable a la Red

### Descripción y Función

Bombas de distribución que elevan el agua potable desde el depósito hasta la red de distribución del distrito de Santa Marta. Operan 3 unidades en servicio y 3 de reserva (N+1 en grupos de 3).

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad total	6 Unidades
Caudal unitario	720 m <sup>3</sup> /h
Caudal total (3 activas)	2.160 m <sup>3</sup> /h (igual a producción nominal)
Altura manométrica total (TDH)	50 m (provisional – confirmar con modelo hidráulico de la red)
Potencia nominal del motor	160 kW
Alimentación eléctrica	440 V / 60 Hz, trifásico
Material de partes húmedas	Acero inoxidable 304 (agua potable tratada, sin cloruros agresivos)
Tipo	Centrífuga horizontal
Control	VFD para ajuste de presión de entrega
Clase de aislamiento	Clase F
Grado de protección	IP54
Eficiencia mínima	≥ 80% en punto nominal

### Requisitos Adicionales

- Control de presión en la red: sensor de presión en punto lejano + control PID mediante VFD.
- Protección contra golpe de ariete: análisis transitorio hidráulico y válvulas de alivio o volante de inercia.
- Todas las superficies en contacto con agua potable certificadas NSF/ANSI 61.

## VI-4. Válvulas para Sistemas de Suministro de Agua

### Descripción

Lote completo de válvulas de aislamiento, retención, conexiones flexibles, manómetros y transmisores de presión para las 6 bombas de suministro.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VI-4.1 Válvula mariposa succión DN450	Con brida, PN10, cuerpo: fundición nodular, disco: fundición nodular, asiento: EPDM – 6 unidades
VI-4.2 Válvula mariposa descarga DN450	Con brida, PN10, cuerpo: fundición nodular, disco: fundición nodular, asiento: EPDM – 6 unidades
VI-4.3 Conexión flexible succión DN500	Junta flexible PN10, caucho reforzado – 6 unidades
VI-4.4 Conexión flexible descarga DN450	Junta flexible PN10, caucho reforzado – 6 unidades
VI-4.5 Válvula de retención DN450	Tipo sándwich (wafer), PN10, cuerpo fundición nodular – 6 unidades
VI-4.6 Manómetro 0-0,6 MPa	Diafragma, esfera 100 mm, material 316L – 7 unidades
VI-4.7 Transmisor de presión 0-0,6 MPa	Material en contacto titanio, 4-20 mA – 3 unidades

### VI-5. Caudalímetros Electromagnéticos – Entrega a Red (DN500)

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Diámetro nominal	DN 500, PN 10
Material electrodos	316L
Señal de salida	4 - 20 mA + pulso + RS485
Precisión	± 0,5%
Cantidad	3 Unidades (una por manifold de entrega)

### VI-6. Válvula de Mariposa Manual – Entrega a Red (DN450)

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo	Brida, DN450, PN10
Material cuerpo	Fundición nodular
Disco	Fundición nodular revestida de nailon
Asiento	EPDM
Cantidad	3 Unidades

## VI-7. Accesorios para Tuberías – Sistema de Suministro (Acero al Carbono con Anticorrosivo)

### Descripción

Tuberías de distribución desde las bombas hasta la red de distribución, en acero al carbono con tratamiento anticorrosivo exterior e interior de epoxi alimentario.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material tuberías	Acero al carbono ASTM A53 Gr. B o API 5L Gr. B
Revestimiento interior	Epoxi NSF/ANSI 61, DFT $\geq$ 250 $\mu\text{m}$ (en contacto con agua potable)
Revestimiento exterior	Epoxi + poliuretano marino, DFT $\geq$ 200 $\mu\text{m}$
Presión nominal	PN 10
Prueba hidrostática	1,5 $\times$ PN por 4 horas en líneas instaladas

## SISTEMA VII – SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Todos los sistemas de dosificación incluirán: tanques de almacenamiento, bombas dosificadoras de desplazamiento positivo, válvulas de seguridad, válvulas de contrapresión, caudalímetros, transmisores de nivel, tuberías y accesorios en materiales compatibles con el reactivo. Los puntos de dosificación se definirán conforme al P&ID del proyecto.

