

Estudio técnico-económico para disminuir el costo unitario de producción de agua desalinizada de una planta monousuario en un 15% mediante una planta multiusuario en un plazo de 5 meses.



Nombre: Sergio Alberto Shipley Pastén

Profesor: Luis Pisani Codoceo

Fecha: 06-12-2023

Índice

Resumen ejecutivo.....	3
Introducción.....	4
Objetivos.....	5
Estado del Arte.....	6
Soluciones del problema.....	9
Evaluación económica.....	12
Metodología.....	12
Medidas de desempeño.....	14
Desarrollo del proyecto en función de la metodología.....	15
Resultados.....	34
Discusión.....	35
Conclusiones.....	42
Referencias.....	44
Anexo.....	49

Resumen ejecutivo:

El proyecto en SOVENTIX busca reducir el costo unitario de producción de una planta desaladora mediante el sobredimensionamiento de la producción en relación con la demanda del parque industrial.

El informe, además de no identificar consumidores adicionales en el balance hídrico para integrarse a la demanda del parque, realiza un análisis detallado de los componentes de una planta de osmosis inversa, resaltando las diferencias en la toma de agua y la filtración granular entre ambas plantas.

En el análisis de sensibilidad, se concluyó que el precio de la energía es el principal factor que afecta la variación del costo unitario de producción.

Finalmente, se obtuvo una diferencia del 24,85% en el costo unitario entre la planta de 500 L/s y la de 50 L/s, atribuida principalmente a las economías de escala en los costos de inversión y a la disparidad en el consumo eléctrico de ambas plantas.

The project at SOVENTIX aims to reduce the unit production cost of a desalination plant by oversizing production in relation to the industrial park's demand.

The report, in addition to not identifying additional consumers in the water balance to integrate into the park's demand, conducts a detailed analysis of the components of a reverse osmosis plant, highlighting differences in water intake and granular filtration between the two plants.

In the sensitivity analysis, it was concluded that the energy price is the primary factor influencing the variation in the unit production cost.

Finally, a 24.85% difference in unit cost was achieved between the 500 L/s and 50 L/s plants, primarily attributed to economies of scale in investment costs and the disparity in the electricity consumption of both plants.

Introducción:

SOVENTIX es una empresa alemana con una filial en Chile, que opera de manera integrada en la producción de energía solar. Sus servicios abarcan desde asesoramiento financiero hasta el mantenimiento y la optimización parque solares.

En su continua exploración de nuevos mercados, es que la empresa ha decidido analizar la posibilidad de desarrollar hidrógeno verde, mediante la electrólisis de agua alimentada con energía solar. Chile posee una ventaja competitiva significativa en términos del precio unitario de energía, gracias a la intensa radiación solar que caracteriza al norte del país, lo que produce que el precio de producción de hidrógeno verde sea atractivo para diversas empresas. El objetivo de SOVENTIX es transformar este hidrógeno verde en amoníaco u otros derivados, con la intención de satisfacer tanto la demanda local como parte de la demanda externa.

La compañía actualmente se encuentra conceptualizando un Parque industrial en la ciudad de Mejillones, para aprovechar las sinergias existentes entre distintas empresas y poder hacer realidad su proyecto. La ventaja de los parques industriales es que permite a pequeñas y medianas empresas utilizar infraestructura compartida para generar economías de escala y disminuir el costo unitario de sus productos, logrando precios competitivos frente a las grandes empresas multinacionales. Proyecciones realizadas por la consultora HINICIO en la conceptualización del parque industrial muestran que el proyecto puede disminuir el valor de inversión desde 4.196 [MMUSD] a 3.269 [MMUSD].

Paralelamente, el uso de infraestructura compartida reduce los tiempos de evaluación ambiental y la redundancia en infraestructura. Esto último generando una disminución en el impacto ambiental en la zona a desarrollar el proyecto.

Dentro de los estudios realizados para la creación del parque industrial y la planta de amoníaco verde se encuentra “Optimización de un sistema integrado de producción de amoníaco verde”, “Estudio sobre el mix energético óptimo para el suministro eléctrico de una planta de hidrógeno verde para el proyecto Solar NH3-pool”, “Optimización de la logística de transporte y almacenamiento de hidrógeno y amoníaco verde para un proyecto en Antofagasta”, “Plan maestro del parque industrial H2 mejillones”, entre otros.

Pese a la gran cantidad de estudios de prefactibilidad que cuenta el parque, no hay ninguno analice el suministro de agua para la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Se estima que la cantidad de agua necesaria para la producción de 1 kilogramo de hidrógeno verde ronda entre los 9-12 kilogramos de agua desmineralizada. El agua utilizada durante el proceso debe ser tratada previamente logrando un nivel de pureza tal, que evite la deposición de minerales y el consiguiente deterioro de los elementos de las celdas, consiguiente con esto, purezas en torno a un 99.999 vol % del hidrógeno extraído (Vásquez & Salinas, 2019). Si bien, el valor que la consultora HINICIO atribuye a la inversión de la planta desalinizadora es menor a un 5%, el agua es parte de la cadena de suministro del hidrógeno verde, por lo que la inversión de más de 40 billones de dólares depende de su disponibilidad.

Objetivos:

Objetivo general:

Realizar un estudio técnico-económico para disminuir el costo unitario de producción de agua desalinizada un 15% mediante una planta multiusuario en un plazo de 5 meses.

Objetivos específicos:

1. Disminuir en un 15% el valor unitario del CAPEX de una planta monousuario de 50 L/s para el suministro de una empresa productora de amoníaco verde mediante una planta multiusuario de 500 L/s para el suministro del parque industrial.
2. Disminuir en un 15% el valor unitario del OPEX de una planta monousuario de 50 L/s para el suministro de una empresa productora de amoníaco verde mediante una planta multiusuario de 500 L/s para el suministro del parque industrial.
3. Calcular y comparar el valor neto de ambos proyectos.

Estado del Arte:

La grave crisis hídrica presente en Chile, producto de la falta de lluvias y su subsecuente sequía, ha generado que Chile se ubique en el lugar 16 de los países de mayor estrés hídrico del mundo (único país de Latinoamérica situado en el ranking). Esto implica que en el país se utiliza más del 80% de su suministro de agua renovable para riego, ganadería, industria y necesidades domésticas (World Resources Institute, 2023). Para afrontar esta problemática, Chile ha impulsado la construcción de plantas desalinizadoras, enfocadas principalmente a los procesos de minería, principal fuente de ingresos del país (ACADES, 2023).

Chile actualmente cuenta con 31 plantas desalinizadoras con una capacidad mayor a 20 litros por segundo, tanto en funcionamiento como en etapa de proyecto (ACADES, 2023). Actualmente se cuenta con una capacidad de producción de 8.200 litros por segundo, la cual se duplicaría para el año 2026 y triplicaría para el año 2032 (ACADES, 2023). Se proyecta que el consumo de agua desalinizada proveniente del mar para la minería pase de un 32% en el año 2021 a un 68 % al año 2032 (COCHILCO, 2023).

Al observar la Imagen 1 se puede apreciar de manera gráfica la concentración de plantas desalinizadoras que presenta la Región de Antofagasta, contando actualmente con el 77.1% de toda la capacidad actual del país [Imagen 2].

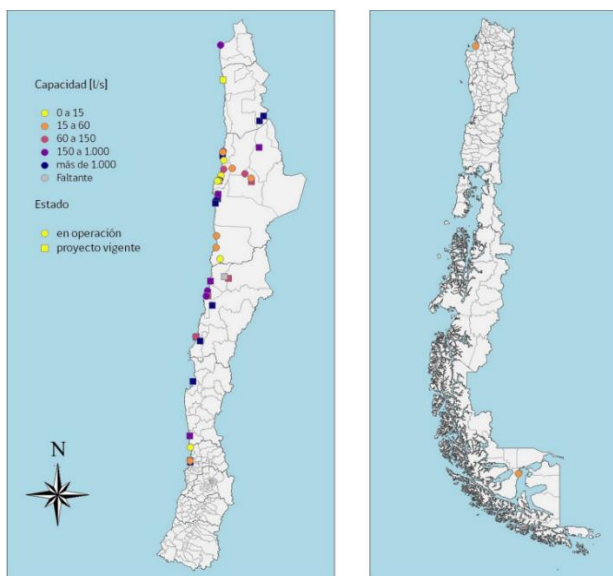


Imagen 1: Distribución gráfica de las plantas desalinizadoras en Chile. Fuente: (Vicuña et al, 2022)

Región	Capacidad actual		Capacidad futura			
	l/s	%	N	l/s	%	N
Operativas	8.558	100	38	38.766	100	76
Tarapacá	13	0,1	1	2.067	5,3	4
Arica	208	2,4	1	408	1,1	2
Antofagasta	6.603	77,1	25	19.591	50,5	32
Atacama	1.620	19,0	4	9.177	23,7	14
Coquimbo	4	0,0	1	3.804	9,8	13
Valparaíso	59	0,7	3	3.669	9,5	8
Biobío	33	0,4	1	33	0,1	1
Aysén	3	0,0	1	3	0,0	1
Magallanes	15	0,2	1	15	0,1	1
Sist. de impulsión sin desalinización			5			5
No operativas			3			3
Sin información			2			2
Proyecto suspendido o fusionado						11
Total			48			97

Imagen 2: Distribución de las plantas desalinizadoras en Chile. Fuente: (Vicuña et al., 2022)

Si bien, las plantas desalinizadoras son una alternativa para amortiguar los efectos de la grave crisis hídrica presente en Chile, tienen impactos negativos en los territorios que son implementados. Estos se pueden clasificar en impacto en la fauna marina, en el uso intensificado de energía, impacto en el fondo marino, ruido y el uso de tierra [Imagen 3].

Table 1. Potential negative impacts of desalination.

Sr#.	Environmental impacts of desalination
1	Impact on the marine environment
2	Intensified use of energy
3	Impact on groundwater
4	Noise pollution
5	The use of land

Imagen 3: Potenciales impactos negativos de las plantas desalinizadoras. Fuente: (Ameen et al., 2017)

Este impacto es especialmente complejo en una ciudad tan saturada de industrias como Mejillones (ciudad donde se ubicará el Parque industrial), la cual es considerada una de las 5 zonas de sacrificio en Chile. Para ejemplificar el nivel de saturación industrial, en la ciudad se encuentran 9 plantas termoeléctricas en menos de 9 kilómetros.

Pese a esto, la ciudad posee ejemplos de infraestructura compartida interesantes de ser mencionados; algunas de estas plantas termoeléctricas tienen una misma planta desalinizadora que captura el agua que va a ser utilizada en el proceso. Estas plantas son la termoeléctrica ANG1 & ANG2, la CTM1 & CTM2 y CCH1 & CCH2. Si bien esta es una buena primera aproximación a lo que existe hoy en la actualidad, todas estas termoeléctricas tienen el mismo dueño, lo que facilita la ejecución de estas iniciativas.

Un ejemplo de infraestructura compartida para suministrar agua a industrias con dueños distintos es el proyecto CRAMSA (Imagen 4), el cual plantea la creación de una planta desalinizadora de capacidad total de 7.000 metros cúbicos diarios para provisionar de agua los sectores de Antofagasta Norte, La Negra y Calama. Se transformaría en la primera planta desalinizadora multiusuario en Chile, disminuyendo la infraestructura redundante y los impactos asociados a la construcción de varias plantas. Cabe destacar que los usuarios finales de este proyecto son industrias, mineras y localidades.



Imagen 4: Imagen referencial del proyecto CRAMSA. Fuente: Sitio web oficial del proyecto CRAMSA.

Finalmente, algunos países están pensando obtener el agua para la producción de hidrógeno de plantas de tratamiento de aguas residuales. Los países con mayor potencial de energía renovable, como Australia, también se encuentran entre los lugares más secos del planeta. A nivel mundial hay disponibles 380.000 GL/año de aguas residuales, y esto es mucho más que los 34.500 GL/año de agua necesarios para producir las 2,3 Gt de hidrógeno proyectadas en una economía madura del hidrógeno (Woods et al., 2022).

Soluciones del problema:

1. Conceptualización técnico-económica de dos escenarios de plantas de tratamiento de agua con capacidad productiva de 50 L/s y 500 L/s respectivamente.
2. Conceptualización técnico-económica de dos escenarios de plantas desalinizadoras con capacidad productiva de 50 L/s y 500 L/s respectivamente.
3. Conceptualización técnico-económica para el transporte de agua desde una planta desalinizadora existente con dirección hacia el parque industrial.

Se procedió a desarrollar una matriz de riesgos para cada solución potencial, detallando los posibles riesgos asociados. Es importante destacar que los puntajes asignados difieren en función de la naturaleza específica de cada proyecto. A continuación, se enlistan los riesgos identificados:

- A. Problemas para la identificación de la ubicación del proyecto.
- B. Obtención de valores poco atractivos para la empresa.
- C. Escasa información para el desarrollo del proyecto y/o comparación de los resultados finales.
- D. Anuncio de proyecto similar durante la elaboración del proyecto.

		PLANTA DESALADORA				
		Severity →				
		1 Negligible	2 Minor	3 Moderate	4 Major	5 Catastrophic
5 Very likely		5	10	15	20	25
4 Probable		4	8	12	16	20
3 Possible		3	6 B	9	12	15
2 Not likely		2	4	6	8	10 D
1 Very unlikely		1	2	3 A	4 C	5
		(1-6): Low risk		(7-12): Medium risk		(13-25): High risk

Imagen 4: Matriz de riesgo Planta desaladora. Fuente: Elaboración propia.

Severity → **PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA** →

	1 Negligible	2 Minor	3 Moderate	4 Major	5 Catastrophic
5 Very likely	5	10	15	20	25
4 Probable	4	8	12	16	20
3 Possible	3	6	9	12	15
2 Not likely	2	4	6	8	10
1 Very unlikely	1	2	3	4	5

(1-6): Low risk (7-12): Medium risk (13-25): High risk

Imagen 5: Matriz de riesgo Planta de tratamiento de agua. Fuente: Elaboración propia.

Severity → **TRAZADO DESDE PLANTA EXISTENTE** →

	1 Negligible	2 Minor	3 Moderate	4 Major	5 Catastrophic
5 Very likely	5	10	15	20	25
4 Probable	4	8	12	16	20
3 Possible	3	6	9	12	15
2 Not likely	2	4	6	8	10
1 Very unlikely	1	2	3	4	5

(1-6): Low risk (7-12): Medium risk (13-25): High risk

Imagen 6: Matriz de trazado desde planta existente. Fuente: Elaboración propia.

Al sumar los puntajes de la matriz de riesgos, se determina que la planta desalinizadora acumula 23 puntos, la planta de tratamiento de agua alcanza los 33 puntos y el trazado desde la planta existente suma 24 puntos. En consecuencia, la planta desaladora exhibe el menor riesgo entre las tres soluciones propuestas.

Para mitigar los riesgos, se implementaron las siguientes acciones:

- A. Identificar múltiples ubicaciones potenciales para tomar decisiones, evaluar la viabilidad de las zonas desde una perspectiva ambiental asegurándose de que no estén en áreas

protegidas. Reforzar la elección mediante revisión de literatura, buscando indicadores que puedan respaldar la selección del sitio.

- B. Examinar diversos proyectos similares en Chile para comprender su comportamiento económico a gran escala. Desarrollar configuraciones óptimas para maximizar la eficiencia financiera y realizar análisis de sensibilidad para identificar los factores más influyentes en el valor unitario. Formular recomendaciones orientadas a reducir dicho valor económico.
- C. Explorar diversas fuentes de información, como seminarios, webinars y declaraciones de impacto ambiental, entre otros. Además, aprovechar los recursos internos de GIZ para obtener datos relevantes.
- D. Mantener una revisión constante de los Estudios de Impacto Ambiental (SEA) para determinar la implementación de proyectos existentes. Asimismo, aprovechar los recursos internos de GIZ para estar al tanto de la iniciación de nuevas propuestas.

La solución a este problema va a ser la conceptualización técnico-económica de dos escenarios de plantas desalinizadoras con diferentes capacidades productivas. El primer escenario será planta desalinizadora con capacidad de 50 litros por segundo, para abastecer una planta de amoníaco verde que produce 2000 toneladas por día. Y en un segundo escenario, una planta desalinizadora con capacidad de 500 litros por segundo para abastecer al Parque industrial completo, el cual es equivalente a 10 plantas productoras de amoníaco verde con la misma capacidad productora del primer escenario.

El objetivo de este proyecto es que la comparación entre ambas plantas produzca una variación en el precio unitario significativa, para que la inversión sea atractiva para la empresa a realizarlo. De forma paralela, la infraestructura compartida es un elemento de amplia discusión en la economía del hidrógeno, por la capacidad que posee para minimizar costos de producción, como también reducir las externalidades negativas que este proyecto puede ocasionar.

La selección del proyecto se basa en su menor riesgo en comparación con otras opciones, respaldada por su tecnología consolidada, que proporciona abundante información y permite una identificación más sensata de las economías de escala potenciales. Aunque la planta de tratamiento también ofrece información diversa, existe un riesgo elevado de que un proyecto ya tenga considerada la construcción de una planta para el hidrógeno verde, lo que podría invalidar la viabilidad del proyecto. En cuanto al trazado de una nueva ruta de agua desde plantas existentes, la falta de

información pública sobre la proporción de agua desalinizada utilizada en cada planta dificulta la viabilidad del proyecto, ya que se basaría en supuestos significativos sin una base sólida.

Evaluación económica:

Dado que el proyecto implica una evaluación técnico-económica, una parte crucial de este radica en el empleo de herramientas económicas para obtener resultados económicamente comparables. En el marco de los resultados esperados, se busca calcular el valor unitario de producción de ambas plantas desalinizadoras utilizando la fórmula del **Valor Actual Neto (VAN)**. Para este cálculo, se determinó de manera empírica la **tasa de descuento** apropiada.

Adicionalmente, el proyecto contempla un **análisis de sensibilidad** destinado a identificar los factores clave que influyen en el valor unitario de producción. A partir de los datos obtenidos, se elaborarán conclusiones y recomendaciones fundamentadas.

Todas las herramientas económicas mencionadas previamente serán utilizadas durante el desarrollo del proyecto y se presentarán junto con los resultados. Luego, serán analizadas detalladamente en la sección de discusión y conclusión.

Metodología:

Para el desarrollo del proyecto se comenzará con el **Planteamiento de los criterios de evaluación de y elección de la ubicación de la planta desalinizadora**. El sitio será seleccionado entre las plantas termoeléctricas presentes en la ciudad de Mejillones, producto de su potencial de reutilización de infraestructura, su cierre producto del Plan de Cierre de Centrales de Energía de Carbón al año 2040 y las concesiones marinas que ya poseen. Los criterios de elección serán el año de cierre y que no cuenten con una estrategia en marcha de reconversión.