### VII-1. Sistema de Dosificación de Coagulantes ( $\text{FeCl}_3$ )

#### Descripción y Función

Sistema de dosificación de tricloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) al 40% para el sistema DAF. Dosis de diseño: 50 mg/L. Dosificación continua en la línea de entrada al DAF.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-1.1 Tanques de almacenamiento	4 Unidades, capacidad 20 m <sup>3</sup> cada uno, material HDPE/PE, con válvula eléctrica y válvula manual de fondo, accesorios como tubería, rebosadero, etc.
VII-1.2 Unidad de dosificación prefabricada	1 Juego – incluye 2 bombas dosificadoras de membrana (1 activa + 1 reserva) de 1.040 L/h cada una, válvula de seguridad, válvula de contrapresión, calibración mediante columna graduada, accesorios de tubería PVDF/PVC
VII-1.3 Medidor de nivel ultrasónico	4 Unidades, rango 0 - 5 m, señal 4 - 20 mA, diseño monobloque, grado protección IP67
VII-1.4 Caudalímetro electromagnético	1 Unidad, diámetro nominal DN25, electrodos de titanio, revestimiento PTFE, grado protección IP68, montaje con bridas
VII-1.5 Unidad modular de bomba de descarga	1 Juego – 2 bombas (1 activa + 1 reserva), Q = 12,8 m <sup>3</sup> /h, H = 14,9 m, material PVDF, tensión 380 V, potencia 1,5 kW; incluye caja de control, válvula de bola manual, válvula de bola eléctrica, válvula de retención, soporte de montaje, materiales, accesorios, etc.

#### Requisitos de Materiales

- Se debe asegurar que todas las superficies en contacto con  $\text{FeCl}_3$  (solución ácida fuerte) estén fabricadas con PVDF, PVC tipo 1, HDPE o acero inoxidable 316L como mínimo.
- Las bombas dosificadoras serán del tipo membrana (diaphragm) para evitar fugas y garantizar caudal constante.
- Capacidad de calibración: todas las bombas incluirán columna de calibración (cilindro graduado) integrada en el skid.

## VII-2. Sistema de Dosificación de Reductores (Bisulfito de Sodio / Metabisulfito)

### Descripción y Función

Sistema de dosificación de reductor para neutralizar el cloro residual antes de las membranas SWRO. Dosis: 3 mg/L; concentración solución: 10%; punto de dosificación: 1 (línea de entrada SWRO).

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-2.1 Tanques de almacenamiento	2 Unidades, capacidad 10 m <sup>3</sup> cada uno, material HDPE/PE, con válvula eléctrica y válvula manual de fondo y accesorios como tubería, rebosadero, etc.
VII-2.2 Sistema de dosificación modular	1 Juego – incluye 2 bombas dosificadoras de 200 L/h, válvulas, accesorios de tubería PVDF
VII-2.3 Medidor de nivel ultrasónico	2 Unidades, rango 0 - 5 m, señal 4 - 20 mA, diseño monobloque, grado protección IP67

### Requisitos

- Interbloqueo con medidor de ORP: si ORP > -300 mV (cloro residual detectado), aumentar dosificación automáticamente.
- Alarma de tanque bajo nivel: activación de alarma al 20% del volumen.

## VII-3. Sistema de Dosificación de Antiincrustante (Inhibidores de Incrustaciones)

### Descripción y Función

Sistema de dosificación de inhibidores de incrustaciones para prevenir la cristalización de sales (CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>, BaSO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>) en las membranas SWRO. Dosis: 0 - 5 mg/L; 5 puntos de dosificación (uno por tren SWRO).

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-3.1 Tanques de almacenamiento	2 Unidades, capacidad 10 m <sup>3</sup> cada uno, material HDPE/PE, con agitador, válvula eléctrica y válvula manual de fondo
VII-3.2 Sistema de dosificación modular	2 Juegos - cada uno con 3 bombas dosificadoras de 63 L/h (1 por tren o distribuido), válvulas, accesorios PVDF
VII-3.3 Medidor de nivel ultrasónico	2 Unidades, rango 0 - 5 m, señal 4 - 20 mA, diseño monobloque, grado protección IP67

### Requisitos

- El inhibidor de incrustaciones debe ser compatible con membranas de poliamida (verificar hoja de datos del fabricante de membranas seleccionadas).

- Dosificación proporcional al caudal de alimentación SWRO (señal del caudalímetro DN700).

## VII-4. Sistema de Dosificación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

### Descripción y Función

Sistema de suministro e inyección de CO<sub>2</sub> líquido vaporizado para acidificar el agua permeada SWRO antes del contactor de caliza. Dosis prevista: 0 - 50 mg/L. El CO<sub>2</sub> acidifica el agua en rangos de pH 4,8 - 5,2 para optimizar la disolución del CaCO<sub>3</sub>.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-4.1 Tanque de almacenamiento CO <sub>2</sub> líquido	1 Juego, capacidad 40 m <sup>3</sup> (15,6 días de autonomía), tipo vertical, presión nominal 2,16 MPa, temperatura nominal -40 °C, material del cuerpo 16MnDR (acero para baja temperatura), coeficiente de llenado 0,92
VII-4.2 Vaporizador de aire libre	2 Juegos, capacidad 150 Nm <sup>3</sup> /h cada uno, tipo atmospheric vaporizer, condiciones de diseño para -10°C y HR 70%, operación continua 8-12 horas
VII-4.3 Conjunto de válvulas reductoras de presión	1 Juego, tipo DN65, presión entrada ≤ 0,8 MPa, 8 válvulas reguladoras de presión, presión de salida 0,3 - 0,7 MPa ajustable
VII-4.4 Sistema de inyección CO <sub>2</sub>	2 Juegos, caudal nominal 32 m <sup>3</sup> /h/unidad, presión nominal 0,4 MPa, alimentación eléctrica 440V/60Hz, potencia 5,5 kW; incluye válvula eléctrica, caudalímetro másico, válvula manual, difusor de inyección, materiales, accesorios, etc.

### Requisitos de Seguridad CO<sub>2</sub>

- Detector de CO<sub>2</sub> en área de almacenamiento (alarma a 0,5% v/v, evacuación a 1,5% v/v) conforme a OSHA / NFPA 55.
- Ventilación forzada del área de tanques de CO<sub>2</sub>: mínimo 6 renovaciones de aire por hora.
- Válvula de seguridad del tanque calibrada y certificada.
- Pararrayos y puesta a tierra del tanque de CO<sub>2</sub>.
- Procedimiento de llenado del tanque documentado con permisos de trabajo.

## VII-5. Sistema de Dosificación de Hipoclorito de Sodio (Clorito Sódico / NaClO)

### Descripción y Función

Sistema de generación in situ y dosificación de hipoclorito de sodio (NaClO) para: (a) desinfección de choque en la captación y tuberías de inmisario, y (b) desinfección final del agua potable antes del tanque de producto. El generador electrolítico produce NaClO a partir de salmuera de cloruro de sodio.

## Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-5.1 Generador de hipoclorito de sodio	2 Juegos, capacidad de producción 10 kg/h de cloro activo cada uno, concentración $\geq 0,8\%$ de cloro activo, incluye PLC, pantalla táctil, intercambiador de calor, conductímetro, caudalímetro, válvula eléctrica, filtro de precisión y demás materiales y accesorios que complementan el generador.
VII-5.2 Sistema de disolución de sales	1 Juego, generador de salmuera de cloruro de sodio, capacidad 10 kg
VII-5.3 Tanque de almacenamiento NaClO	2 Unidades, capacidad 20 m <sup>3</sup> cada uno, material HDPE/PE, con válvula eléctrica y válvula manual
VII-5.4 Medidor de nivel ultrasónico NaClO	2 Unidades, rango 0 - 5 m, resolución de lectura 1 mm, grado de protección IP68, diseño monobloque
VII-5.5 Sistema de purgado de hidrógeno	1 Juego, caudal de aire $\geq 100$ m <sup>3</sup> /h, ventilador + detector de H <sub>2</sub> + presostato + tubería de descarga al exterior
VII-5.6 Paquete de dosificación captación	1 Juego, 2 bombas dosificadoras de 324 L/h, válvula de seguridad, válvula de contrapresión, accesorios PVDF
VII-5.7 Paquete de dosificación desinfección	1 Juego, 2 bombas dosificadoras de 825 L/h, válvula de seguridad, válvula de contrapresión, accesorios PVDF
VII-5.8 Caudalímetro electromagnético dosificación	1 Unidad, tipo DN25, electrodos Ti, revestimiento PTFE, grado de protección IP68, montaje con bridas
VII-5.9 Accesorios de tuberías NaClO	Lote completo PVDF/PVC, incluyendo tubo y placa de nivel, válvulas de bola eléctricas, válvula de mariposa manual, válvula de muestreo y accesorios de montaje como bridas, codos, cruces, etc.

### Requisitos de Seguridad NaClO y H<sub>2</sub>

- El generador y los tanques de NaClO se instalarán en área ventilada con detector de H<sub>2</sub> (alarma  $\geq 1\%$  LEL).
- No se instalará NaClO cerca de fuentes de calor, ácidos o materiales oxidables, debido a su alto nivel de corrosión.