Una vez establecida la ubicación de la planta desalinizadora, se **caracterizará el área de influencia**, utilizando información pública presente en el SEA, particularmente las Caracterizaciones del Medio Humano de proyectos con ubicaciones y dimensiones similares. Paralelamente, se realizará un **levantamiento de información respecto a la oferta y demanda hídrica** de la zona con información pública presente en los Planes de desarrollo comunal, estimaciones de la demanda actual y futura, proyecciones de consumo, etc. Esto con la finalidad de identificar posibles usuarios adicionales al Parque industrial, en caso de que exista una brecha entre demanda y oferta hídrica.

Posteriormente, se realizará un **análisis más profundo con respecto a los componentes de las plantas desalinizadoras** disponibles, de manera de poder definir cuál es la tecnología más adecuada para el caso de estudio; como también la **normativa chilena e internacional** aplicable a este tipo de proyectos.

Luego, se procederá a realizar el **dimensionamiento del proyecto** de desalinización, el cual en un primer escenario considerará una planta monousuario con capacidad de 50 litros por segundo de agua desalinizada, y en un segundo escenario una planta multiusuario con capacidad de 500 litros por segundo. Dentro del dimensionamiento se considerará la bocatoma, planta desalinizadora, estaciones de bombeo, tuberías, etc.

Una vez finalizado el dimensionamiento técnico del proyecto, se comenzará el análisis económico, en donde se **calculará el CAPEX, OPEX y flujo de caja** para ambas plantas. Para esto se utilizará información que posee el clúster de energía GIZ utilizado en proyectos anteriores, siendo posteriormente corroborado con la literatura existente y valores referenciales procedentes de proyectos realizados en Chile. Estos valores permitirán realizar el **flujo de caja** para ambos escenarios, pudiendo posteriormente **calcular el costo unitario de agua desalinizada**.

Posteriormente se efectuará un **análisis de sensibilidad**. Esto permitirá identificar las variables que más afectan el costo unitario del agua y realizar sugerencias posteriores.

Finalmente, se realizará un análisis comparativo entre ambos escenarios, para identificar el **impacto económico, social y medioambiental**, obteniendo conclusiones generales y recomendaciones finales.

La metodología empleada en este proyecto se fundamenta en el enfoque estándar para estudios de prefactibilidad, ampliamente aplicado tanto de forma interna en la empresa como por diversas consultoras. La representación gráfica de esta metodología se encuentra en la Imagen 7, y se presenta de manera detallada en formato de Diagrama de Gantt en el ANEXO 1:



Imagen 7: metodología a utilizar. Fuente: Elaboración propia.

Medidas de desempeño:

Para el cumplimiento del OE1:

$$CAPEX = \Delta PP\&E \quad (1)$$

Donde PP&E es propiedad, planta y equipo.

Para el cumplimiento del OE2:

$$OPEX = \sum_{i=1}^N \text{gastos operacionales} \quad (2)$$

Para el cumplimiento del OE3:

$$VAN = CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

Donde VAN es el valor actual neto de los costos, C_t es el costo incurrido en el periodo t y r es la tasa de descuento.

Desarrollo del proyecto en función de la metodología:

Ubicación del proyecto:

En la selección de la ubicación del proyecto, se evaluó la posición de una planta termoeléctrica a carbón ya establecida en la ciudad de Mejillones. Para un análisis más detallado, se proporciona el ANEXO 2, que detalla los criterios de selección y brinda una breve descripción de las plantas consideradas. Como resultado de este análisis, se determinó que la ubicación óptima para este proyecto es en las instalaciones de la Central Termoeléctrica Mejillones 1 y 2, propiedad de la empresa ENGIE.

Dimensionamiento

Con el fin de realizar una comparación más precisa entre ambas plantas, se procuró que sus configuraciones fueran lo más similares posible. No obstante, algunos componentes solo están disponibles para caudales mínimos específicos, lo que impide que ambas plantas tengan configuraciones idénticas. Un análisis detallado de los componentes de las plantas desalinizadoras por ósmosis inversa se encuentra en el ANEXO 3, al final del informe.

Captación del agua de mar.

Para establecer la profundidad de la toma de agua se toma como referente a la "Planta Desalinizadora de Agua de Mar para la Región de Atacama, Provincias de Copiapó y Chañaral" presenta en el SEA, la cual se ubica a 20 metros medido desde el nivel del mar. Esta elección de profundidad se respalda en la consideración de que la ubicación óptima para la estructura de toma en alta mar, en términos de calidad del agua de origen, se encuentra a profundidades del fondo oceánico de 20 metros o más (Voutchkov, 2017).

Con el fin de alcanzar esta profundidad, se requiere una longitud de 700, según la barimetría de la zona de mejillones presente en la Imagen 8 e Imagen 9.

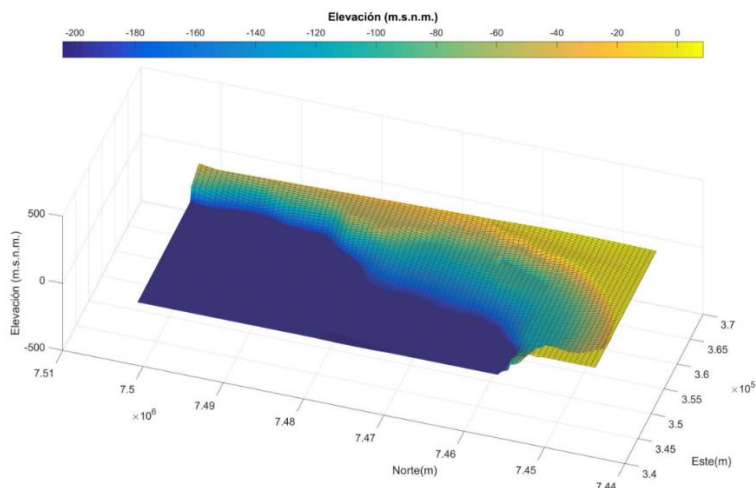


Imagen 8: Barimetría de la ciudad de Mejillones. Fuente: (Centro de ecología aplicada, 2018)

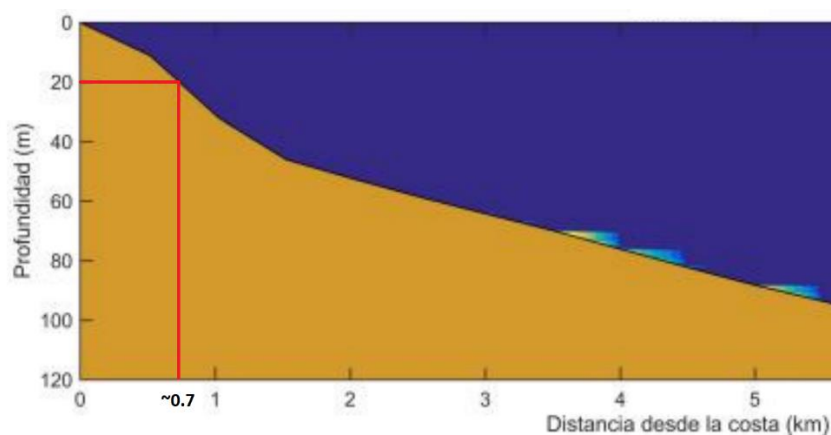


Imagen 9: Barimetría de la ciudad de Mejillones. Fuente: Elaboración propia.

Para calcular los valores de la estructura de toma de agua, se aplica un sobredimensionamiento considerando la tasa de rechazo de la osmosis inversa, que oscila entre un 40% y un 50%. Además, se incorpora un sobredimensionamiento adicional, entre un 3% y un 6%, debido al retro lavado en las etapas de pretratamiento. En este proyecto, se adopta una tasa de rechazo del 45% y un retro lavado del 5%, resultando en los siguientes caudales de entrada:

Caudal de la planta [L/s]	Caudal captación del mar [L/s]
50	117
500	1167

Tabla 1: Caudal de captación requerida de ambas plantas desaladoras en función del caudal final requerido.

Existe una velocidad máxima bajo las cuales estas estructuras pueden captar el agua para no afectar la fauna marina. La velocidad de captación máxima o también denominada corriente de agua a baja

velocidad (entre 0,1 – 0,15 m/s) pasa transversalmente a través de la malla, asegurando una disminución en el atrapamiento y arrastre de distintas especies (Missimer et al., 2013). Se elige una velocidad de captación de 0,15 m/s, y se reemplaza los valores de la Tabla 1 en la Ecuación 4, obteniéndose los valores presentes en la Tabla 2:

$$A = \frac{Q}{v} \quad (4)$$

Caudal de Captación [L/s]	Superficie requerida [m^2]
117	780
1167	7780

Tabla 2: Superficie requerida de ambas plantas en función del caudal de captación.

Para cubrir esta superficie, la estructura de captación de la planta de 500 litros será un Coarse Screen (Imagen 10), el cual estará conectado mediante una tubería de HDPE hasta la sala de bombas de impulsión.



Imagen 10: Ejemplo de Coarse Screen para plantas desaladoras de gran tamaño. Fuente (Voutchkov, 2017).

Posteriormente, pasará por una pantalla denominada Drum Screen (Imagen 11), la cual tiene como objetivo principal eliminar las partículas sólidas de gran tamaño contenidas en el agua salina de origen para proteger las demás instalaciones de pretratamiento y el sistema de ósmosis inversa de daños en los equipos y la estructura, el ensuciamiento acelerado de los medios filtrantes y la reducción acelerada de la capacidad de tratamiento del agua de producto (Voutchkov, 2017).

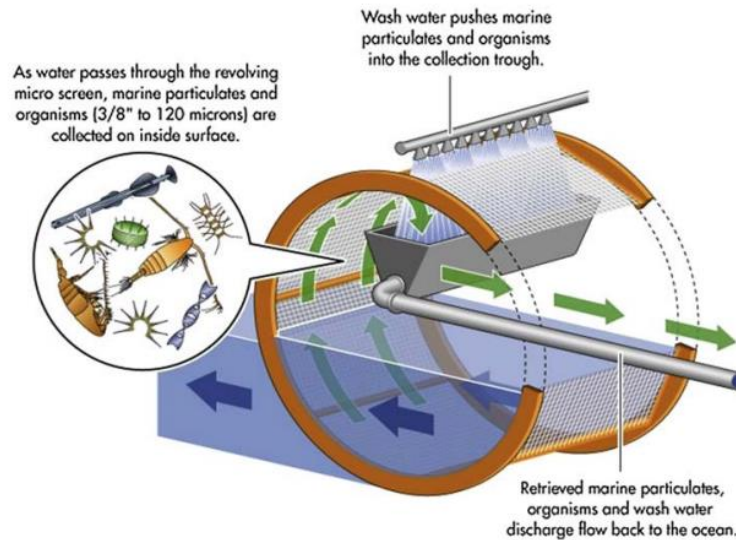


Imagen 11: Ejemplo de Drum screen para plantas desaladoras de gran tamaño. Fuente: (Voutchkov, 2017).

En la desalinizadora de 50 L/s, tanto el Coarse bar como el Drum screen son estructuras inaplicables debido al caudal mínimo que necesitan. En su lugar, se empleará un wide-wedge screen (Imagen 12), la cual es una pantalla pasiva en forma de "T" que se puede conectar offshore a la estación de bombeo. Al igual que la planta de 500 L/s, la toma de agua estará conectada a la sala de bombas de impulsión mediante una tubería de HDPE.



Imagen 12: Ejemplo de Wide wedge screen para plantas desaladoras de pequeño tamaño. Fuente: Brochure Johnson screens.

Pretratamiento.

De acuerdo con la experiencia de la consultora CDM Smith y la práctica comúnmente aplicada en las plantas desalinizadoras en Chile, para el presente estudio se ha supuesto un pretratamiento consistente en un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), filtración con medio granular, seguido de filtración con filtros cartuchos.

Para ambas plantas se tiene considerado un sistema DAF debido a su capacidad para funcionar en un rango amplio de caudales. Este componente incluye contenedores para realizar el proceso de coagulación y floculación (Imagen 13).

La coagulación es un proceso donde se agrega un coagulante (químico que produce la formación de partículas de mayor tamaño) que permite una mejor separación de los sólidos o contaminantes que pueda tener el agua a tratar (Vásquez, 2023).

La floculación se caracteriza por utilizar polímeros para promover una mejor separación de los sólidos, al igual que los coagulantes es utilizado para formar partículas de mayor tamaño mediante la desestabilización eléctrica de las partículas. El objetivo del floculante es mejorar el proceso de aglomeración de partículas en los procesos de flotación por aire disuelto (Vásquez, 2023).

El sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) tiene como función remover algas; hidrocarburos o aceites y solidos suspendidos cuando el umbral de operación típico de la etapa de filtración no puede operar, y que debido a su flotabilidad son fácilmente removidas a través de este proceso (Vásquez, 2023).

Tras la coagulación y la floculación, el agua salina se mezcla con agua clarificada, la cual está saturada de aire para exponer las partículas del agua salina con las burbujas de aire, que las llevarán a la superficie del clarificador. El agua clarificada se recicla desde el extremo efluente de las unidades DAF y se bombea a través de un saturador de aire a una velocidad del 10% - 15% del caudal del agua de origen que entra en el clarificador DAF (Voutchkov, 2017).



Imagen 13: Ejemplo de equipo DAF con una cámara para la coagulación y la floculación. Fuente: (Voutchkov, 2017).

La cámara de flotación es un tanque rectangular diseñado para una tasa de carga superficial de 20-35 m³ /m² h. La profundidad típica del tanque es de 2-3 m y la relación preferida entre la longitud el ancho es de 1,5-2,5:1. En la cámara de flotación, las burbujas de aire arrastran los sólidos adheridos a ellas hasta la superficie de la cámara, donde se acumulan y forman una capa de lodo (Voutchkov, 2017).

Al utilizar el catálogo de la empresa SIGMA, se obtiene la máxima Hydraulic Loading Rate (HLR), el cual se define como el flujo total de agua que se está tratando en la planta DAF, considerando tanto el flujo de entrada inicial como el reciclaje de agua dentro del proceso. Para la planta de 50 L/s tiene un HLR de 15 (m³/m²/h) y para la planta de 500 L/s un HLR de 33 (m³/m²/h).

Posteriormente, el agua pasa hacia el proceso de granulación media, el cual es el proceso de pretratamiento del agua de origen más utilizado actualmente en las plantas de desalinización por ósmosis inversa (aparte de la filtración por cartucho). Este proceso incluye la filtración del agua de origen a través de una o más capas de medios granulares. Los filtros convencionales utilizados para el pretratamiento del agua salina son comúnmente de una sola etapa y de doble medio (antracita y arena) (Voutchkov, 2017).

Debido al elevado costo de construcción de grandes recipientes a presión con superficies húmedas adecuadas para resistir la corrosión, los filtros a presión (Imagen 14) suelen utilizarse en plantas de ósmosis inversa de pequeña y mediana capacidad. En cambio, los filtros de gravedad de flujo descendente de doble medio y etapa única (Imagen 15) son el tipo predominante de tecnología de

pretratamiento de filtración utilizada en plantas desalinizadoras de capacidad superior a 40.000 m^3 /día (Voutchkov, 2017).



Imagen 14: Ejemplo de filtro a presión vertical para plantas desaladoras de pequeño y mediano tamaño. Fuente: (Voutchkov, 2017)



Imagen 15: Ejemplo de filtro granular medio de etapa única para plantas desaladora de gran tamaño. Fuente: (Voutchkov, 2017).

Dado lo anterior, es que el proceso de granulación media para la planta de 50 L/s va a ser mediante un filtro a presión y la de 500 L/s va a ser un filtro de gravedad de flujo descendiente medio con una sola etapa.

Para el cálculo del número de tubos a presión necesario para la planta de 50 L/s, se utilizaron los valores estándar presentes en la Imagen 16, lo que deriva en 8 filtros de presión, cada una con un

diámetro de 1.2 metros, una longitud de 6 metros, una profundidad de 0.7 metros y una tasa de filtración de $12 \text{ (m}^3/\text{m}^2/\text{h})$.

8.7.1.2 Pressure Filters—Key Design Criteria

The main design criteria for single-stage dual-media pressure filters in small- and medium-size desalination plants are very similar to these of gravity filters. Design criteria by which pressure filters differ from gravity filters are presented below:

Number of filter vessels	6–20
Filter vessel diameter	1.2–6 m/4–20 ft (typically 3 m/10 ft)
Filter vessel length	2.5–15 m/8–50 ft (typically 6 m/20 ft)
Depth of filter bed	0.6–0.9 m (2–3 ft)
FILTRATION RATE (AT DESALINATION PLANT INTAKE DESIGN FLOW)	
With all filters in service	12–25 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ (5–10 gpm/ft^2)
With two filters out of service	30 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ (12 gpm/ft^2)
HEADLOSS ACROSS THE FILTER VESSEL	
Total headloss across the filter	15–30 m/45–90 ft (avg. 20/65 ft)
Net headloss available for filtration	7.5–15 m (25–50 ft)

Imagen 16: Valores estándar para el diseño de filtros a presión. Fuente: (Voutchkov, 2017).

Para el cálculo del número de filtros de gravedad necesario para la planta de 500 L/s, se utilizaron los valores estándar presentes en la Imagen 17, lo que deriva en 10 celdas de filtro, de 12.6 metros de largo, 4.2 metros de ancho, una profundidad de 6 metros y una tasa de filtración de $8 \text{ (m}^3/\text{m}^2/\text{h})$.

Se considera un almacenamiento del 5% del agua que pasa a través del proceso de granulación media para el proceso de limpieza mediante retro lavado. Este se almacenará en un tanque aparte para ambas plantas.