## VII-6. Sistema de Dosificación de Ácidos y Alcalis – Limpieza CIP

### Descripción y Función

Sistema de preparación y dosificación de ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para los sistemas CIP de UF y SWRO.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
VII-6.1 Tanques de almacenamiento de álcalis	2 Unidades, capacidad 10 m <sup>3</sup> , material HDPE/PE, válvulas eléctrica y válvula manual
VII-6.2 Tanques de almacenamiento de ácidos	2 Unidades, capacidad 10 m <sup>3</sup> , material HDPE/PE, válvulas eléctrica y válvula manual
VII-6.3 Medidores de nivel ultrasónico	4 Unidades, rango 0 - 5 m, señal 4 - 20 mA, diseño monobloque
VII-6.4 Unidad modular dosificación ácido	1 Juego – 3 bombas dosificadoras centrífugas Q = 6 m <sup>3</sup> /h, H = 15 m, material PVDF, con accesorios
VII-6.5 Unidad modular dosificación álcali	1 Juego – 3 bombas dosificadoras centrífugas Q = 6 m <sup>3</sup> /h, H = 15 m, material PVDF, con accesorios
VII-6.6 Medidores de caudal dosificación	6 Unidades, tipo DN40, PN10, electrodos titanio, revestimiento PTFE
VII-6.7 Sistema dosificación en contenedor	1 Juego – 2 bombas dosificadoras de 117 L/h, válvulas, accesorios UPVC
VII-6.8 Bomba de neutralización con ácido	1 Juego – 2 bombas dosificadoras Q = 3,6 m <sup>3</sup> /h, H = 11 m, válvulas, accesorios
VII-6.9 Bomba de neutralización con sosa	1 Juego – 2 bombas dosificadoras Q = 3,6 m <sup>3</sup> /h, H = 11 m, válvulas, accesorios
VII-6.10 Materiales auxiliares de instalación	1 Lote – incluye válvulas, tuberías y accesorios en UPVC

### Requisitos de Seguridad

- Duchas de emergencia y lavaojos en área de preparación de ácidos y álcalis.
- Contención secundaria (dique o bandeja de retención) bajo todos los tanques de ácido y álcali.
- EPP obligatorio: guantes de nitrilo dobles, gafas de protección química, delantal resistente a ácidos.

## SISTEMA VIII – SISTEMA DE NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES CIP

El sistema de neutralización recibe los efluentes ácidos y alcalinos de las limpiezas CIP de UF y SWRO, ajusta el pH a rango 6-9 antes de su descarga al sistema de efluentes conforme a la normativa ambiental vigente (Decreto 1076 de 2015).

### VIII-1. Tanque de Neutralización

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Capacidad	500 m <sup>3</sup>
Tipo de estructura	Hormigón armado f'c ≥ 28 MPa
Protección anticorrosiva interior	Revestimiento epoxi resistente a pH 0-14, DFT ≥ 500 μm
Accesorios	Medidor de nivel ultrasónico, medidor de pH, agitador, rebosadero, drenaje de fondo
Cantidad	1 Unidad

### VIII-2. Medidor de Nivel Ultrasónico – Tanque Neutralización

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango de medición	0 – 10 m
Señal de salida	4 - 20 mA (HART opcional)
Diseño	Monobloque (transductor y electrónica integrados)
Alimentación	24 VDC (lazo de corriente o fuente separada)
Grado de protección	IP67 mínimo
Material de la carcasa	ABS o acero inoxidable 316L
Cantidad	1 Unidad

#### Requisitos de Calibración

- Calibración en fábrica con certificado trazable a NIST o equivalente.
- Prueba de respuesta: variación de nivel de 0 a 100% en menos de 5 segundos.

### VIII-3. Bombas de Neutralización

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	2 Juegos (1 activa + 1 reserva)
Caudal	200 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	20 m
Potencia	18,5 kW
Material partes húmedas	Acero inoxidable dúplex 2205
Tipo	Centrífuga horizontal

### VIII-4. Medidor de pH – Tanque de Neutralización

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Rango	0 – 14
Comunicación	RS485
Instalación	Inmersión en tanque de medición
Control	Setpoint pH 6-9; dosificación automática de ácido/álcali para corrección
Cantidad	1 Juego

### VIII-5. Accesorios de Instalación – Sistema de Neutralización

#### Descripción

Válvulas, tuberías y materiales auxiliares para el sistema de neutralización. Materiales resistentes al rango de pH 0-14.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Material tuberías	UPVC PN10 o acero inoxidable 316L
Válvulas	PVC tipo 1 o 316L, PN10
Cantidad	1 Lote completo

## SISTEMA IX – SISTEMA DE CONTROL ELÉCTRICO Y AUTOMATIZACIÓN

### IX-1. Sistema de Distribución de Energía Eléctrica

#### Descripción y Función

Sistema integral de distribución eléctrica de la planta, abarcando desde el punto de acometida de la red pública hasta los centros de control de motores (CCM) de cada subsistema. La infraestructura comprende el sistema de media tensión (10 kV para las bombas de alta presión de SWRO), la red de baja tensión (440 V / 220 V), transformadores de potencia y grupos electrógenos de emergencia. Asimismo, incorpora variadores de frecuencia y filtros de armónicos para optimizar la eficiencia y la calidad de la energía.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Potencia habitual total estimada	10.292 kW
Capacidad instalada total estimada	12.096 kW
Tensión de distribución alta	10 kV (para motores $\geq 1$ MW)
Tensión de distribución media	440 V / 60 Hz (para motores de proceso)
Tensión de control e iluminación	220 V / 60 Hz monofásico
Norma de diseño eléctrico	NEC / RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas de Colombia)
Norma para equipos eléctricos	IEC 60364, IEC 61439
Celdas de alta tensión	Tipo interior SF <sub>6</sub> o vacío, IEC 62271-100
Transformadores de potencia	ONAN o ONAF, eficiencia DOE 2016 / IEC 60076
Interruptores de baja tensión	IEC 60947-2, capacidad de ruptura según estudio de cortocircuito
Variadores de frecuencia (VFD)	Clase C2 de compatibilidad electromagnética (EMC), filtros de armónicos THD $\leq 5\%$
Grado de protección tableros de BT	IP41 en interior, IP55 en exterior
Sistema de tierra	TN-S (neutro separado de tierra) conforme RETIE
Generadores de emergencia	Capacidad suficiente para arranque seguro y operación de sistemas críticos (iluminación, UPS, bombas de control) durante falla de red

#### Requisitos de Diseño

- Estudio de flujo de potencia y estudio de cortocircuito presentado al Interventor antes de la fabricación de tableros.

- Estudio de armónicos y dimensionamiento de filtros (IEEE 519).
- Análisis de arranque de motores de alta potencia (verificación de caída de tensión  $\leq 15\%$ ).
- Protecciones: sobrecorriente, falla a tierra, diferencial de transformadores, mínima tensión, falla de fase.
- Todos los circuitos de motores incluirán guardamotors electrónicos con registro de fallas.
- Coordinación de protecciones verificada mediante selectividad total (estudio de coordinación).

### Equipos Incluidos

- Celdas de media tensión 10 kV (para bombas de alta presión SWRO)
- Transformadores de distribución MT/BT
- Tableros de distribución principal (MDB) y tableros secundarios de distribución (SDB)
- Centros de control de motores (CCM/MCC) con arrancadores suaves, VFD y protecciones
- Filtros de armónicos activos o pasivos
- Banco de condensadores para corrección de factor de potencia (objetivo FP  $\geq 0,95$ )

## IX-2. Sistema de Control (SCADA / PLC)

### Descripción y Función

Sistema de control distribuido basado en PLC para el control y supervisión de todos los procesos de la planta. Arquitectura: control distribuido con PLCs locales por subsistema (DAF, UF, SWRO, remineralización, dosificación, suministro) comunicados a un sistema SCADA centralizado. Modo de operación: completamente automatizado con arranque con un solo botón desde la sala de control central.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Arquitectura de control	Control distribuido PLC + SCADA central
PLCs de subsistema	Marca líder (Allen-Bradley ControlLogix / Siemens S7-1500 o equivalente aprobado)
Software de programación	IEC 61131-3 (Ladder, FBD, SFC)
Red de comunicaciones	Ethernet Industrial IEEE 802.3; Profinet o EtherNet/IP según marca PLC
Protocolo de campo	Profibus PA, HART o Foundation Fieldbus para instrumentos de campo
Sistema SCADA	SCADA con servidor redundante, seguimiento en sala de control y estaciones remotas
Software SCADA	Ignition (Inductive Automation), Wonderware, o equivalente aprobado; debe tener licencia comercial

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Histórico de datos	Almacenamiento de todas las variables de proceso, alarmas y eventos: retención mínima 5 años
Servidor redundante	Failover automático < 30 segundos ante falla del servidor principal
Velocidad de actualización de datos en SCADA	≤ 1 segundo para variables críticas
Modos de control	Manual local, semi-automático y totalmente automático; seleccionable por subsistema
Sistema de alarmas	Gestión de alarmas conforme a EEMUA 191 / ISA-18.2 (priorización, supresión, racimo)

### Requisitos Funcionales del Sistema de Control

- Arranque secuencial automático de todos los subsistemas con interbloques de seguridad.
- Parada de emergencia (ESD): paro seguro de todos los equipos con confirmación en sala de control.
- Control automático de dosificación de químicos proporcional al caudal de agua.
- Control PID de presión en la red de distribución usando los VFD de las bombas de suministro.
- Sistema de autodiagnóstico: alertas de mantenimiento preventivo (horas de operación, ΔP de filtros, TMP membranas).
- Balanceo automático de trenes de UF y SWRO para optimizar eficiencia energética.
- Registro de eventos y alarmas con timestamp y usuario que reconoció.
- Reporte automático diario de producción, calidad del agua y consumo energético.

### Ciberseguridad Industrial

- Red de control OT (Operational Technology) aislada de la red corporativa TI mediante DMZ con firewall industrial.
- Control de acceso por roles (RBAC – Role Based Access Control) con autenticación de dos factores.
- Registro de auditoría de todos los accesos y cambios de configuración.
- Actualizaciones de software y parches de seguridad gestionados con procedimiento de cambio controlado.
- Cumplimiento de IEC 62443 (Industrial Cybersecurity) nivel SL-1 mínimo.