8.7.1.1 Gravity Filters—Key Design Criteria

Key design criteria for single-stage dual-media gravity filters for medium- and large-size desalination plants are presented below:

Filter type	Dual-media, down-flow
Backwash	Air–water
Average filter cell run length	24 h
Flow distribution to individual cells	Pipe (if concrete channel used, channel depth should be tapered to keep velocity in the distribution channel above 2 m/sec at all times).
Number of filter cells	8–18
Filter cell width	3–8 m (10–26 ft)
Filter cell depth	4.5–7.5/15–25 ft
Filter cell length-to-width ratio	2:1–4:1 (typically 3:1)
Individual filter cell area	25–100 m ² (270–1100 ft ²)
Maximum water depth above filter bed	2.5 m/8 ft (should be equal or slightly higher than filter bed headloss, which usually is 1.8–2.4 m/6–8 ft).
FILTRATION RATE (AT DESALINATION PLANT INTAKE DESIGN FLOW)	
With all filters in service	8–10 m ³ /m ² h (3–4 gpm/ft ²)
With two filters out of service	15 m ³ /m ² h (6 gpm/ft ²)
FILTER MEDIA	
Top Layer: Anthracite or Pumice	
Anthracite/pumice layer—depth	1.0–1.8 m (2.6–6.0 ft)—for deep bed filters/high turbidity waters
Anthracite/pumice layer—depth	0.4–0.8 m for shallow bed filters—used for waters with low turbidity (<5NTU) and low organic content (TOC < 2 mg/L)
Anthracite/pumice—effective size	0.8–2 mm (typical 1.2 mm)
Anthracite/pumice—uniformity coefficient	1.3–1.7 (preferable < 1.4)
Anthracite—specific gravity	1.5–1.6 tons/m ³
Anthracite—bulk density	0.80–0.85 tons/m ³
Pumice—specific gravity	1.1–1.2 tons/m ³
Pumice—bulk density	0.40–0.55 tons/m ³
Bottom Layer: Sand	
Sand layer—depth	0.8–2.0 m for deep bed filters
Sand layer—depth	0.4–0.6 m—for shallow bed filters
Sand—effective size	0.4–0.6 mm
Sand—uniformity coefficient	<1.4
Sand—specific gravity	2.65 tons/m ³
Sand—bulk density	1.5–1.9 tons/m ³
Air–Water Filter Backwash System	
Maximum backwash rate	55 m ³ /m ² h (22 gpm/ft ²)
Average backwash rate	40–45 m ³ /m ² h (16–18 gpm/ft ²)
Duration (total air + water)	15–30 min (includes filter cell draining & fill up).

Imagen 17: Valores estándar para el diseño de filtros de gravedad. Fuente: (Voutchkov, 2017).

Una vez que el caudal de agua traspasa el proceso de granulación media, pasa por cartuchos para ser almacenados en un tanque y posteriormente impulsados por bombas de alta presión a través de las membranas de osmosis inversa.

Para el diseño se utilizó filtros de cartucho estándar (Imagen 18) para las plantas de desalinización por ósmosis inversa, las cuales suelen tener una longitud de 101,6 a 1524 [cm] y se instalan en recipientes a presión horizontales o verticales. Los sistemas de filtración de cartucho suelen estar diseñados para velocidades de carga hidráulica de 0,2-0,3 Lps/250 mm de longitud (Voutchkov,

2017). Para este informe, se utiliza una velocidad hidráulica de 0.25 Lps/250 mm, una longitud de 1016 mm para ambas plantas y una configuración de 7 cartuchos por recipiente. Lo que se traduce en que la planta de 50 L/s requiera 112 cartuchos distribuidos en 16 recipientes y que la planta de 500 L/s requiera de 1099 cartuchos distribuidos en 157 recipiente.



Imagen 18: Proceso de carga de cartuchos por recipiente. Fuente: (Voutchkov, 2017).

Osmosis inversa.

Finalmente, para el diseño del número de membranas para la osmosis inversa, se utiliza el manual técnico de Dow water & Process Solutions “FILMTEC REVERSE OSMOSIS MEMBRANES” (Imagen 19).

La calidad del agua seleccionado es “Open intake with generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment” SDI <3, debido a la profundidad a la que se encuentra la toma de agua. Se seleccionó para ambas plantas una membrana activa de 400 [ft^2] por elemento, un flujo de diseño de 9 [gpd] y una configuración de 7 membranas por recipiente, replicando la configuración de los cartuchos utilizados previamente. Para la planta de 50 L/s se requiere 714 membranas distribuidas en 102 recipientes de alta presión mientras que para la planta de 500 L/s se requieren de 7056 membranas distribuidas en 1008 recipientes de alta presión.

Feed source	RO Permeate	Well Water	Surface Water			Wastewater (Filtered Municipal Effluent or Industrial Effluent)			Seawater		
			Surface Water with DOW™ Ultrafiltration	Generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment	Generic conventional pretreatment	DOW™ Ultrafiltration	Generic membrane filtration (MBR/MF/UF)	Conventional pretreatment	Well or Open Intake with DOW™ Ultrafiltration	Open Intake with generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment	Open Intake with generic conventional pretreatment
Feed silt density index (%/min)	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 2.5	SDI < 3	SDI < 5
Maximum element recovery %	30	19	19	17	15	14	13	12	15	14	13
Active Membrane Area	Maximum permeate flow, gpd or maximum permeate flux, gfd										
365-ft ² elements	10,200	8,500	8,500	7,200	6,600	6,300	5,900	5,200	— Not Recommended —		
370-ft ² elements	10,200	8,500	8,500	7,200	6,600	6,300	5,900	5,200	7,800	7,400	7,000
380-ft ² elements	10,700	8,900	8,900	7,500	6,900	6,500	6,000	5,300	7,900	7,600	7,200
390-ft ² elements	10,920	9,200	— Not Recommended —			— Not Recommended —			— Not Recommended —		
400-ft ² elements	11,200	9,300	9,300	7,900	7,300	6,800	6,400	5,700	8,400	8,000	7,600
440-ft ² elements	12,300	10,300	10,300	8,700	8,000	7,600	7,100	6,300	9,200	8,800	8,360
Maximum element flux (gfd)	28	22.7	22.7	20	18	17	16	14	21	20	19
Design Flux range	21 – 25	16 – 20	16 – 20	13 – 17	12 – 16	11 – 15	10 – 14	8 – 12	9 – 11	8 – 10	7 – 10

Imagen 19: Guía de diseño de membranas para plantas desaladoras. Fuente: (Dow Water, 2023).

Descarga.

En el proyecto, se contempla una descarga por gravedad a través de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) o concreto. La determinación del diámetro y la longitud de estas tuberías recae en el titular del proyecto y debe tener en cuenta la cantidad y calidad del efluente, así como las variables oceanográficas y batimétricas del lugar. El ducto se debe anclar al fondo marino mediante sistemas de fijación o lastre, con la finalidad de conservar un punto de descarga fijo (Vicuña et al., 2022).

En el tramo final del emisario submarino se acoplan sistemas de difusión para descargar el efluente. En este tipo de proyectos, el difusor o difusores realizan la descarga de la salmuera mediante un chorro individual o mediante múltiples chorros (Tate et al., 2012), método que genera procesos de mezcla y dilución más eficientes en el medio marino.

La descarga del caudal tendrá un aumento de la salinidad a un valor estimado de 6,5% y un aumento de temperatura de 4°C. El sistema de descarga debe estar fuera de la Zona de Protección Litoral, por lo que se utilizó como ejemplo el proyecto de ampliación de la Planta Desaladora Norte presente en el SEA, la cual se ubica en la misma zona y tiene de descarga a 300 metros de la orilla del mar.

Almacenamiento.

Para la acumulación y capacidad de los sistemas de acumulación del agua tratada, se emplean estanques de acumulación o piscinas, los cuales pueden ser contruidos excavando el terreno natural con sistemas de impermeabilización o en superficie de hormigón armado, acero o fibra de vidrio, de tipo semienterrado o elevado (Servicio de Evaluación Ambiental, 2023).

Para el proyecto se considera 3 estanques de almacenamiento, el primero para almacenar el agua que se utilizará para realizar el proceso de retro lavado junto con la salmuera rechazada en el proceso de osmosis inversa, el segundo para la pre-impulsión del agua a la osmosis inversa y el último para almacenar el agua desalinizada en el terreno del proyecto. El tiempo de retención de cada estanque es de 60 minutos, 15 minutos y 60 minutos respectivamente.

Costos de inversión y operación del proyecto:

Este proyecto se sustenta en una serie de supuestos, los cuales se han extraído de informes previos, datos proporcionados por la empresa y la identificación de puntos de referencia mediante herramientas de geolocalización. Todos estos elementos se encuentran detallados en el ANEXO 3 y desempeñan un papel esencial en la elaboración de este informe.

Costos de inversión:

Para la elaboración de los costos del proyecto se consideró la clasificación presente en la Imagen 20 perteneciente a la AACE (Asociation for the Advancement of Cost Engineering), la que establece que el proyecto es Clase 5.

CLASE ESTIMADA	Características primarias	Características secundarias			
	NIVEL DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO Expresado como % de la definición completa	FIN DE USO Propósito típico de estimación	METODOLOGÍA Método típico de estimación	PRECISION ESPERADA, RANGO Variaciones típicas en <u>bajos</u> y <u>altos</u> rangos (a)	PREPARACIÓN DE ESFUERZO Grado normal de esfuerzo relativo al índice de costo mínimo de 1 [b]
Clase 5	0% a 2%	Concepto de detección	capacidad de factoring, modelos paramétricos, juicio o analogía	B: -20% a -50% A: +30% a +100%	1
Clase 4	1% a 15%	Estudio de viabilidad	Equipo de factoring o modelos paramétricos	B: -15% a -30% A: +20% a +50%	2 a 4
Clase 3	10% a 40%	Presupuesto, autorización o control	Costos unitarios semi-detallados con línea de ensamble. Ítems en línea	B: -10% a -20% A: +10% a +30%	3 a 10
Clase 2	30% a 70%	Control u oferta/demanda	Costo unitario detallado con detalles de proyección	B: -5% a -15% A: +5% a +20%	4 a 20
Clase 1	50% a 100%	Lista estimada u oferta/demanda	Costo unitario detallado con detalles de proyección	B: -3% a -10% A: +3% a +15%	5 a 100

Imagen 20: Clasificación de las Clases según AACE. Fuente: Sitio web de AACE.

Para el cálculo de los costos de inversión de las plantas desaladora, se interpoló los valores unitarios presente en las Asesorías Técnicas Parlamentarios de la biblioteca del congreso presentada en mayo del 2022 (Imagen 21).

Producción de agua tratada (desalinizada para diversos usos) (m³/día)	Costo de Inversión en equipamiento de desaladora (USD)	Costo de producción / m³ con operador (USD)
10	65.000	1,46
100	200.000	0,99
500	498.000	0,57
1.000	596.400	0,55
2.000	871.200	0,54
8.640	9.000.000	0,47
43.200	45.000.000	0,47
86.400	90.000.000	0,46

Imagen 21: Costos de inversión de distintas plantas desaladoras en Chile. Fuente: (BCN, 2022).

Con respecto a los cálculos de los costos de las obras marinas, se utilizó los valores de la Planta Desalinizadora de Agua de Mar de Antofagasta, entregados en el “Seminario desalación: La agricultura mirando al mar” (Tabla 3), organizado por el Ministerio de Agricultura, ECONSSA e INIA los cuales se sometieron a un ajuste exponencial presente en la Ecuación 5 para obtener los valores

de ambas plantas. Según la literatura, el valor del “m” del exponente es cercano a 0,8 (Wittholz, 2008).

Capacidad de la planta [L/s]	Costo de inversión [US \$]
300	18.000.000
900	7.400.000

Tabla 3: Costos de inversión de Obras Marinas. Fuente: “Seminario desalación: La agricultura mirando al mar”.

Para verificar el valor teórico de “m” se sustituyeron los datos de la Tabla 3 en la Ecuación 5, obteniendo un valor empírico de 0,81. Este resultado confirma la tendencia observada en la literatura y, por lo tanto, se utiliza para calcular los costos de inversión de las obras marinas de las plantas de 500 L/s y 50 L/s.

$$\left(\frac{Capital\ cost_{plant1}}{Capital\ cost_{plant2}} \right) = \left(\frac{Plant\ capacity_{plant1}}{Plant\ capacity_{plant2}} \right)^m \quad (5)$$

Los costos de inversión de los movimientos de tierra, la impulsión, la descarga y el valor de los estanques, se establecieron a través de cálculos preliminares multiplicados por valores unitarios de la consultora CDM Smith.

Los costos indirectos se calcularon como porcentajes de los costos directos, considerando los gastos generales, utilidades e instalación de faenas como un 45% del costo directo, los costos de ITO como un 3%, los costos de ingeniería como un 9%, los costos de contingencia se consideran como un 5% y la tramitación ambiental con un valor de 6500 UF.

En la Tabla 4 se puede apreciar el resumen de los costos de inversión del proyecto. Una distribución de los costos más detallada se encuentra en el ANEXO 5, presente al final del informe.

Descripción	Total USD 50 L/s	Total USD 500 L/s
Obras Marinas	1.215.402	11.187.465
PEAM	124.122	923.633
Impulsión Captación-Desaladora	320.467	454.462
Planta Desaladora	5.237.983	33.750.000
Descarga	94.811	123.302
Estanque 1 (km0)	23.052	41.728
Impulsión Desaladora-Estanque	552.710	629.456
TOTAL	7.568.547	47.110.047

Tabla 4: Resumen de los costos operacionales de ambas plantas desaladoras. Fuente: Elaboración propia.

Costos de operación:

En una primera fase, se procede al cálculo de las dimensiones de las tuberías y las velocidades de los fluidos dentro de las mismas. El diámetro se determina considerando que la velocidad interna no supere los 2 m/s y sea acorde con un diámetro de tubería estándar. Este cálculo se realiza mediante la aplicación de la Ecuación 4, y los resultados se detallan en la Tabla 5:

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
Caudal captación [m^3/s]	0,1167	1,1670
Diámetro tubería captación [m]	0,3000	1,000
Velocidad captación [m/s]	1,6505	1,4854
Caudal descarga [m^3/s]	0,0275	0,6667
Diámetro tubería descarga [m]	0,2500	0,1770
Velocidad descarga [m/s]	1,3581	1,7322
Caudal transporte a estanque final [m^3/s]	0,0500	0,5000
Diámetro tubería transporte a estanque final [m]	0,2000	0,6000
Velocidad transporte a estanque final [m]	1,5915	1,7684

Tabla 5: Parámetros de ambas plantas desaladoras. Fuente: Elaboración propia.

Con estos valores, se reemplaza en la ecuación de Reynolds (Ecuación 6), para caracterizar el movimiento del fluido al interior de las tuberías.

$$Re = \frac{\rho \times \bar{v} \times D}{\mu} \quad (6)$$

Donde \bar{v} es la velocidad, D el diámetro, ρ es la densidad del agua de mar y μ la viscosidad dinámica. La densidad del mar bajo condiciones de presión atmosférica y temperatura de 15 [°C] es de 1025,9728 [kg/m^3]. La viscosidad dinámica se determina mediante la fórmula de la Imagen 22, calculada a la misma temperatura que la densidad, dando como resultado un valor de 0,0012 [$Kg/m \times s$].

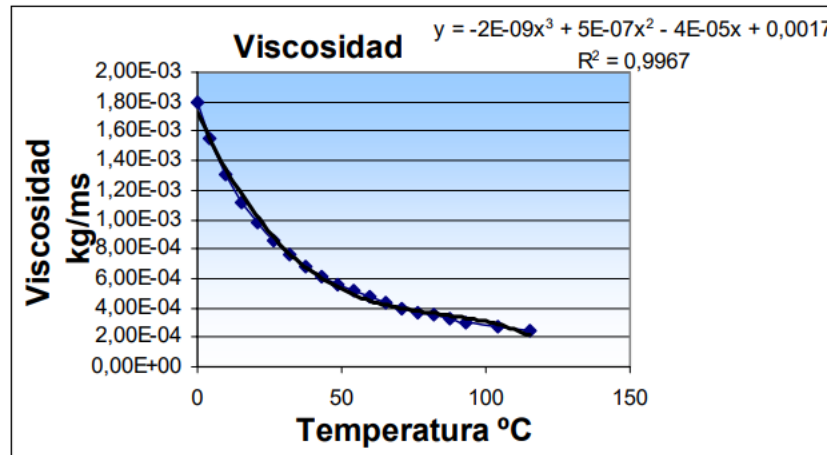


Imagen 22: Viscosidad dinámica del agua en función de la temperatura. Fuente: Universidad de las Américas Puebla.

Reemplazando los valores de viscosidad dinámica y densidad previamente mencionada, en conjunto con los valores de la Tabla 5 en la Ecuación 6, se obtiene:

Parámetro	Planta de 50 L/s	Planta de 500 L/s
Número de Reynolds impulsión	421297,6593	1263927,0140
Número de Reynolds transporte	270841,5030	902839,0460

Tabla 6: Número de Reynolds para transporte e impulsión de ambas plantas. Fuente: Elaboración propia.

Al observar los datos, se concluye que ambos flujos tienen un comportamiento turbulento ya que su valor de Reynolds es superior a 4000, por lo que se reemplazan los valores de la Tabla 5 y la Tabla 6 en la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 7) para obtener la Tabla 7:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log \left(\frac{\frac{K}{D}}{3,71} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
f impulsión	0,0366	0,0366
f transporte	0,0366	0,0366

Tabla 7: Coeficiente de fricción de ambas plantas, obtenida a partir de la Ecuación de Colebrook-White. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se utiliza la ecuación de Bernoulli (Ecuación 8) para calcular la pérdida de altura entre la toma de agua y la sala de bombas, como también entre la sala de bombas y la estación final:

$$\frac{P_1}{\rho \times g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \times \rho \times g} + H_b = \frac{P_2}{\rho \times g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \times \rho \times g} + \frac{f \times L \times v_{1-2}^2}{2 \times D \times g} \quad (8)$$

Debido a que las tuberías son presurizadas a lo largo de todos los trayectos ($P_1 = P_2$) y la velocidad es constante entre los tramos ($v_1 = v_2$), la ecuación queda de la siguiente manera:

$$H_b = h_2 - h_1 + \frac{f \times L \times v_{1-2}^2}{2 \times D \times g} \quad (9)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 20 presente en el Anexo 4, Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 en la ecuación de Bernoulli (Ecuación 9), se obtiene los valores presentes en la Tabla 8:

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
H_b impulsión [m]	49,8899	37,1040
H_b transporte [m]	79,0297	54,2975

Tabla 8: Altura manométrica requerida para ambas plantas para la impulsión y transporte. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se realiza el cálculo de la potencia requerida para impulsar el agua en cada etapa, empleando la Ecuación 10 y los datos proporcionados en la Tabla 8, dando como resultado los valores presentes en la Tabla 9:

$$Pot = H_b \times \rho \times g \times Q \quad (10)$$

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
Pot impulsión [MW]	0,0586	0,4358
Pot transporte [MW]	0,0928	0,6378

Tabla 9: Potencia eléctrica requerida para ambas plantas para la impulsión y transporte. Fuente: Elaboración propia.