## IX-3. Equipo Host – Estaciones de Trabajo de Control

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cantidad	2 Computadoras (1 principal + 1 respaldo)

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Especificaciones mínimas	Procesador Intel Core i7 o equivalente, 16 GB RAM, SSD 512 GB, pantalla 24 pulgadas
Sistema operativo	Windows 11 Professional 64 bits con mantenimiento extendido
Software de configuración SCADA	Licencias comerciales incluidas
Software de desarrollo PLC	Licencias de desarrollo y runtime incluidas
Periféricos	Impresora de informes, UPS individual para cada estación
Cantidad	1 Juego (2 computadoras)

## IX-4. Sistema de Monitoreo en Tiempo Real (Análisis IA para O&M)

### Descripción y Función

Plataforma de análisis de datos con inteligencia artificial para el monitoreo continuo de la eficiencia operativa, predicción de fallos de equipos y membranas, y optimización del consumo energético y de químicos.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Funcionalidades mínimas requeridas	Análisis predictivo de fouling de membranas UF y SWRO; predicción de vida útil de membranas; optimización de dosificación de coagulante y antiincrustante; detección de anomalías en bombas (cavitación, vibración excesiva); dashboard de KPIs de la planta
Fuente de datos	Integración con SCADA mediante API o OPC-UA
Plataforma	Servidor local o nube privada (definir según política de ciberseguridad)
Cantidad	1 Juego

## IX-5. Sistema de Comunicaciones

### Descripción

Infraestructura de comunicaciones de la planta: red Ethernet Industrial, fibra óptica entre subestaciones, sistemas de comunicación de voz y enlace con operadora de la red de distribución.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Red principal	Ethernet Industrial Gigabit (IEEE 802.3z) con fibra óptica multimodo OM4

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Switches de red	Industriales, montaje en DIN, IP40 mínimo, temperatura -40 °C a 70 °C
Sistema de comunicación de voz	Sistema intercomunicador (intercomunicador industrial + PABX)
Protocolo de tiempo	NTP sincronizado con todos los PLCs y SCADA
Cantidad	1 Juego (sistema completo)

## IX-6. Fuente UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)

### Descripción y Función

Sistema UPS para alimentación ininterrumpida de los sistemas de control (PLCs, SCADA, servidores, instrumentación crítica) durante fallas de energía eléctrica, garantizando cierre seguro y registro de datos.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Potencia nominal	10 kVA
Tipo	Online doble conversión (Clase 1 IEC 62040-3)
Topología	Trifásico
Autonomía	1 hora a plena carga
Voltaje de salida	220 V / 60 Hz monofásico
Forma de onda de salida	Sinusoidal pura (THD < 3%)
Conmutador automático de doble fuente (ATS/SCB)	Incluido con armario
Batería	VRLA (AGM) libre de mantenimiento, vida útil $\geq$ 5 años a 25 °C
Alarmas y comunicaciones	SNMP, RS232/USB para monitoreo remoto
Cantidad	1 Elemento (sistema completo con armario)

## IX-7. Cables y Bandejas Portacables

### Descripción

Suministro e instalación de todo el cableado de potencia y de control interno del sistema de control eléctrico, incluyendo bandejas portacables, conduit y accesorios.

### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Cables de potencia BT (440 V)	Cu XLPE/PVC, 600/1000 V, calibre según cálculo de caída de tensión (máx. 3%)
Cables de alta tensión (10 kV)	Cu XLPE, 10/15 kV, conforme a IEC 60502-2
Cables de control y señal	Cu PVC 300/500 V, multiconductor (0,75 mm <sup>2</sup> o 1,5 mm <sup>2</sup> )
Cables de instrumentación (4-20 mA)	Par trenzado apantallado (STP), Cu 0,75 mm <sup>2</sup> , conforme a IEC 60227
Cables de fibra óptica	Multimodo OM4, 50/125 μm, para red industrial
Bandejas portacables	Acero galvanizado en caliente o acero inoxidable 316L en zonas con agua de mar; tapa en zonas de intemperie
Conduit	EMT o IMC galvanizado; HDPE en zonas de humedad alta
Separación mínima potencia/señal	300 mm (bandejas separadas o divisor metálico)

### Requisitos de Instalación

- Rutas de cable coordinadas con el diseño mecánico (no interferir con acceso a equipos).
- Etiquetado permanente de todos los cables en ambos extremos con etiquetas de vinilo impreso.
- Megado de cables de potencia antes de conexión: resistencia de aislamiento  $\geq 1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ .
- Prueba de continuidad de puesta a tierra en todos los circuitos.

## SISTEMA X – OTROS SUMINISTROS

### X-1. Materiales Auxiliares de Instalación (Pernería, Juntas, Arandelas)

#### Descripción

Suministro completo de todos los elementos de fijación, juntas de brida y accesorios de montaje para los sistemas del proyecto.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Pernos para sistemas de proceso (agua de mar)	Acero inoxidable A4-70 (316L), rosca métrica conforme a ISO 4017/4014
Pernos para sistemas de agua potable	Acero inoxidable A4-70 (316L)
Pernos para estructuras y soportes	Acero ASTM A307 o A325 con galvanizado en caliente
Tuercas	Acero inoxidable A4 (316L) para sistemas de proceso; galvanizadas para estructuras
Arandelas	Planas e inoxidables A4, conforme a ISO 7089/7090
Juntas de brida	Tipo espiroidal 316L/PTFE o PTFE sólido para sistemas con agua de mar; EPDM grado alimentario para agua potable
Calidad	Certificadas con marcado CE o equivalente ASTM
Cantidad	1 Elemento (lote completo para todo el proyecto)

#### Requisitos

- Par de ajuste de pernería aplicado con llave de torque calibrada conforme a tabla de torques del fabricante de la válvula o brida.
- Lubricación de pernería inoxidable con pasta antiagarrotamiento (Never-Seez o equivalente).

### X-2. Sistema de Iluminación

#### Descripción

Sistema de iluminación interior y exterior de la planta, incluyendo luminarias de proceso, iluminación de emergencia y alumbrado perimetral.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Tipo de luminaria	LED de alta eficiencia, vida útil $\geq$ 50.000 horas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Grado de protección	IP65 para áreas de proceso húmedas; IP44 para áreas interiores secas
Iluminación de emergencia	Batería autónoma 1 hora mínimo; cobertura de vías de evacuación
Nivel de iluminación mínimo (NTC 2050 / RETILAP)	Salas de control: $\geq 500$ lux; áreas de proceso: $\geq 200$ lux; pasillos: $\geq 100$ lux; exterior: $\geq 50$ lux
Temperatura de color	4.000 K (blanco neutro) para áreas de trabajo
Control	Encendido/apagado local + supervisión desde SCADA
Cantidad	1 Elemento (lote completo)

### X-3. Puesta a Tierra y Protección contra Rayos (Pararrayos)

#### Descripción

Sistema de puesta a tierra de protección (equipotencial) para todos los equipos eléctricos y electrónicos, y sistema de protección externa contra descargas atmosféricas (rayos) para la planta.

#### Especificaciones Técnicas

Parámetro / Requisito	Valor / Descripción
Sistema de puesta a tierra	Malla de tierra perimetral de cobre desnudo calibre $\geq \#2/0$ AWG; electrodos de varilla copperweld $\geq 2,4$ m de longitud; resistencia máxima de tierra: $\leq 5 \Omega$ conforme a RETIE
Pararrayos externo	Sistema de protección contra rayos conforme a NTC 4552 / IEC 62305
Pararrayos tipo	Franklin convencional o ESE (Early Streamer Emission) con radio de protección certificado
Protección transitoria (SPD)	Supresores de picos ANSI/IEEE C62.41 en tableros principales y secundarios
Cantidad	1 Elemento (sistema completo)

#### Requisitos de Diseño e Instalación

- Estudio de evaluación del riesgo de rayos conforme a IEC 62305-2 entregado antes del diseño.
- Prueba de resistencia del sistema de tierra con telurómetro:  $\leq 5 \Omega$ .
- Inspección anual del sistema de puesta a tierra documentada en plan de mantenimiento preventivo.

## SISTEMA XI – GASTOS DE EQUIPAMIENTO DE FÁBRICA E INSTALACIÓN

### XI-1. Equipamiento Completo de Fábrica – Suministro FOB

#### Descripción

Costo total de fabricación, pruebas FAT y despacho FOB (Free On Board) de todos los equipos incluidos en los Sistemas I al X, excluyendo obra civil, pero incluyendo la totalidad de equipos electromecánicos, instrumentación, tuberías, válvulas, sistemas de control y eléctrico.

#### Alcance del Suministro FOB

- Fabricación de todos los equipos conforme a las especificaciones técnicas.
- Pruebas de fábrica (FAT) documentadas con protocolos firmados por el Interventor designado por el Contratante.
- Embalaje marino de los equipos para transporte internacional por vía marítima.
- Documentación técnica completa: planos de fabricación, manuales de operación y mantenimiento en español, certificados de materiales, protocolos de prueba.
- Lista de repuestos recomendados para 5 años de operación con precios unitarios.
- Carga en puerto de origen (FOB Puerto de origen).

#### Requisitos de Documentación Entregable (predespacho)

- Data book por equipo: certificados de material, protocolos FAT, manuales, planos As-Built.
- Manual de instalación y puesta en servicio.
- Lista de torques para pernería de equipos rotativos.
- Procedimiento de almacenamiento y preservación de equipos durante el transporte.

### XI-2. Gastos de Instalación y Puesta en Marcha in Situ

#### Descripción

Servicios de supervisión de montaje, asesoría técnica de instalación, pruebas SAT y puesta en servicio de todos los sistemas de la planta, prestados por el equipo de ingeniería especializado del fabricante/Contratista.