Se utiliza una eficiencia mínima de bomba de un 55% (Bonilla & Venera, 2017) con el fin de sobredimensionar la potencia con el fin de suplir la perdida por singularidades no consideradas en la Ecuación 9, obteniéndose la Tabla 10:

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
Pot impulsión [MW]	0,1065	0,7924
Pot transporte [MW]	0,1688	0,6687

Tabla 10: Potencia eléctrica sobredimensionada por eficiencia de la bomba para la impulsión y transporte. Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el consumo de energía de la planta de ósmosis inversa, se tomaron valores de referencia de la literatura, que indican que la energía específica de una planta desalinizadora oscila entre 3,5 y 4,5 kWh/m³, abarcando los procesos de pretratamiento y postratamiento (Kim et al.,2019). Para este informe se utilizó el valor de valor de 3,5 KWh/ m³.

Después de establecer la potencia requerida para la impulsión y transporte del proyecto, junto con el valor teórico de consumo de energía de la planta de ósmosis inversa, se realiza el cálculo del consumo eléctrico anual. Este cálculo implica multiplicar los valores por 24 (horas del día) y luego por 365 (días del año). Los resultados detallados se encuentran en la Tabla 11.:

Parámetro	Planta 50 L/s	Planta 500 L/s
<i>Consumo electrico Planta elevadora [MWh/año]</i>	932,94	6.941,42
<i>Consumo electrico Planta desaladora [MWh/año]</i>	6.070,68	60.706,80
<i>Consumo electrico impulsión final [MWh/año]</i>	1.478,688	5.857,81

Tabla 11: Consumo eléctrico anual de ambas plantas durante todo el proceso. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el costo de la energía, se realiza la multiplicación de los valores presentes en la Tabla 11 por el "Precio Medio de Mercado SEN" con fecha del 4 de enero de 2023, proporcionado por la Comisión Nacional de la Energía. Se fija un costo de energía de 80 USD/MWh durante el día y 150 USD/MWh en horario nocturno. Además, se establece un costo de peaje en el sistema de distribución de 10 USD/MWh.

En relación con los demás costos operativos considerados en el proyecto, se recurrió a la base de datos proporcionada por la consultora CDM Smith para calcular los costos asociados al personal, productos químicos y mantenimiento. Los gráficos se encuentran en las Tablas presentes en el ANEXO 6, dando como resultados las Tablas 12 y 13:

DESCRIPCIÓN	PEAM	PTOI	EF
PERSONAL [MMUSD]	0,01	0,18	0,01
ENERGÍA [MMUSD]	0,12	0,78	0,19
PROD. QUÍM. [MMUSD]	0,02	0,15	0,00
MANTENIMIENTO [MMUSD]	0,004	0,13	0,02
TOTAL [MMUSD]	0,16	1,24	0,22

Tabla 12: Resumen de los costos operacionales de la planta desaladora de 50 L/s. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCIÓN	PEAM	PTOI	EF
PERSONAL [MMUSD]	0,10	1,31	0,10
ENERGÍA [MMUSD]	0,89	7,77	0,75
PROD. QUÍM. [MMUSD]	0,24	1,45	0,00
MANTENIMIENTO [MMUSD]	0,03	1,31	0,02
TOTAL [MMUSD]	1,26	11,83	0,87

Tabla 13: Resumen de los costos operaciones de la planta desaladora de 500 L/s. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se sustituyen los datos proporcionados en la Tabla 4, la Tabla 12 y la Tabla 13, junto con los supuestos detallados en la Tabla 21 y la Tabla 22 que se encuentran en el ANEXO 4, en la Ecuación

3. Los valores resultantes se presentan en la Tabla 14:

Costo unitario Planta 50 L/s	Costo unitario Planta 500 L/s
\$2,38	\$1,91

Tabla 14: Valor actual neto de ambas plantas desaladoras. Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Para comparar los valores unitarios obtenidos en el desarrollo del proyecto, se usa la Ecuación 11.

$$Valor\ porcentual = \frac{Costo\ unitario\ Planta\ 50 - Costo\ unitario\ Planta\ 500}{Costo\ unitario\ Planta\ 500} \times 100 \quad (11)$$

Usando los datos presentes en la Tabla 4 en la Ecuación 11, se obtiene que el costo unitario de inversión de la planta de 500 L/s tiene un costo unitario menor en un 60,86% con respecto a la planta de 50 L/s.

Al comparar los costos unitarios de operación presentes en la Tabla 12 y la Tabla 13, utilizando la Ecuación 11, se obtiene que la planta de 500 L/s tiene un costo unitario menor en un 15,22% con respecto a la planta de 50 L/s.

Finalmente, al comparar los costos unitarios de producción presentes en la Tabla 14, utilizando la Ecuación 11, se obtiene que la planta de 500 L/s tiene un costo unitario de producción menor en un 24,85% con respecto a la planta de 50 L/s.

Sensibilidad:

Para realizar un análisis de sensibilidad equiparable entre los distintos parámetros, se utilizó el rango de precisión esperado de la Imagen 20, obteniéndose la Imagen 23 y la Imagen 24:

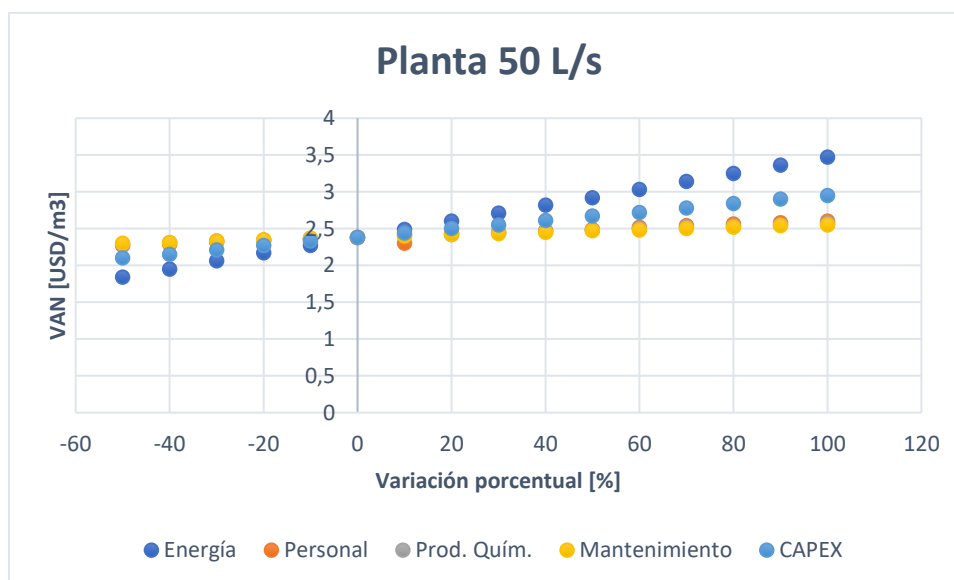


Imagen 23: Análisis de sensibilidad para la planta desaladora de 50 L/s. Fuente: Elaboración propia.

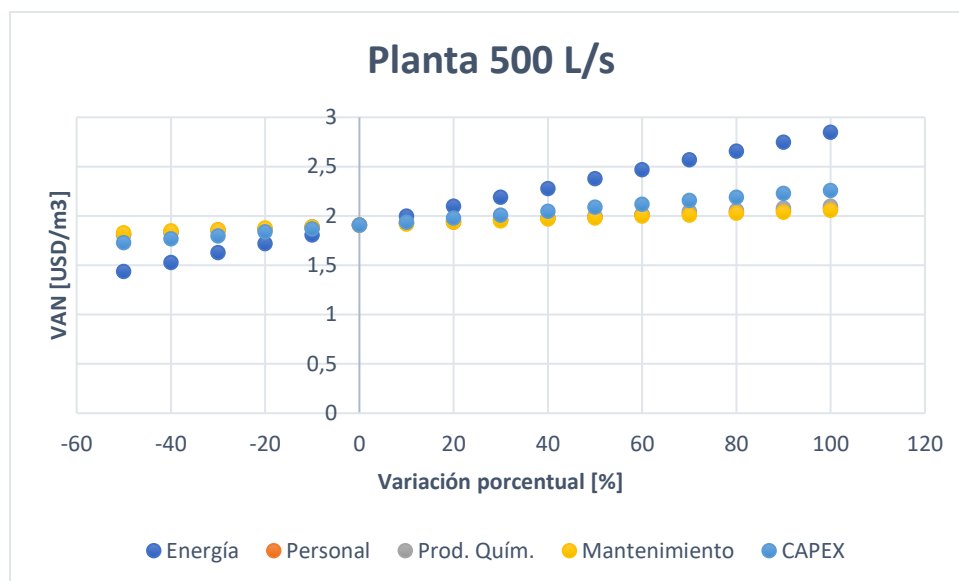


Imagen 24: Análisis de sensibilidad para la planta desaladora de 500 L/s. Fuente: Elaboración propia.

Se logra apreciar que en ambas imágenes es el precio de la energía el factor que más incide en el costo unitario de producción, seguido de cerca por el costo de inversión. A su vez, las variaciones en los precios de personal, productos químicos y mantenimiento muestran una repercusión mínima en el valor unitario actual en ambas plantas.

Discusión:

Para iniciar la discusión, se analiza la ubicación del proyecto seleccionado en el ANEXO 2, el cual corresponde a la Central Termoeléctrica Mejillones 1 y 2, de propiedad de ENGIE. Esta elección se estableció a partir del criterio de planificación de cierre de la termoeléctrica y plan de reconversión, la cual no contaba. La elección de este punto requiere un análisis más profundo, ya que se hizo considerando toda la construcción de nuevo, sin tomar en cuenta la posible infraestructura que puede ser reutilizada. Paralelamente, se asume el uso de concesiones marítimas vigentes de la industria, la cual no es del todo exacto, ya que requiere procesos de tramitación nuevos en el SEA, los cuales son más cortos, pero no por eso son instantáneos. De todas maneras, es una potencial zona de ubicación real de una planta desaladora, que con un análisis más profundo puede ahorrar de costos, tiempo y una disminución en el impacto ambiental en la zona.

En relación con el balance hídrico efectuado y detallado en el ANEXO 2, que incluye la caracterización de la zona, así como la oferta y la demanda, no se ha identificado un consumidor a gran escala que pueda beneficiarse directamente del proyecto. En cuanto al consumo humano en Mejillones, Aguas

Antofagasta ya ha planificado su capacidad para el futuro, y las demás industrias cuentan con sus propias plantas desalinizadoras. Además, la industria minera, al prever un aumento en el consumo de agua, opta por instalar sus propias plantas, aprovechando las concesiones mineras. Aunque podría haber una demanda por parte de asociaciones o industrias más pequeñas que, en conjunto, harían viable la expansión del proyecto, este escenario requeriría un análisis más detallado, que está fuera del alcance de este estudio.

En relación con el dimensionamiento de ambas plantas, se llevó a cabo un análisis inicial de los componentes detallados en el ANEXO 3 para determinar su relevancia en cada etapa del proceso. Posteriormente, se seleccionó la configuración más apropiada para cada planta, buscando que fueran lo más similares posible. Sin embargo, se reconoció que en algunos componentes esto no era factible debido a las diferencias en la magnitud de la producción. Este fue el caso de la toma de agua y el pretratamiento granular medio, donde la toma de agua estaba limitada por la superficie requerida y el pretratamiento se seleccionó de acuerdo con el componente óptimo para cada planta.

A pesar de estas variaciones, todos los demás componentes se mantuvieron iguales y se compararon con especificaciones técnicas de empresas reales, proporcionadas en guías de diseño de plantas desalinizadoras. Es importante destacar que, dado que el proyecto se encuentra en la etapa de prefactibilidad, no se realizó un balance de planta, lo que podría resultar en ajustes en algunos componentes para optimizar el proceso en etapas posteriores.

Desde el punto de vista de los resultados, los valores obtenidos en la Tabla 3 fueron basados en datos de la literatura y proyectos chilenos de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. La aproximación exponencial se derivó de la literatura y se validó empíricamente con dos proyectos en el norte de Chile (Tabla 6), obteniendo un empírico exponencial igual a 0,81.

Para respaldar estos valores, se realiza una comparación con la Imagen 25 de la consultora CDM Smith. Ambos valores se encuentran dentro de los rangos proporcionados por la empresa. La planta desalinizadora de 50 L/s se alinea más con las proyecciones de valor alto (línea naranja), mientras que la planta de 500 L/s se acerca a las proyecciones de valor bajo (línea azul). Esta variación puede deberse a que la consultora proyecta un comportamiento lineal en los costos de inversión de la planta desaladora, mientras que la ecuación en la Imagen 25 se exhibe un comportamiento exponencial, siendo más precisa para reflejar los efectos de las economías de escala en este tipo de proyectos.

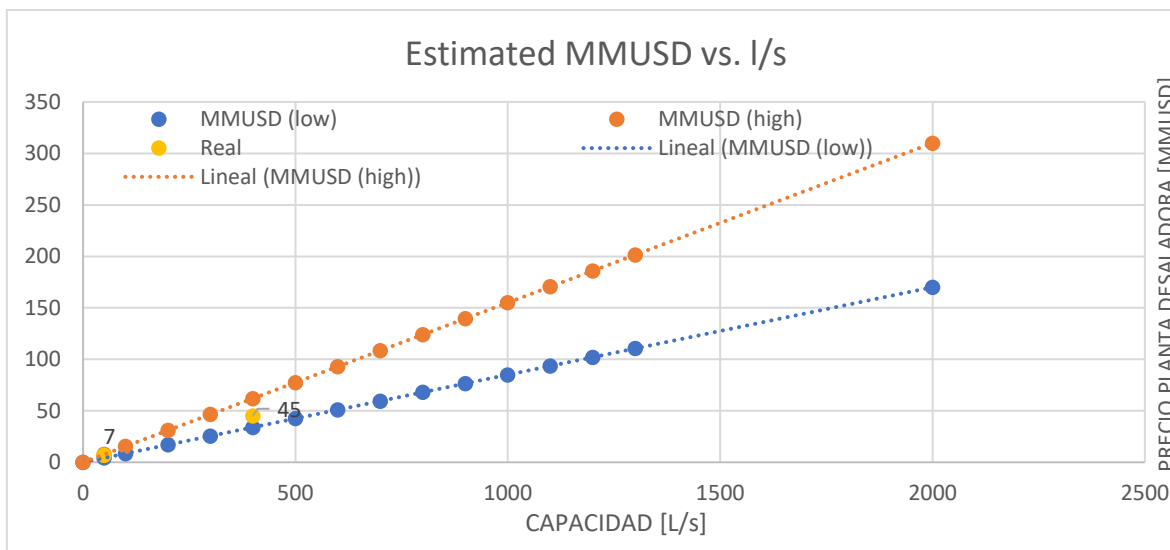


Imagen 25: Costo de inversión de plantas desaladoras en función de la capacidad productiva. Fuente: CDM Smith.

Al analizar la distribución de los costos de inversión entre ambas plantas (Imagen 26 e Imagen 27), se observa una gran similitud, aunque con una proporción mayor para la Planta desaladora, las obras marinas y la Planta de Elevación de Agua de Mar en la instalación de 500 L/s en comparación con la de 50 L/s. Esta disparidad se debe a una diferencia de 257.909 USD en los costos de inversión asociados a ambas impulsiones, los estanques y la descarga. Sin embargo, este monto representa menos del 3,5% de los costos totales de la planta de 50 L/s y menos del 1% en la planta de 500 L/s, por lo que se considera un valor prácticamente fijo en ambos casos.

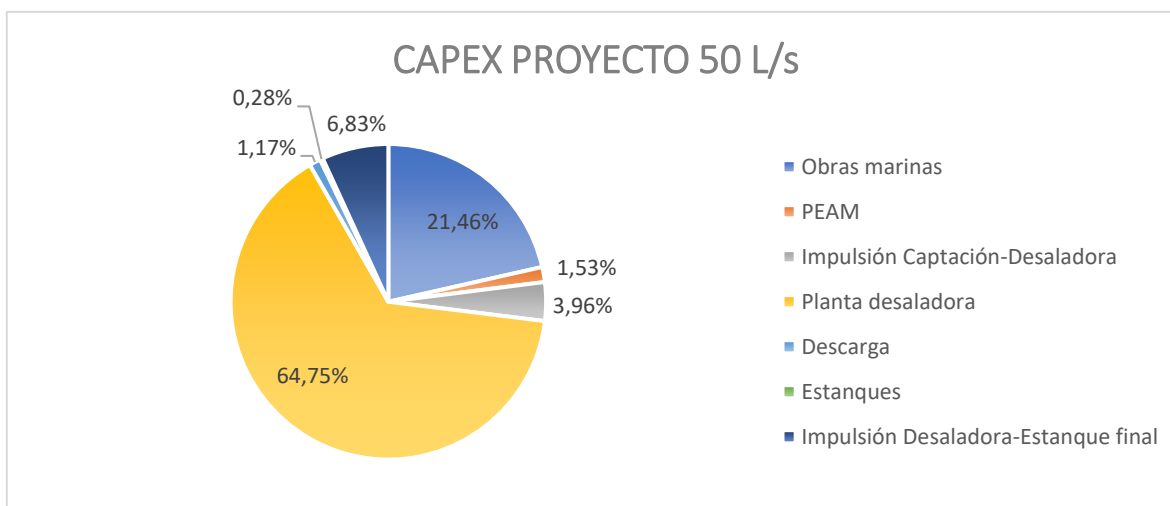


Imagen 26: Distribución de los costos de inversión de la planta desaladora de 50 L/s. Fuente: Elaboración propia.

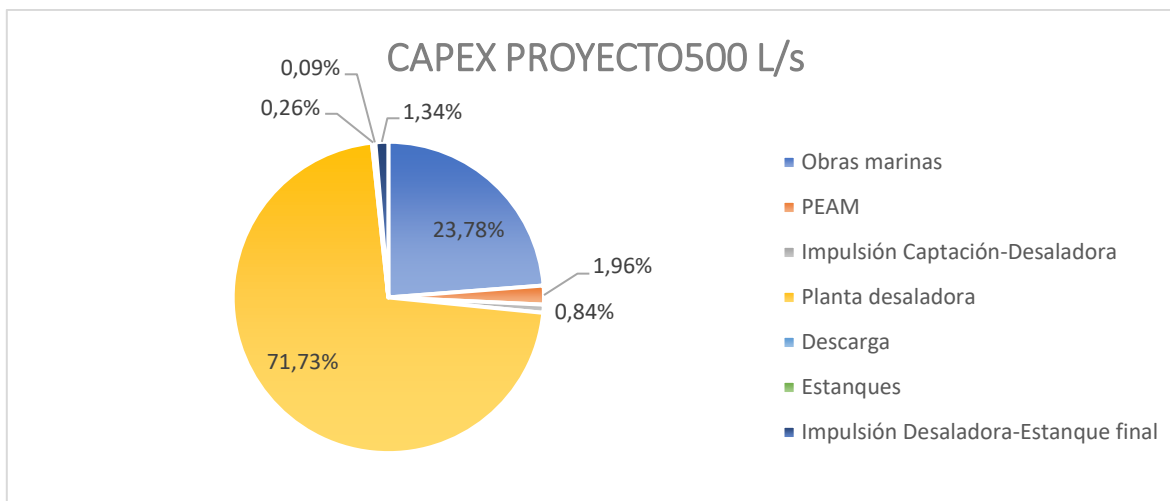


Imagen 27: Distribución de los costos de inversión de la planta desaladora de 50 L/s. Fuente: Elaboración propia.

Para examinar los costos de operación de ambas plantas, se realiza una comparación con la literatura en relación con la distribución de estos costos (Imagen 28). Dado que los costos fijos no están dentro del alcance de este informe, se efectúa una nueva ponderación de los costos de operación de la planta desaladora, asumiendo la proporción sugerida por el autor. Al mismo tiempo, se fusiona el reemplazo de las membranas con los costos de productos químicos, dando origen a la Tabla 15 y la Imagen 29:

	Brackish water(%)	Seawater(%)
Fixed costs	54	37
Electric power	11	44
Labor	9	4
Membrane-replacement	7	5
Maintenance and parts	9	7
Consumables (chemicals)	10	3

Imagen 28: Distribución de costos de operación según la literatura. Fuente: (Wittholz et al., 2008).

Costos	Proporción
Energía	69,84%
Personal	6,35%
Mantenimiento	11.11%
Productos químicos.	12,70%

Tabla 15: Distribución de los costos de operación, eliminando los costos fijos de la Imagen 28. Fuente: Elaboración propia.

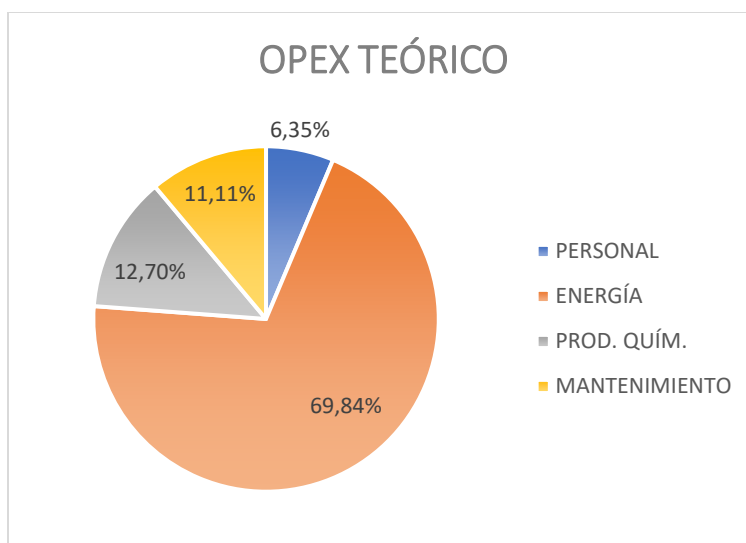


Imagen 29: Distribución de los costos de operación de literatura modificada. Fuente: Tabla 15.

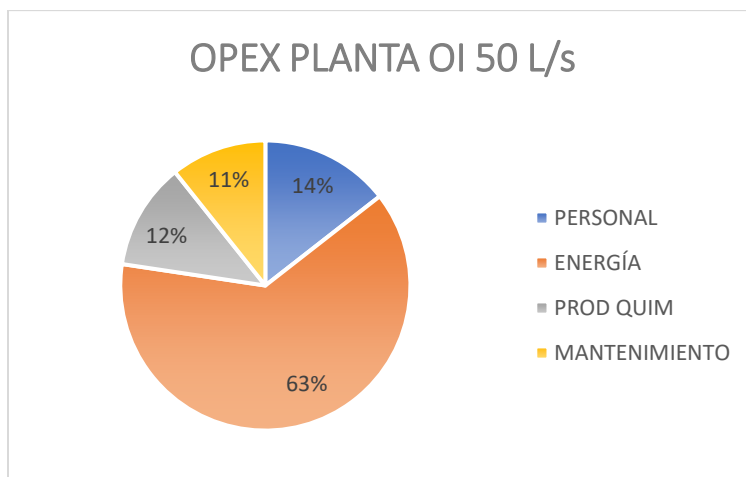


Imagen 30: Distribución de los costos operacionales de la planta desaladora de 50 L/s. Fuente: Tabla 12.

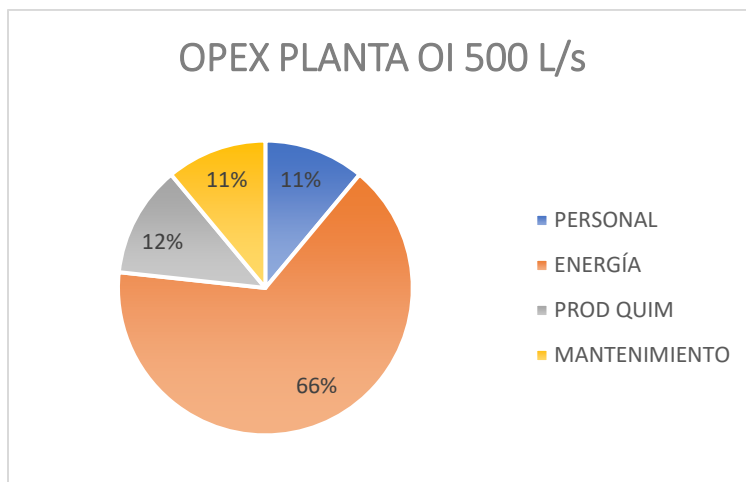


Imagen 31: Distribución de los costos operacionales de la planta desaladora de 500 L/s. Fuente: Tabla 13.

Al comparar la Imagen 29 con la Imagen 30 e Imagen 31, se observa una distribución de costos bastante similar, especialmente en lo que respecta a los costos de productos químicos y mantenimiento. Las principales disparidades surgen en los costos asociados al personal y la energía, aspectos más desafiantes de asimilar debido a las diferencias salariales entre los estudios y la realidad chilena. Este desafío también se presenta en el caso de la energía, cuyo precio varía según el país y la época, dificultando una coincidencia perfecta. A pesar de estas variaciones, la distribución general de los costos muestra una notable similitud.

Posteriormente, al comparar la Imagen 32 con la Imagen 33, se puede ver que la distribución de los costos de operación es prácticamente igual. Esto se debe a que fueron realizadas por proyecciones internas de CDM Smith, en donde existe una proporción lineal en varios de los gastos operacionales. Al comparar con los valores con literatura, la se ve que el costo de la energía puede representar hasta el 75% del costo operativo, dependiendo del costo de la electricidad (Farooque et al, 2008) por lo que se encuentra dentro del rango esperado para el proyecto.

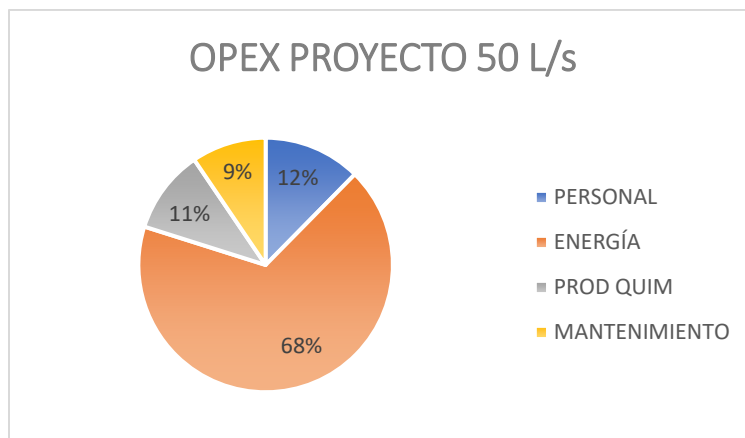


Imagen 32: Distribución de los costos operacionales del proyecto de 50 L/s. Fuente: Tabla 12

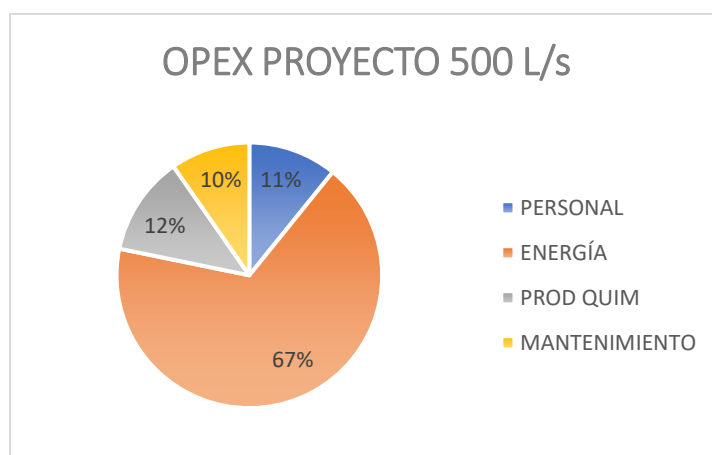


Imagen 33: Distribución de los costos operacionales de la planta desaladora de 500 L/s. Fuente: Tabla 13.

Al examinar detenidamente el ANEXO 7, se evidencia que la construcción de una planta desalinizadora capaz de abastecer toda la demanda presenta un impacto ambiental inferior en comparación con la implementación de pequeñas plantas destinadas a cubrir dicha demanda de manera fragmentada. Este fenómeno se refleja especialmente en la huella de carbono generada durante la construcción de cada planta, siendo este un factor determinante en la disparidad entre ambos enfoques para satisfacer la demanda hídrica. Además, el consumo eléctrico, que disminuye de manera no lineal en proporción al tamaño de la planta, también contribuye a la reducción de la huella de carbono.

Cabe mencionar que este análisis se basa en la información proporcionada por literatura especializada en la medición del impacto ambiental de las plantas desalinizadoras. No obstante, se realizaron ciertos supuestos generalizados al calcular la huella de carbono, como la linealidad entre materiales y el uso de los mismos vehículos de transporte, aspectos que podrían influir en la

variación de la huella final. A pesar de estos supuestos, este ejercicio resulta valioso y necesario para evaluar el impacto ambiental, especialmente en una zona tan compleja como Mejillones, catalogada como una de las cinco zonas de sacrificio en Chile.

Finalmente, en el Anexo 8 se lleva a cabo un análisis financiero, sugiriendo la adopción de un precio unitario del agua de 4,19 dólares por metro cúbico para la planta de 50 L/s y de 3,30 dólares por metro cúbico para la planta de 500 L/s. Este ajuste resulta en TIR y VAN positivos en ambas instancias. El análisis financiero se basó en valores del mercado global del agua, y los resultados se sitúan dentro de los rangos anticipados para la industria en Chile. Se recomienda una evaluación más detallada de la descomposición de estos valores para adecuarlos a la realidad del mercado chileno.

Conclusiones

En primer lugar, la elección de la Central Termoeléctrica Mejillones 1 y 2 se presenta como una opción prometedora debido a la infraestructura ya existente y las concesiones marítimas que ya posee, superando la capacidad de toma de agua requerida para ambos proyectos. No obstante, se necesita realizar un análisis más detallado para determinar qué parte de la infraestructura puede ser reutilizada y qué permisos son necesarios para el cambio de uso de las concesiones marítimas.

En relación con el balance hídrico, no se identificaron consumidores finales que pudieran aprovechar la implementación de la planta desaladora para satisfacer su demanda. La proyección de aumento en la capacidad de la planta de Aguas Antofagasta ya contempla la proyección del consumo humano, y las industrias cuentan con sus propias plantas desaladoras o son empresas mineras que, gracias a sus concesiones mineras, pueden erigir plantas desaladoras de manera más expedita. Sin embargo, se requiere un análisis más exhaustivo para determinar si existen pequeños consumidores cuya demanda conjunta pueda resultar significativa para el proyecto.

En cuanto a la configuración de ambas plantas, se sigue el planteamiento inicial de buscar la comparación entre dos plantas con la mayor cantidad posible de componentes similares, a fin de lograr una comparación más significativa. No obstante, algunos componentes no pudieron ser idénticos debido a la disparidad en las capacidades. La disposición de la planta de 50 L/s, con Wide Wedge Screen, seguido de DAF, sistema de filtro a presión, cartuchos y, finalmente, osmosis inversa, guarda una similitud considerable con la configuración de 500 L/s, que incorpora Coarse bar, Drum Screen, DAF, sistema de filtro granular medio por gravedad, cartuchos y, posteriormente, osmosis inversa. Aunque estas configuraciones se basan en literatura y proyectos similares, se reconoce la

necesidad de realizar un análisis más profundo para determinar el balance de planta y lograr una configuración óptima del proyecto, lo que podría implicar variaciones en algunos componentes.

Respecto a los objetivos específicos establecidos anteriormente, estos se cumplen en su totalidad. El costo unitario de inversión se reduce en un 60,86%. Asimismo, el costo unitario de producción experimenta una disminución del 15,22%, cumpliendo con las metas propuestas. En lo que respecta al objetivo general, que se traduce en la reducción del valor unitario total del proyecto, se registra una disminución notable del 24,85%.

Este efecto en el valor actual unitario es dado principalmente por las economías de escala existente en las Obras marinas, la Planta desaladora y la Planta de impulsión de agua de mar, en lo que respecta a los costos de inversión, ya que los otros costos se asumen como costos fijos debido a que representan un valor menor al 3,5% en ambos casos.

En cuanto a los costos de operación, se destaca que el factor predominante es el precio de la energía, representando aproximadamente el 70% en ambas plantas. No obstante, es crucial señalar que la energía necesaria para la planta de 500 L/s no es diez veces superior a la requerida para la planta de 50 L/s. Esta disparidad en los niveles de consumo de energía contribuye a la variación observada en los valores unitarios, como se detalla en la Tabla 12 y Tabla 13.

En el análisis de sensibilidad, se concluye que el componente que ejerce la mayor influencia en el precio final del costo unitario de cada planta es la energía, superando incluso a los costos de inversión en todas las variaciones porcentuales consideradas. Esto resalta la importancia crítica, en proyectos de esta índole, de asegurar el suministro de energía a un costo óptimo a lo largo de su vida útil.

Paralelamente, se determina un precio unitario a través de un análisis financiero de ambas plantas, resultando en un valor de 4,19 dólares por metro cúbico de agua para la planta de 50 L/s y 3,30 dólares por metro cúbico de agua para la planta de 500 L/s. Aunque estos valores se sitúan dentro de las expectativas del mercado chileno, se sugiere llevar a cabo un análisis financiero más exhaustivo para una comprensión más completa y precisa.

Este informe resalta la viabilidad del sobredimensionamiento de la planta tanto desde una perspectiva económica, con una notable reducción en los costos unitarios, como desde el punto de vista medioambiental y social. Considerando que Mejillones es una de las cinco zonas de sacrificio

en Chile, cualquier nueva instalación industrial debe minimizar su impacto ambiental o, idealmente, contribuir de manera positiva a la región. En el ANEXO 7 se evidenció una diferencia significativa en el impacto ambiental, medido a través de la huella de carbono, influenciada principalmente por el impacto de las construcciones y la variabilidad en el consumo energético durante la operación.

Finalmente, se sugiere llevar a cabo una evaluación para determinar la viabilidad de alimentar la planta desaladora mediante energía solar en conjunto con baterías o mediante una combinación de energía solar y Acuerdos de Compra de Energía (PPA, por sus siglas en inglés). Esto adquiere especial relevancia en caso de que se contemple la exportación de hidrógeno verde y/o sus derivados a Europa, debido a que esta estrategia se alinea con las certificaciones establecidas en los actos delegados RED II, que imponen requisitos estrictos para garantizar la sostenibilidad integral del proceso, abarcando incluso la procedencia de la electricidad utilizada en la desalinización.

Referencias:

- ACADES. (2023). (s. f.). *Consejo Minero, ACADES y C4: presentan el primer Catastro Nacional de plantas y proyectos de desalinización en Chile*. ACADES.
<https://www.acades.cl/consejo-minero-acades-y-c4-presentan-el-primer-catastro-nacional-de-plantas-y-proyectos-de-desalinizacion-en-chile/>
- Ameen, F., Stagner, J., & Ting, D. S. (2017). The Carbon Footprint and Environmental Impact Assessment of desalination. *International Journal of Environmental Studies*, 75(1), 45-58. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1389567>
- Aquaterra Ingenieros LTDA, Unión temporal de proveedores Hídrica Spa. (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas.
- Bonilla, E., Venera R. (2017). Diseño de una Planta Desalinizadora de Agua de Mar Para la Isla de San Andrés.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10236/EdwinBonilla-RonaldVenera-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Centro de ecología aplicada. (2018). *Diagnóstico y monitoreo ambiental de la bahía Mejillones del Sur-Informe final*. Ministerio de Medio Ambiente.
https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/06/01-2019_06_GOA001_INF_CO_V1_IF_c0.0_Tapa.pdf
- Chertock, S. K. L. S. M. (s. f.). *25 countries, housing one-quarter of the population, face extremely high water stress*. World Resources Institute.
<https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countriesc>

Cochilco. (2021). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre.

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe%20proyeccion%20consumo%20agua%202020-2032%20rpi.pdf>

Dow Water. (2023). FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual.

<https://www.filterwater.com/docs/filmtec/dow-filmtec-ro-membranes-technical-manual-609416.pdf>

Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A.