#### Alcance de los Servicios de Instalación

- Supervisión de la instalación mecánica, eléctrica e instrumental de todos los equipos por personal especializado del fabricante.
- Alineación de equipos rotativos y verificación de montaje.
- Conexión de instrumentación y verificación de señales (loop check).
- Programación y configuración de PLCs y SCADA.
- Pruebas SAT: puesta en frío (cold commissioning), puesta en caliente (hot commissioning) y prueba de rendimiento.

- Capacitación del personal de operación y mantenimiento de la planta (mínimo 3 meses).
- Elaboración de Punch List y seguimiento hasta cierre total.
- Emisión del Certificado de Puesta en Servicio (Mechanical Completion Certificate y Performance Test Report).

#### Prueba de Rendimiento (Performance Test)

- Duración mínima: 72 horas continuas de operación al 100% de la capacidad nominal.
- Parámetros a verificar: Caudal de producción  $\geq 2.160 \text{ m}^3/\text{h}$ ; calidad del agua producida conforme a Res. 2115/2007; consumo energético específico  $\leq 3,04 \text{ kWh/m}^3$ ; tasa de recuperación SWRO =  $42\% \pm 2\%$ ; SDI permeado UF  $\leq 2,5$ ; turbidez agua potable  $< 0,5 \text{ NTU}$ ; pH agua potable 7,5-8,2.
- Si algún parámetro no se cumple, el Contratista realizará los ajustes necesarios sin costo adicional y repetirá la prueba.
- El resultado de la prueba de rendimiento se documentará en informe firmado por ambas partes.

#### Capacitación del Personal

- Programa de capacitación documentado (temario y horario) presentado al Contratante para aprobación 30 días antes del inicio.
- Temas mínimos: operación normal de todos los sistemas; procedimientos de limpieza CIP; mantenimiento preventivo de membranas, bombas y válvulas; manejo seguro de reactivos químicos; respuesta ante emergencias; uso del SCADA.
- Evaluación escrita al final de la capacitación y entrega de certificados de asistencia.

## ANEXOS

### ANEXO A – Requisitos de Calidad del Agua Permeada (SWRO)

Parámetro	Valor Post-SWRO (antes remineralización)	Valor Exigido Res. 2115/2007
Turbidez	< 0,1 NTU	≤ 2 NTU
Color aparente	< 1 UPC	≤ 15 UPC
SDT (sólidos disueltos totales)	100-400 mg/L	≤ 500 mg/L
pH	6,4-6,5 (antes remineralización)	6,5 – 9,0
pH post-remineralización	7,5 – 8,2	6,5 – 9,0
Cloro residual libre	≤ 0,3 mg/L (post-desinfección)	0,3 – 2,0 mg/L
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	≥ 20 mg/L (post-remineralización)	≥ 6 mg/L (no regulado en 2115)
Conductividad	< 800 μS/cm	No establecido (referencia WHO < 800)
Coliformes totales	No detectables en 100 mL	0 UFC/100 mL
E. coli	No detectables en 100 mL	0 UFC/100 mL
Índice de Langelier (LSI)	≈ +0,2	No corrosivo (LSI ≥ 0)

### ANEXO B – Consumo Energético Específico por Subsistema

Subsistema	Consumo Específico (kWh/m <sup>3</sup> de agua producida)	Observaciones
Pretratamiento (captación + DAF)	0,290	Incluye bombas captación y bombas DAF
Ultrafiltración cerámica	0,263	Incluye bombas UF y retrolavado
Ósmosis inversa SWRO (con ERD)	2,24	Con recuperación de energía PX (98%)
Postratamiento (remineralización)	0,025	
Sistema de suministro a red	0,222	Con altura de elevación 50 m provisional
TOTAL	3,04 kWh/m <sup>3</sup>	Referencia de diseño – verificar en prueba de rendimiento

## ANEXO C – Consumo de Productos Químicos por m<sup>3</sup> de Agua Producida

Producto	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo diario (kg/día a 51.840 m <sup>3</sup> /d)	Especificación
Hipoclorito de sodio (cloro activo 0,8%)	0,257	13.323	Solución electrolítica in situ
Tricloruro de hierro (FeCl <sub>3</sub> 40%)	0,127	6.584	Solución madre al 40%
Reductor (bisulfito de sodio)	0,007	363	
Inhibidor de incrustaciones	0,012	622	Compatible con poliamida
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,050	2.592	Grado alimentario
Caliza (CaCO <sub>3</sub> )	0,120	6.221	≥ 95% CaCO <sub>3</sub> grado potable
Hidróxido de sodio (NaOH 30%)	0,009	467	Para CIP alcalino
Ácido clorhídrico (HCl 31%)	0,018	933	Para CIP ácido