(2020). Environmental Impact of Desalination Technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748, 141528.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>

Farooque, A. M., Jamaluddin, A. T. M., Al-Reweli, A., Jalaluddin, P., Al-Marwani, S. M.,

Al-Mobayed, A., & Qasim, A. (2008). Parametric analyses of energy consumption and losses in SWCC SWRO plants utilizing energy recovery devices. *Desalination*, 219(1-3), 137-159. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.004>

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). Reverse

osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317-2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>

Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M., & Nazal, M. K. (2021). Desalination and

Environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. *Science of The Total Environment*, 780, 146585.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>

Kim, J., Park, K. H., Yang, D. R., & Hong, S. (2019). A Comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied Energy*, 254,

113652. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113652>

- Kucera, J. (2010). *Reverse osmosis*. <https://doi.org/10.1002/9780470882634>
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- Liu, J., Chen, S., Wang, H., & Chen, X. (2015). Calculation of carbon footprints for water diversion and desalination projects. *Energy Procedia*, 75, 2483-2494.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.239>
- Machey, E.D., Pozos N., Wendle J., Seacord T., Hunt H., Mayer D. (2011). Assessing Seawater Intake Systems for Desalination Plants. Denver, Colorado: Water Research Foundation.
- Ministerio de Energía, (2015). *Propuesta de regulación ambiental para sistemas de refrigeración de centrales termoeléctricas y otros sectores que succionan agua y descargan cursos de agua en sus procesos industriales*.
<https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/590>
- Missimer, T. M., Ghaffour, N., Dehwah, A. H., Rachman, R., Maliva, R. G., & Amy, G. L. (2013). Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: capacity limitation, water quality improvement, and economics. *Desalination*, 322, 37-51.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.021>
- Pankratz, T. (2015). Overview of intake systems for seawater reverse osmosis facilities. En *Environmental science and engineering* (pp. 3-17). https://doi.org/10.1007/978-3-319-13203-7_1
- Rodríguez-Rojas, F., López-Marras, A., Celis-Plá, P. S. M., Muñoz, P. T., García-Bartolomei, E., Valenzuela, F., Orrego, R., Carratalá, A., Sánchez-Lizaso, J. L., & Sáez, C. A. (2020). Ecophysiological and cellular stress responses in the

cosmopolitan brown macroalga ectocarpus as biomonitoring tools for assessing desalination brine impacts. *Desalination*, 489, 114527.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114527>

Servicio de Evaluación Ambiental, 2023. Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.

Tate P., Scaturro S., Cathers B. (2016). Marine Outfalls. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_32.

Vásquez, R. (2023,). *Conceptualización de un proyecto integral de agua y energía para diferentes usos finales*. 4e Chile. <https://4echile.cl/proyectos/conceptualizacion-de-un-proyecto-integral-de-agua-y-energia-para-diferentes-usos-finales/>

Vásquez, R., Salinas, F., (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile. 4e Chile. <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf>

Vicuña S., Farías L., González H., Marquet P., Palma-Behnke R., Stehr A., Urquiza A., Wagemann E., Arenas-Herrera M., Bórquez R., Cornejo-Ponce L., Delgado V., Etcheberry G., Fragkou M., Fuster R., Gelcich S., Melo O., Monsalve T., Winckler p. (2022). Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Voutchkov, N., Jacangelo, J. G., Badruzzaman, M., & Weinrich, L. A. (s. f.). *Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis: Existing Plant Performance and Selection Guidance*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31363.14889>

Vukasovic V., Carreño R. (2023). Desalinización de Agua de mar y Reutilización de Aguas de Desecho para la Producción de Hidrógeno Verde y Derivados en Chile. 4e Chile.

<https://h2lac.org/archivos/desalinizacion-de-agua-de-mar-y-reutilizacion-de-aguas-de-desecho-para-la-produccion-de-h2v-y-derivados-en-chile/>

Wittholz, M. K., O'Neill, B. K., Colby, C., & Lewis, D. M. (2008). Estimating the cost of desalination plants using a cost database. *Desalination*, 229(1-3), 10-20.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.023>

Woods, P., Bustamante, H., & Aguey-Zinsou, K. (2022). The hydrogen economy - where is the water? *Energy nexus*, 7, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>

Anexo

ANEXO 1:

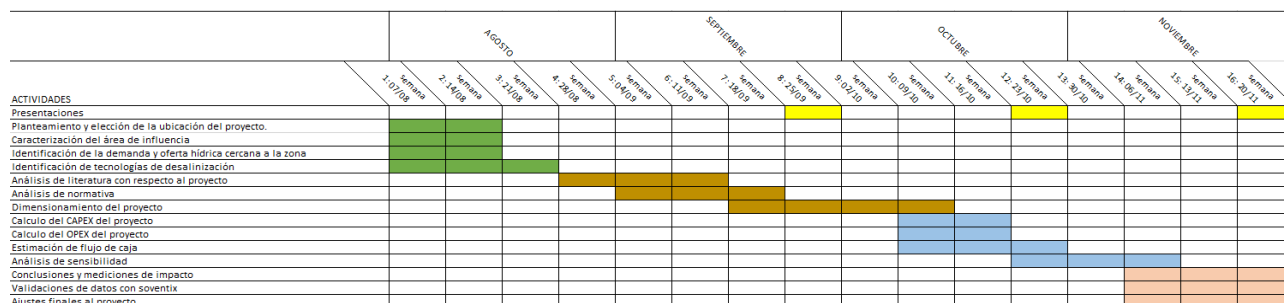


Imagen 34: Carta Gantt del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2:

Ubicación del proyecto:

Para establecer potenciales ubicaciones de la planta desaladora, se asume la transformación de una central termoeléctrica presente en la ciudad de Mejillones. Esto debido a que estas empresas cuentan con concesiones marítimas. Es muy importante destacar que estas concesiones poseen una gran incertidumbre respecto de los plazos que se toma la autoridad para resolver sus solicitudes. No hay claridad del procedimiento que conlleva su autorización ni plazos precisos, más allá de los requerimientos de ingreso y formalidades que debe cumplir la solicitud de concesión, además de ciertos informes que son requeridos. Por lo anterior, la tramitación habitual, de acuerdo con la información recabada, puede durar en promedio entre 3 y 4 años de acuerdo con la información recabada con los entrevistados, existiendo casos en que ha tardado incluso hasta 7 años (Vukasovic & Carreño, 2023).

Por lo señalado anteriormente, se analizó el programa de descarbonización de Chile para alcanzar la carbono neutralidad del año 2050, en donde está proyectado el cierre de 28 centrales termoeléctricas para el año 2040. Los principales criterios de selección de la ubicación de la planta desalinizadora son el año de compromiso de cierre de la planta y que esta no tenga planes de reconversión.

Planta	Compromiso de cierre	Reconversión	Dueño
Mejillones CTM1	dic-24	Cierre	Engie
Mejillones CTM2	sept-24	Cierre	Engie
ANGAMOS ANG1	sept-29	Batería de Carnot	AES
ANGAMOS ANG2	sept-29	Batería de Carnot	AES
COCHRANE CCH1	SIN FECHA DE CIERRE	Sin anuncio	AES
COCHRANE CCH2	SIN FECHA DE CIERRE	Sin anuncio	AES
HORNITOS CTH1	dic-25	Biomasa	Engie
IE1	dic-25	Reconversión a gas	Engie
ANDINA CTA	dic-25	Biomasa	Engie

Tabla 16: Cronograma de cierre de termoeléctricas a carbón en Chile. Fuente: Chile sustentable.

Al realizar un análisis de la Tabla 16, se selecciona como ubicación de la planta desalinizadora la planta Mejillones CTM1 y CTM2 (Imagen 35), debido a la cercanía de la fecha de su compromiso de cierre y a que no presenta ningún plan de reconversión. Estas plantas poseen una toma de agua común con una concesión marítima de 6000 metros cúbicos hora (1666.67 litros por segundo), lo que excede con creces ambos proyectos a realizar.



Imagen 35: Mapa georreferencial de la planta desalinizadora y el Parque industrial. Fuente: elaboración propia.

Caracterización del área de influencia:

Para la definición del área de influencia, el cual se define como “área o espacio geográfico, cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el proyecto o actividad genera o presenta alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias”, se utiliza la zona definida en la “Caracterización del Medio Humano” presentado al SEA para la aprobación del Proyecto Alba. Esta selección del proyecto se debe a su cercanía geográfica con el futuro Parque Industrial en Mejillones y además de presentar una dimensión de proyecto similar a la propuesta en este informe. Se le incorpora al área de influencia las 885 hectáreas proyectadas para la construcción del parque industrial, obteniéndose la Imagen 36.

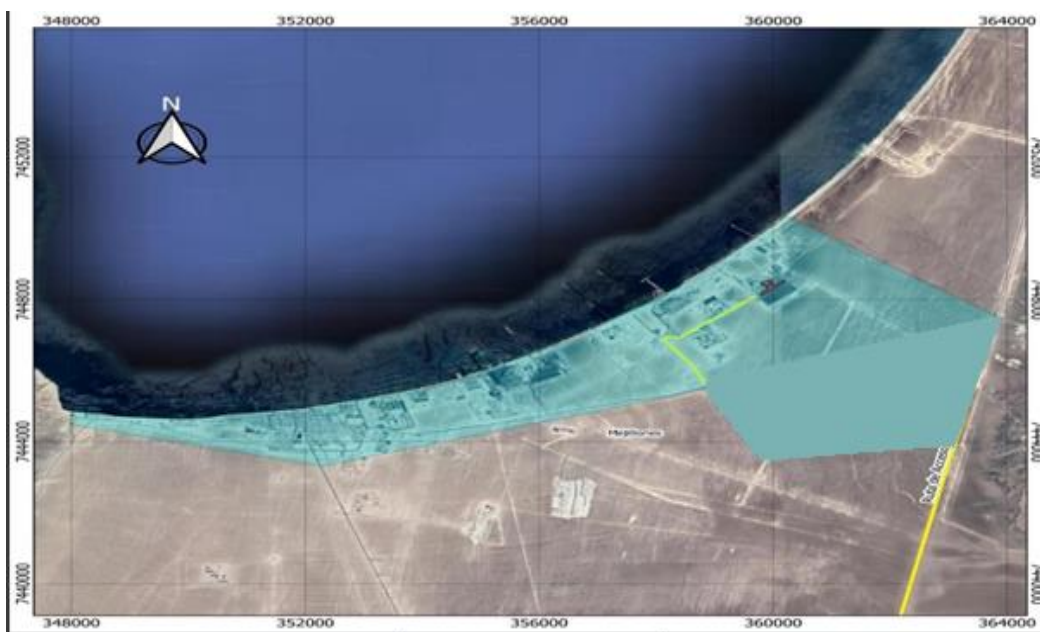


Imagen 36: Área de influencia del Proyecto Alba. Fuente: SEA.

Paralelamente, para identificar los sitios de interés ambiental, se utilizó el área de estudio elaborado por BHP en su informe “Análisis Situacional de los Recursos Hídricos: Bahía de Mejillones, Antofagasta” [Imagen 37], la cual muestra los bienes ambientales y las Áreas marinas protegidas. El proyecto no se encuentra dentro de ninguna de las áreas previamente señaladas.

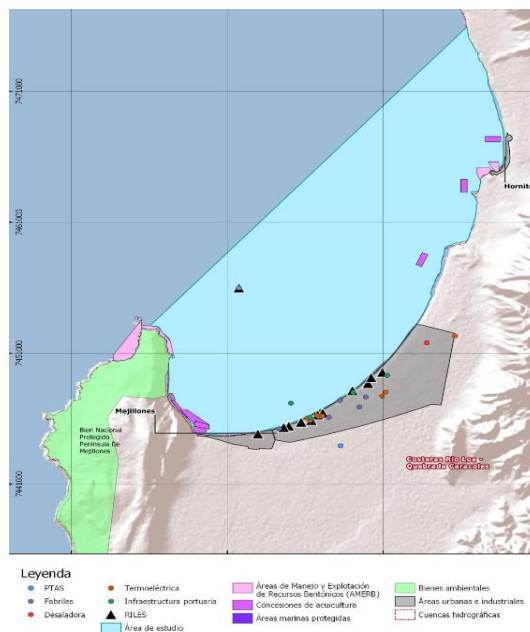


Imagen 37: Mapa área de estudio Bahía de Mejillones. Fuente: BHP.

De acuerdo con la información obtenida en el Plan de Desarrollo Comunal de Mejillones 2008-2018 (En adelante PLADECO 2008-2018), las características geológicas y geomorfológicas son las del desierto costero chileno, encontrándose incluido en la zona de potencial sísmico. Existe, además, un déficit o carencia de agua que determina las condiciones de extrema aridez que presenta el clima del territorio. Debido a las características de desierto semiárido se imposibilita la aparición de cursos de agua superficiales.

El uso del territorio actual de la ciudad de Mejillones se encuentra vinculado a un área industrial y portuaria en conjunto a un uso residencial, comercial y de servicios. Ambas áreas se encuentran distantes, no obstante, se identifica una dinámica permanente entre ambos sectores asociado al uso de los servicios básicos y comercio y a la disposición de puestos de empleo (Crea futuro, 2023).

Según la información obtenida en el Sistema Integrado de Información de la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI) no se registran organizaciones ni asociaciones indígenas constituidas en la ciudad de Mejillones.

Demanda hídrica:

Con respecto a la demanda hídrica de la zona, esta se abastece según la Imagen 38:

Tabla 17. Origen del Agua de las viviendas del área de influencia, ciudad de Mejillones.

Origen del Agua	Casos	%
Red pública	2.611	90,8%
Pozo o noria	2	0,1%
Camión aljibe	260	9,0%
Río, vertiente, estero, canal, lago, etc.	1	0,0%
Total	2.874	100%

Fuente: Elaboración propia en base a datos Censo 2017.

Imagen 38: Origen del agua de las viviendas en la ciudad de Mejillones. Fuente: (Crea futuro, 2023).

Para la proyección de la demanda futura de Mejillones, se va a utilizar la “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos de Chile” realizado por la unión temporal de proveedores hídrica Consultores Spa y Aquaterra ingenieros LTDA los cuales presentaron en la siguiente imagen:

Cuadro 4.3-1 Resumen Demanda Hídrica - II Región de Antofagasta

	Demanda (Mm³/año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	38.705	44.480	49.085
Agua Potable Rural	481	569	577
Agrícola	46.230	42.315	42.395
Pecuario	102	146	177
Minero	151.072	99.566	75.990
Industrial	29.563	48.836	59.700
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	266.153	235.912	227.924
Acuícola	0	0	0
Generación Eléctrica	5.397	8.353	8.790
TOTAL NO CONSUNTIVO	5.397	8.353	8.790
Secano	4.879.423	5.282.348	5.281.119
Forestal (Productivo)	1.347	1.374	1.376
Forestal (No Productivo)	372.537	372.550	372.551
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	5.253.307	5.656.272	5.655.045

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 39: Proyecciones de demanda de la región de Antofagasta. Fuente: (Aquaterra Ingenieros LTDA, 2017).

De esta información se destaca el uso del agua potable urbano, en donde se aprecia un aumento de un 27%, el cual está asociado al crecimiento urbano en la región. Mientras que en el caso de la demanda de agua potable rural el aumento entre 2015 y 2040 es de un 20%. La demanda agrícola disminuye levemente. La demanda minera disminuye drásticamente (50%), y las razones debiesen ser por un aumento en las eficiencias en los procesos de extracción del material. La demanda

industrial aumenta en un 102% en 25 años, principalmente asociado a las industrias Enaex y Corpesca (Planta Mejillones) (Aquaterra Ingenieros LTDA, 2017).

Con respecto al consumo de agua del proyecto, cada planta requiere un consumo de 50 L/s de agua para producir 2000 toneladas de amoníaco por año, esta capacidad está dada por las especificaciones técnicas del electrolizador a utilizar. Se asume la instalación de 10 plantas productoras de hidrógeno y sus derivados de la misma magnitud en el Parque industrial, todas con dueños distintos.

Oferta hídrica:

La ciudad de Mejillones en la actualidad es abastecida de agua potable por Aguas Antofagasta, cuyo origen en su totalidad es la Planta Desaladora Norte, ubicada en la región de Antofagasta. Actualmente la planta tiene una capacidad instalada de 1.071 L/s para abastecer el 85% de la demanda potable de Antofagasta y el 100% de la demanda potable de Mejillones. Sin embargo, aprobada la ampliación de la planta a 1.629 L/s, la cual tiene la capacidad de abastecer a 321.059 usuarios, lo que satisface con creces las proyecciones vistas en la Imagen 39.

De forma complementaria se establece un listado con todas las plantas desalinizadoras de la Región:

PLANTA DESALINIZADORA	SECTOR	CAPACIDAD [L/s]	ESTADO
DESALADORA TOCOPILLA	AGUA POTABLE	75	EN OPERACIÓN
DISTRITO MINERO CENTINELA I Y II	MINERÍA	140	CON EVALUACIÓN AMBIENTAL APROBADA
TOCOPILLA	INDUSTRIAL	25	EN OPERACIÓN
SPENCE GROWTH OPTION	MINERÍA	1.000	EN OPERACIÓN
CTT TOCOPILLA	INDUSTRIAL	22	EN OPERACIÓN
MEJILLONES	INDUSTRIAL	30	EN OPERACIÓN
DESALADORA DISTRITO NORTE	MINERÍA	1.956	EN OPERACIÓN
ANGAMOS	INDUSTRIAL	56	EN OPERACIÓN
MICHILLA	MINERÍA	70	EN OPERACIÓN
DESALADORA NORTE-ANTOFAGASTA	AGUA POTABLE	1.053	EN OPERACIÓN
MINERA SIERRA GORDA	MINERÍA	63	EN OPERACIÓN
DESALADORA ANTOFAGASTA	AGUA POTABLE	634	EN CONSTRUCCIÓN
DISTRITO CENTINELA (ESPERANZA+EL TESORO)	MINERÍA	50	EN OPERACIÓN
PLANTA EWS Y EWSE	MINERÍA	3.858	EN OPERACIÓN
MEJILLONES	INDUSTRIAL	56	EN OPERACIÓN
CRAMSA	MULTIPROPÓSITO	8.000	ETAPA PRELIMINAR
MINERA ANTUCOYA	MINERÍA	30	EN OPERACIÓN
AMPLIACIÓN ANGAMOS	INDUSTRIAL	158	ETAPA PRELIMINAR

Imagen 40: Catastro de plantas desalinizadoras en la región de Antofagasta. Fuente: ACADES

ANEXO 3:

Componentes de una planta desalinizadora:

1. Captación de agua de mar:

Este sistema tiene como función obtener agua de mar de cierta calidad y cantidad predefinida. Una adecuada selección del sitio y diseño de la toma de entrada son cruciales para asegurar una alimentación de agua constante y de calidad homogénea. Entre las recomendaciones para la selección del emplazamiento es imperativo considerar hábitats y ecosistemas, analizando especialmente la biodiversidad o productividad de eventuales especies sensibles, así como una evaluación de la proximidad de las redes de distribución de agua y de la fuente de agua usada para desalinizar (Ihsanullah et al., 2021).). Como el diseño de la toma de entrada depende en buena medida del sitio seleccionado, esta parte del proceso puede llegar a representar hasta el 35% del costo de un proyecto (Pankratz, 2015).

Existen dos categorías principales para la captación de agua de mar: la captación subterránea y la captación abierta. La primera opción obtiene el agua de un acuífero salino próximo a la costa, mientras que la segunda opción se obtiene agua directamente del mar u otra fuente de agua salina. Para este proyecto se va a realizar la segunda opción, la cual a su vez se divide en captaciones costeras (onshore), las cuales tienen su sistema de captación en la orilla de la costa, o captaciones mar adentro (offshore), cuyos sistemas de captación están ubicados a cientos de metros al interior de la costa. Para la elección de la ubicación del sistema de captación, se toma en consideración lo planteado por la EPA, la cual ha concluido que el solo hecho de situar una toma a más de 240 m de la costa puede reducir los atrapamientos en un 60 a 73% (Pankratz, 2015). Para este proyecto se considera un sistema de captación sería **offshore**.

En el sistema de captación, el terminal de la toma consiste en un vástago vertical que está usualmente protegido con una red gruesa (50-225 mm) y/o con una tapa que controla la velocidad de admisión. El agua que entra en la estructura se bombea a la costa a través de un ducto o túnel –normalmente de concreto, polímeros de fibra reforzada (FRP) (Mackey et al., 2011) o polietileno de alta densidad (HDPE) anclado al fondo marino con estructuras de concreto (Mackey et al., 2011; Pankratz, 2015).

Desde el año 2010 se ha comenzado a indicar una velocidad de captación de agua en los estudios o declaraciones de impacto ambiental para plantas desaladoras (Imagen 41). Aquellos proyectos que declararon una velocidad de captación de agua realizaron la definición tomando como referencia el borde exterior de las rejillas de protección o, simplemente, no definieron claramente el punto de referencia. Lo anterior también indica la necesidad de lograr una mayor estandarización en la definición de dicha métrica. Independiente de ello, las velocidades de captación reportadas en el sistema de evaluación ambiental para plantas desaladoras se encuentran dentro del rango comprendido entre 0,1 y 0,3 m/s (Ministerio de Energía, 2015).

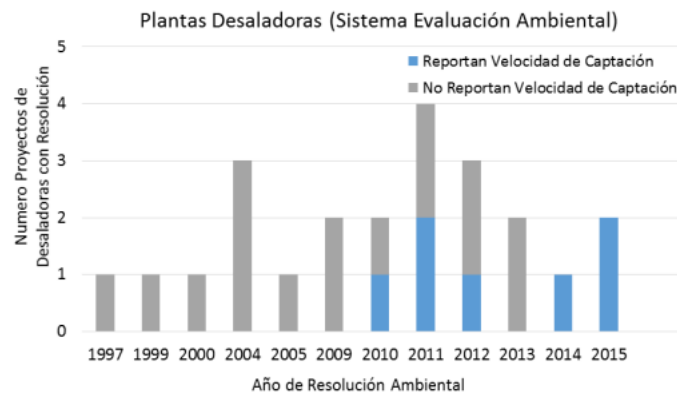


Imagen 41: Distribución de plantas desaladoras en Chile que reportan velocidad de Captación. Fuente: (Ministerio de Energía, 2015).

El agua bombeada desde los terminales de entrada llega después a una cámara de cribado en tierra. Existen diversos montajes para estas cámaras, pero el principio funcional consiste en colocar una red o malla móvil que intercepta el flujo de alimentación, atrapando los materiales que viajan en éste. Las mallas empleadas están montadas en una banda móvil o en un tambor rotatorio (entre 4 y 15 m de diámetro) que avanza lentamente, pasando por un sistema mecánico de limpieza (Vicuña et al., 2022).

2. Pretratamiento:

Proceso que consiste en mejorar la calidad del agua, mediante un tratamiento fisicoquímico. La finalidad de este proceso es remover los sólidos suspendidos y materia orgánica, con el objeto de acondicionar el agua, previo a su paso a través de las membranas de osmosis

inversa. El pretratamiento típicamente adoptado en las desalinizadoras en Chile para el rango de calidad de agua de mar (incluidos eventos extremos como afloramiento de algas), consiste en sistema de coagulación/floculación y flotación por aire disuelto (DAF), filtración con medio granular o membranas seguido de filtración con filtros cartuchos (Vásquez, 2023).

Un adecuado pretratamiento permite incrementar sustancialmente el rendimiento de la planta al mejorar la calidad del agua cruda, contribuyendo a mitigar el ensuciamiento de la membrana. Con ello se mantiene una presión de operación adecuada, lo que representa un consumo de energía y costo bajo (Vicuña et al., 2022). La combinación y dosis precisa de estos compuestos afecta el impacto ambiental de la planta pues estos compuestos se descargan al medio junto con la salmuera (Elsaid et al., 2020).

3. **Osmosis inversa:**

La ósmosis inversa (OI) es una técnica de desmineralización que se basa en una presión aplicada para forzar el paso del agua a través de una membrana semipermeable en el sentido de la corriente. Para forzar el paso del agua a través de una membrana semipermeable en sentido inversa al proceso natural de ósmosis. La fuerza motriz de la ósmosis es la diferencia de presión osmótica a través de la membrana. (La presión osmótica es una función de la concentración de sólidos disueltos; cuanto mayor sea la concentración, mayor será la presión osmótica). El proceso de ósmosis continúa hasta que la concentración de las soluciones a cada lado de la membrana sea la misma. (Kucera, 2023).

Para lograr traspasar las membranas semipermeables, el agua debe bombearse a una alta presión mediante un sistema de bombeo (entre 50 y 70 bares), lo que genera una corriente que logra traspasar la membrana con bajas concentraciones de sales (permeado) y una que es rechazada con altas concentraciones de sales (salmuera). El permeado corresponde al 40-50% del agua que ingresa al sistema de RO, mientras que la salmuera corresponde al porcentaje restante. Las membranas de RO se encuentran al interior de los tubos de presión, los que a su vez se encuentran dentro de los bastidores de osmosis inversa. Generalmente las membranas poseen una configuración de 7-8 por cada tubo, mientras que los bastiones de osmosis inversa pueden contener cientos de tubos de presión, dependiendo del flujo deseado (Vásquez, 2023)

La reducción del consumo de energía constituye una de las principales áreas de investigación en las industrias de procesos de desalinización RO. El costo de la energía en el proceso RO suele representar entre el 30 y el 50% del costo total de producción de agua y puede llegar hasta el 75% del costo de operación, dependiendo del precio de la electricidad. Todas las plantas de RO están equipadas con varios tipos de dispositivos de recuperación de energía, que se utilizan para recuperar la energía que de otro modo se desperdiciaría en el rechazo (Farooque et al., 2008). La corriente de salmuera tiene una alta presión residual (65 bar aproximadamente) y es conducida al sistema de recuperación de energía. Para conseguir reducir el consumo energético del sistema de ósmosis inversa se instala en la corriente de rechazo un sistema de recuperación de energía, el cual está compuesto por un equipo de recuperación de energía y una bomba *booster* (Vásquez, 2023).

Los valores de referencia que han sido publicados para el caso de Chile son de 4,2 (Planta Norte ex-La Chimba) y 4,3 (Planta Coloso) kWh/m³ (Kim et al., 2019), mientras que ACADES (2022) informa un valor de 2,8 kWh/m³ (Desalinizadora de Atacama) (Vicuña et al, 2022).

4. **Postratamiento:**

Este proceso consiste en el acondicionamiento del permeado para obtener las características necesarias para su uso final. En este caso, para el hidrógeno verde se requiere de agua desionizada o “tipo I” presente en la ASTM D1193:

Parámetro	Unidad	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	< 0,056	< 1,0	< 0,25	< 5,0
Resistividad eléctrica	$\text{M}\Omega\text{-cm}$ a 25°C	> 18	> 1,0	> 4,0	> 0,2
Carbono orgánico total (TOC)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 50	< 200	-	-
Sodio (Na)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 1	< 5	< 10	< 50
Cloro (Cl)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 1	< 5	< 10	< 50
Sílice	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 3	< 500	-	-
pH	-	-	-	5 < pH < 8,0	5 < pH < 8,0

Tabla 17: Parámetros de calidad necesarios para el uso de agua en hidrógeno verde. Fuente: ASTM D1193

Sin embargo, para lograr este tipo de pureza se requiere de un proceso adicional de osmosis inversa, además de un proceso posterior de deionización. Para efectos de este estudio, se considerará los procesos anteriormente señalados como parte del proyecto del Parque Industrial, por lo que la calidad del agua esperada va a ser la de una planta desalinizadora de etapa única, cuyos valores en promedio están presentes en la Tabla 18. Esto se justifica producto de que existe en la actualidad electrolizadores que incluye un postratamiento del agua en sus equipos, por lo que incorporar este proceso puede ser redundante.

Parámetros	Unidad	Concentración
Sólidos disueltos totales	mg/L	300 - 500
Cloruro	mg/L	150 – 240
Potasio	mg/L	< 1
Calcio	mg/L	0,3 – 0,5
Magnesio	mg/L	0,4 – 4
Sodio	mg/L	90 – 180
Boro	mg/L	0,7 – 1,5

Tabla 18: Parámetros de calidad de agua promedio de una planta desaladora por osmosis inversa. Fuente: CDM Smith.

5. Descarga del efluente:

Todos los procesos de desalinización producen grandes cantidades de sales concentradas, las cuales pueden estar a alta temperatura, contener residuos de productos químicos de pretratamiento y limpieza, sus (sub)productos de reacción y metales pesados debidos a la corrosión. Estos producen efectos negativos en el medio marino, sobre todo cuando los vertidos de aguas residuales coinciden con ecosistemas sensibles. Los efectos de una planta desalinizadora en el medio marino dependen tanto de las propiedades fisicoquímicas de los flujos de rechazo como de las características hidrográficas y biológicas del medio receptor (Lattemann & Höpner, 2007).

La eliminación del concentrado puede hacerse de varias maneras, que suelen ser específicas de cada lugar. A menudo La decisión sobre el método de eliminación suele ser una evaluación entre el costo, la disponibilidad local, el impacto medioambiental y la tecnología disponible (Greenlee et al., 2009).

Para el caso de Chile, existen dos estudios determinan que las condiciones oceanográficas favorables de la costa chilena (fuertes corrientes), y el uso de tecnología de difusores, la salmuera se mezcla rápidamente, reduciendo el área de influencia del vertido de salmuera, con una variación respecto a la salinidad natural de aproximadamente 1 psu (Rodríguez-Rojas et al., 2020).

Dada las condiciones oceanográficas privilegiadas de Chile, para efectos de este estudio se utilizará un sistema de descarga al mar mediante difusores, los que permiten la dispersión de la pluma, minimizando el impacto marino. Para el sistema de descarga de la planta desalinizadora se considera que esta se va a realizar fuera de la zona de protección de litoral, por lo que a la calidad del efluente se aplicarían los límites establecidos en el DS 90, Tabla 4:

CONTAMINANTE	UNIDAD	EXPRESIO N	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE A PARTIR DEL 10° AÑO DE VIGENCIA DEL PRESENTE DECRETO
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	350	150
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	S.SED	50	20
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.	700	300
Aluminio	mg/L	Al	10	
Arsénico	mg/L	As	0,5	
Cadmio	mg/L	Cd	0,5	
Cianuro	mg/L	CN ⁻	1	
Cobre	mg/L	Cu	3	
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	1	
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr ⁶⁺	0,5	
Cromo Total	mg/L	Cr Total	10	
Estaño	mg/L	Sn	1	
Fluoruro	mg/L	F ⁻	6	
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	20	
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HC	2	
Manganeso	mg/L	Mn	4	
Mercurio	mg/L	Hg	0,02	
Molibdeno	mg/L	Mo	0,5	
Níquel	mg/L	Ni	4	
PH	Unidad	pH	5,5 - 9,0	
Plomo	mg/L	Pb	1	
SAAM	mg/L	SAAM	15	
Selenio	mg/L	Se	0,03	
Sulfuro	mg/L	S ²⁻	5	
Zinc	mg/L	Zn	5	

Imagen 42: Límites máximos de concentración para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral. Fuente: DS 90.

ANEXO 4:

Supuestos:

Este informe se basa en datos previamente recopilados, incluyendo proyecciones sobre la ubicación del Parque Industrial (Imagen 23), que abarca una extensión de 885 hectáreas. Según las optimistas proyecciones de HINICIO, esta área tiene la capacidad para albergar hasta 12 plantas de producción de hidrógeno y sus derivados. Sin embargo, para los propósitos de este informe, se asumirá la instalación de 10 plantas de hidrógeno verde, cada una propiedad de distintos dueños y con un consumo de 50 [L/s] de agua desalinizada (equivalente a la capacidad del electrolizador). Esta configuración se traduce en una producción de 2000 toneladas por día de amoníaco por planta. La elección de 10 plantas se realizó en conjunto con SOVENTIX, adoptando proyecciones más conservadoras para el desarrollo del proyecto.

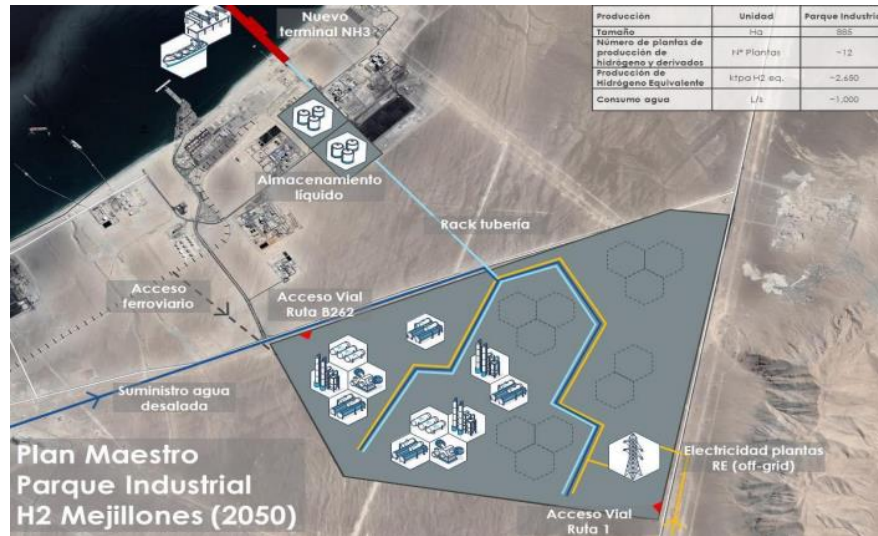


Imagen 43: Ubicación propuesta para la construcción del parque industrial en Mejillones. Fuente: Soventix SpA.

El sitio donde se encontrará el estanque de almacenamiento final posee la siguientes coordenadas:

Componente	Coordenada
Toma de agua	23°04'44''S 70°24'43''W
Sala de bombas	23°05'12''S 70°20'24'' W
Estanque de almacenamiento final	26°06'06''S 70°24'27'' W

Tabla 19: Coordenadas de las estructuras de ambas plantas. Fuente: Google Earth.

Teniendo en consideración las coordenadas previamente descritas, los principales parámetros del proyecto son los siguientes:

Parámetro	Valor [metros]
Longitud de la tubería desde la toma de agua a la sala de bombas	997,09 ¹
Longitud de la tubería desde la sala de bombas al estanque de almacenamiento final	1779,06
Profundidad de la toma de agua	20
Altura de la sala de bombas	13
Altura del Estanque de almacenamiento final	50

Tabla 20: Distancias y alturas de los componentes de ambas plantas desalinizadoras. Fuente: Google Earth.

¹ Valor obtenido al sumar los 700 metros de longitud, con la distancia entre la orilla del mar y la sala de bombas

Parámetro	Valor
Vida útil	30 años
Tasa de descuento del capital	8%
Inflación anual	3%
Contingencia	5%

Tabla 21: Supuestos utilizados para el cálculo del Valor Actual Neto de ambos proyectos. Fuente: Elaboración propia.

Capex 3 años	30%	40%	30%	-
Capex 4 años	20%	30%	30%	20

Tabla 22: Distribución de los costos de inversión, el primero utilizado para los estudios ambientales y el segundo para ambas plantas. Fuente: Elaboración propia.

	Notas	30-06-2022 M\$	31-12-2021 M\$
PATRIMONIO Y PASIVOS			
Pasivos			
Pasivos corrientes			
Otros pasivos financieros, corrientes	13-23	24.477.203	12.435.230
Pasivos por arrendamientos corrientes	12	1.842.744	951.344
Cuentas por pagar comerciales y otras cuentas por pagar	14	17.627.322	22.660.599
Cuentas por pagar a entidades relacionadas, corrientes	18	85.494	341.467
Otras provisiones a corto plazo	15	4.633.261	5.146.827
Provisiones corrientes por beneficios a los empleados	16	2.126.932	2.981.071
Otros pasivos no financieros corrientes	17	857.524	12.132.072
Pasivos corrientes totales		51.650.480	56.648.610
Pasivos no corrientes			
Otros pasivos financieros no corrientes	13-23	331.771.770	324.888.688
Pasivos por arrendamientos no corrientes	12	2.598.849	3.982.269
Cuentas por pagar no corrientes	14	1.814.182	1.833.069
Otras provisiones a largo plazo	15	6.953.238	6.290.492
Provisiones no corrientes por beneficios a los empleados	16	5.132.953	4.523.069
Total de pasivos no corrientes		348.270.992	341.517.587
TOTAL PASIVOS		399.921.472	398.166.197
Patrimonio			
Capital emitido	19	341.008.346	341.008.346
Ganancias (pérdidas) acumuladas	19	114.128.214	105.798.024
Otras reservas	19	(436.588)	(125.674)
Patrimonio Total		454.699.972	446.680.696
TOTAL DE PATRIMONIO Y PASIVOS		854.621.444	844.846.893

Imagen 44: Estado financiero Aguas Antofagasta 2023. Fuente: Sitio web Aguas Antofagasta.

Para calcular la tasa de descuento mediante la formula WACC, en primer lugar, se obtiene el β_e (beta apalancado), mediante la siguiente formula:

$$\beta_e = \beta_a \times \left(1 + \frac{D}{P} \times (1 - t)\right) \quad (12)$$

Donde β_a (beta apalancado), se obtiene observando la base de datos de Damodaran para la industria del agua con un valor de 0,48. El D corresponde a la deuda total obtenida a partir de la Imagen 44, P corresponde al patrimonio total obtenido a partir de la Imagen 44 y t es la tasa de impuesto de primera categoría en Chile, que corresponde a un 27%. Lo que da un β_e de 0,79.

Posteriormente, se reemplaza el valor del β_e en la Ecuación 13, donde r_f corresponde a la tasa libre de riesgo con un valor de 5,8% al 24 de noviembre según el bono del banco central en pesos a 10 años, r_m corresponde al premio por riesgo de mercado, para el cual se utiliza nuevamente la base de datos de Damodaran para la prima riesgo país en Chile, cuyo valor es 6,28. Dando como resultado un k_e (retorno mínimo exigido al patrimonio) de 0,10

$$k_e = r_f + \beta_e \times r_m \quad (13)$$

Finalmente, se reemplazan los valores en la Ecuación 14, donde k_d corresponde al retorno mínimo exigido a la deuda, en donde se utilizó la tasa interbancaria de Chile para el mes de noviembre del 2023, con un valor de 9%, obteniendo un WACC de un 8% y por lo tanto se usará esa tasa de descuento.

$$WACC = k_d \times (1 - t) \times \frac{D}{D+P} + k_e \times \frac{P}{D+P} \quad (14)$$

ANEXO 5:

La siguiente tabla contienen la distribución de los costos de inversión de ambas plantas. Dado que el precio unitario de cada componente es información sensible, se optó por mostrar valores finales y no cantidades.

Descripción Partida	Costo Inversión Planta 50 L/s	Costo Inversión Planta 500 L/s
Obras marinas		
Captación		
Sentina	255.607	1.646.955
Torre de captación	77.141	497.044

Tubería de captación (Inmisario)	474.820	3.059.417
Descarga		
Cámara de descarga	60.466	389.601
Tubería de descarga (Emisario)	318.400	2.051.553
General		
Obras provisorias	445.021	2.867.413
Zanja	104.834	675.482
	1.736.289	11.187.465
PEAM		
PEAM (Incluye 10% allowance)	124.122	923.633
	124.122	923.633
Impulsión Captación-Desaladora		
Zanja: Movimientos de Tierras		
Despeje Área	2.245	3.741
Excavación máquina 0-2 m suelo Tipo III	38.648	64.414
Relleno de zanja con material seleccionado	11.859	25.322
Cama de apoyo	1.932	3.221
Retiro, Transporte y Disposición de Excedentes	0	58.200
Entibaciones	63.158	97.166
Tuberías y Accesorios		
Tubería HDPE	202.625	202.625
	320.467	454.462
Planta Desaladora		
Equipos planta desaladora		

Equipos planta desaladora	2.095.193	13.500.000
Obras Civiles		
Obras Civiles	1.571.395	10.125.000
Tuberías y Accesorios		
Tuberías y Accesorios	628.558	4.050.000
Obras Eléctricas, Instrumentación y Control		
Obras Eléctricas, Instrumentación y Control	628.558	4.050.000
Otros		
Puesta en marcha	314.279	2.025.000
	5.237.983	33.750.000
Descarga		
Zanja: Movimientos de Tierras		
Despeje Área	643	933
Excavación máquina 0-2 m suelo Tipo III	11.075	16.058
Relleno de zanja con material seleccionado	3.303	5.805
Cama de apoyo	554	803
Retiro, Transporte y Disposición de Excedentes	0	13.888
Entibaciones	18.272	24.850
Tuberías y Accesorios		
Tubería de HDPE	60.965	60.965
Tubería		
	94.811	123.302
Estanques		

Movimientos de tierra		
Despeje de Área	76	353,92
Excavación general	1.603	9.146,64
Relleno general	865	2.941,88
Retiro, Transporte y Disposición de Excedentes	725	5.068,69
Estanque: Obras civiles		
Suministro y colocación de hormigón H35	7.714	355,50
Suministro y colocación de hormigón H10	279	133,94
Acero para armaduras	11.790	23.727,52
	23.052	41.728
Impulsión Desaladora – Estanque Final		
Zanja: Movimientos de Tierras		
Despeje Área	3.624	5.150
Excavación máquina 0-2 m suelo Tipo III	62.391	88.660
Relleno de zanja con material seleccionado	18.032	30.996
Cama de apoyo	3.120	4.433
Entibaciones	104.022	138.696
Tuberías y Accesorios		
Tubería de HDPE	361.522	361.522
	552.710	629.456
Total		
Costos Directos	8.089.434	47.110.047

Tabla 23: Distribución de costos de inversión de ambos proyectos. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 6:

Tablas de costos operacionales de la empresa CDM Smith:

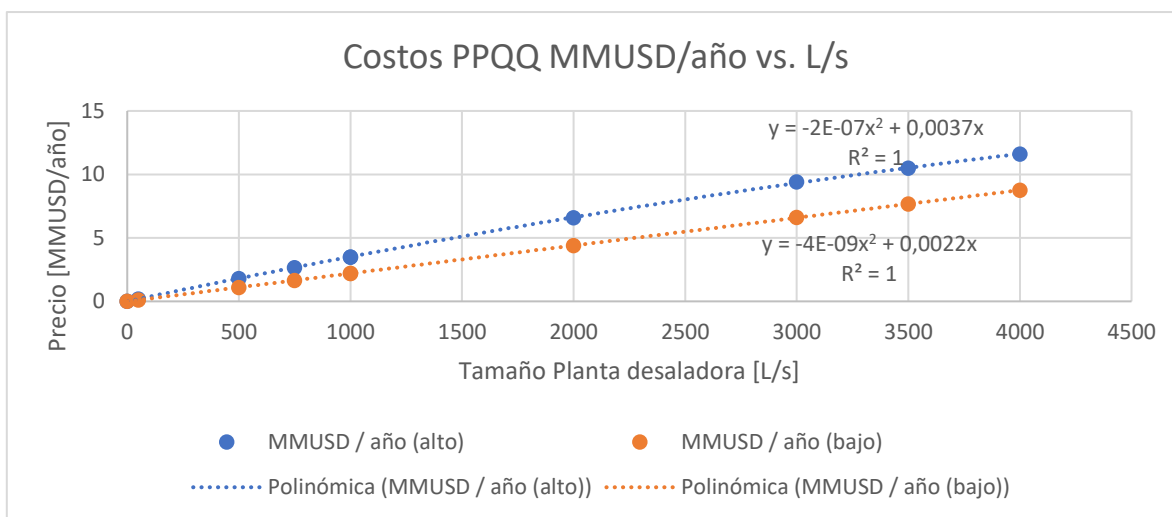


Imagen 44: Costos anuales de los productos químicos en función del tamaño de la Planta desaladora. Fuente: CDM Smith.

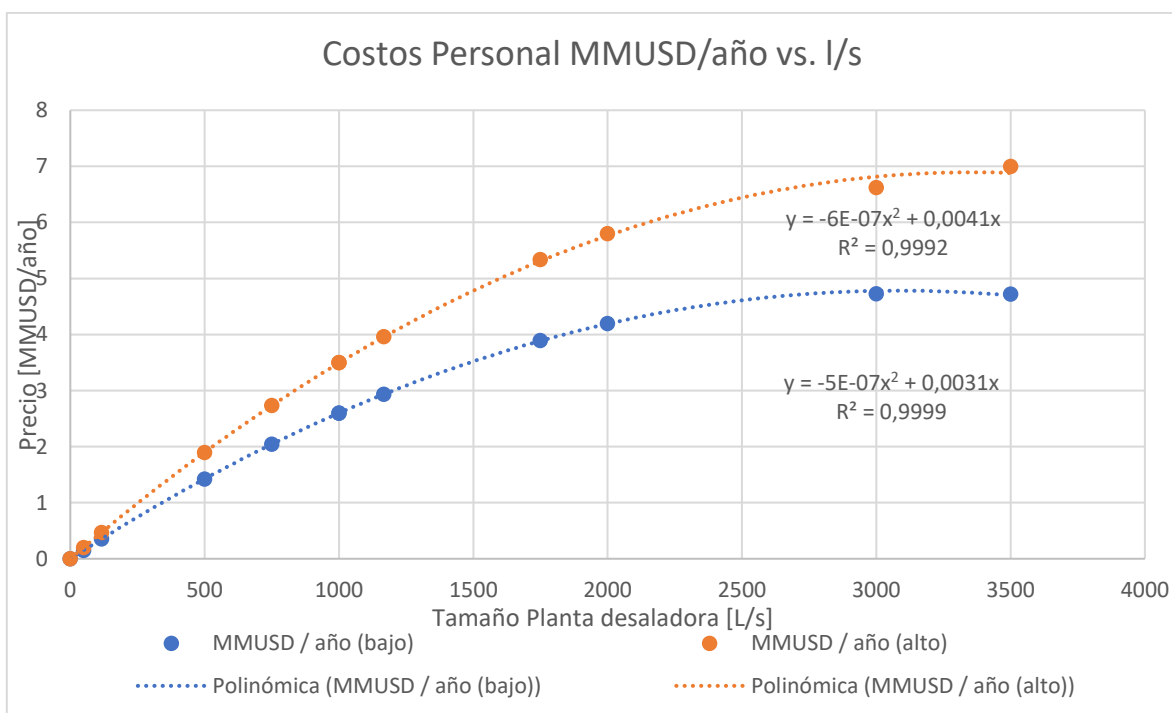


Imagen 45: Costos anuales de personal en función del tamaño de la Planta desaladora. Fuente: CDM Smith.

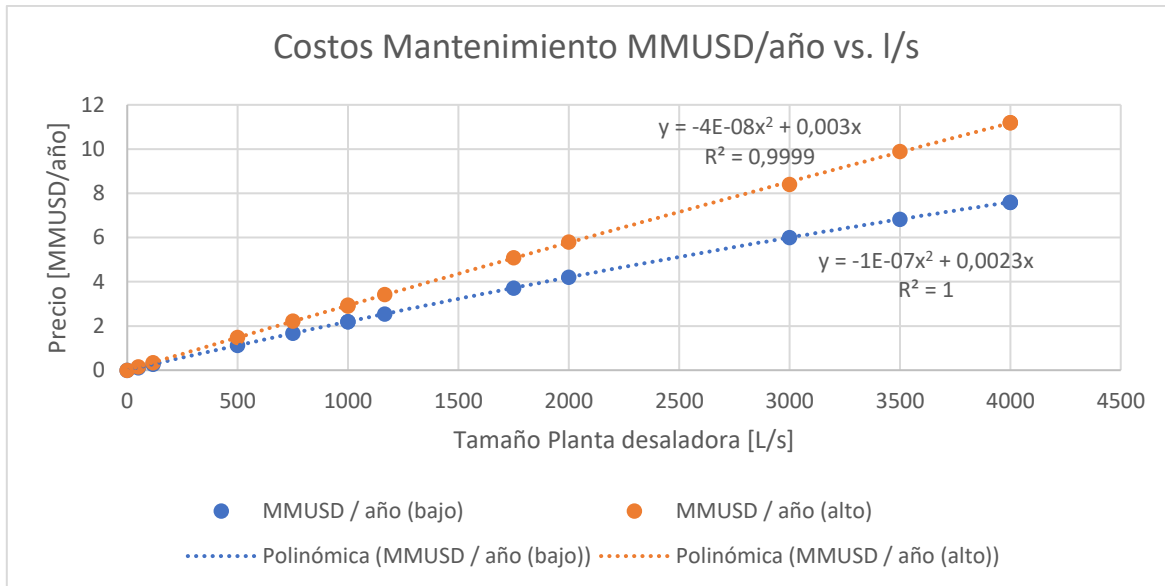


Imagen 46: Costos anuales de mantenimiento en función del tamaño de la Planta desaladora. Fuente: CDM Smith.

ANEXO 7:

Con el fin de realizar una aproximación del impacto medioambiental de la planta, se realiza un análisis de huella de carbono de ambos proyectos. Para ambas plantas desalinizadoras, la huella de carbono se mide en 4 etapas de consumo (Liu et al., 2015), el primero es la producción de los materiales: n

$$CF_m = \sum_i \beta_i \times C_i \quad (15)$$

Donde β_i corresponde al factor de emisión por producción de cada material y C_i es la cantidad de material. Para este caso vamos a asumir linealidad de la cantidad de materiales, por lo que el consumo de 10 plantas pequeñas de 50 L/s equivale a una de 500 L/s, teniendo la misma huella de carbono.

La segunda etapa de consumo es el transporte de los materiales:

$$CF_t = \sum_i (\beta_d \times \alpha_d \times \frac{Q_i}{L} \times \frac{S_i}{v}) \quad (16)$$

Donde β_d es el factor de combustión de diésel, α_d es la cantidad de diésel consumido, Q_i es la cantidad de material transportado, L es la capacidad de un camión, S_i es la distancia transportada y v la velocidad. Nuevamente se asume que el factor de combustión, la cantidad de diésel consumida, la capacidad del camión, la capacidad del camión y la distancia transportada de los materiales es la

misma, al igual que la proporcionalidad de la cantidad transportada es igual en 10 plantas de 50 L/s que en una planta de 500 L/s. Por lo que esta huella de carbono permanece igual.

La tercera etapa de consumo es la construcción, particularmente la excavación en roca:

$$CF_c = \sum_i (\beta_d \times C_{di} + \beta_e \times C_{ei}) \quad (17)$$

Donde C_{di} es el consumo de diésel en el consumo del proyecto, β_e es el factor de emisión por consumo eléctrico y C_{ei} es el consumo eléctrico en la construcción del proyecto. Dado que gran parte de la construcción y excavación de roca es producto de la impulsión y la descarga del proyecto, es que acá no se asume una proporción por cantidad producida entre plantas, sino que se asume que cada una de las plantas de 50 L/s tiene el mismo consumo en su construcción que la planta de 500 L/s, por lo que la huella de carbono sería 10 veces más la cantidad en este ítem.

El cálculo total de la huella de carbono durante la construcción, considerando las Ecuación 15, Ecuación 16 y Ecuación 17, según la literatura queda:

$$CF_{wl} = \frac{CF_m + CF_t + CF_c}{\alpha \times Q_w} \quad (18)$$

Donde α corresponde a la cantidad de años que dura el proceso y Q_w la cantidad de agua producida por la planta. Utilizando los valores previamente mencionados, queda que la huella de carbono de 10 plantas de 50 L/s es mayor que una de 500 L/s en:

$$\Delta 1 = \frac{9 \times \sum_i (\beta_d \times C_{di} + \beta_e \times C_{ei})}{1500} \quad (19)$$

Con respecto a la operación y mantención, se utiliza la siguiente ecuación:

$$CF_{wl} = \frac{CF_0 + CF_{ma}}{Q_w} \quad (20)$$

Donde CF_0 corresponde a las emisiones de carbón correspondientes al consumo eléctrico del proyecto y CF_{ma} las emisiones de carbón correspondientes al cambio de membranas. Para este caso se utiliza una proporción lineal con respecto a las emisiones del recambio de membraba, tal como se ve en la Imagen (ppqq), mientras el consumo de electricidad de la planta de 500 L/s equivale a un consumo del 86,33% con respecto a 10 plantas de 50 L/s, calculándose a partir de la Tabla (OPEX), lo que da como resultado que exista una diferencia en la huella de carbono de:

$$\Delta 2 = \frac{13,75 \times CF_0}{500} \quad (21)$$

ANEXO 8:

Con el fin de recomendar un precio de venta del agua, se realizó un análisis financiero en el que se utilizó los valores promedio del mercado del agua en el año 2022 de la base de datos de Damodaran.

En primer lugar, se utilizó los valores presentes en la Tabla 23 en la Ecuación 22, la cual corresponde al ratio deuda patrimonio del mercado del agua, obteniéndose los valores de la Tabla 24:

$$\frac{D}{E} = 82,63\% \quad 22$$

Parámetro	Planta 50 L/s [dólares]	Planta 500 L/s [dólares]
Deuda	3.791.109	21.445.784
Patrimonio	4.588.054	25.953.992

Tabla 24: Valores de patrimonio y deuda para ambas plantas. Fuente: (Damodaran, 2023).

Posteriormente, se reemplazó los valores de la Tabla 14 en la Ecuación 23, la cual corresponde a la formula del margen bruto de la industria de agua, obteniéndose los valores de la Tabla 25:

$$\text{Margen bruto} = 42,23\% \quad 23$$

Parámetro	Planta 50 L/s [dólares]	Planta 500 L/s [dólares]
Ingreso bruto por metro cúbico	4,19	3,30

Tabla 25: Ingreso bruto por metro cúbico para ambas plantas. Fuente: (Damodaran, 2023).

Con este Ingreso unitario, se calcula los indicadores VAN y TIR de ambas plantas, obteniéndose los valores presentes en la Tabla 26:

Parámetro	Planta 50 L/s [dólares]	Planta 500 L/s [dólares]
VAN	20.640.560,80	255.326.027
TIR	24%	58%

Tabla 26: VAN y TIR calculados para ambos proyectos, utilizando los valores de la Tabla 25. Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que ambos indicadores señalan la viabilidad económica de los proyectos, ya que en ambos casos sus valores son positivos. Al realizar una comparación entre ambas plantas, se concluye que, a pesar de que el ingreso unitario de la planta de 500 L/s sea menor, esta resulta más rentable que la planta de 50 L/s. El valor de ambos indicadores es significativamente alto, alcanzando un TIR del 58% para la planta de 500 L/s. Sin embargo, es crucial señalar que el flujo de caja solo contempla costos de inversión y operación, y el ingreso se basa en la información de la Tabla 25, lo que puede distorsionar la realidad del sector industrial al no considerar aspectos como impuestos a las ganancias, amortizaciones, devaluaciones, entre otros. A pesar de esta limitación, se destaca el valor del costo unitario por metro cúbico, el cual se encuentra dentro de los rangos de precios observados en Chile.

Para obtener un aproximación de la utilidad anual de ambas plantas, se utiliza el valor del ROE para la industrial del agua, usando los valores obtenidos de patrimonio presentes en la Tabla 24, obteniéndose la Tabla 27:

$$ROE = 5,01\%$$

24

Parámetro	Planta 50 L/s [dólares]	Planta 500 L/s [dólares]
Utilidad neta anual	248.213,72	1.404.110,98

Tabla 27: Utilidad neta anual para ambas plantas. Fuente: (Damodaran, 2023)

Adicionalmente, a modo de análisis complementario y comparativo, se evalúa si los valores de los indicadores financieros empleados están alineados con la industria del agua en Chile. Esta evaluación se realiza mediante la comparación de los ratios de deuda patrimonio, ROE y la proporción Deuda/EBITDA con los datos proporcionados en la Imagen 44 e Imagen 47, los cuales corresponden al estado financiero de Aguas Antofagasta.

		01-01-2022 30-06-2022	01-01-2021 30-06-2021	01-04-2022 30-06-2022	01-04-2021 30-06-2021
	Notas	M\$	M\$	M\$	M\$
Ganancia (Pérdida)					
Ingresos de actividades ordinarias	24	76.602.927	70.475.657	38.753.153	35.933.559
Costo de ventas	25	(40.667.057)	(38.850.397)	(23.097.269)	(19.806.846)
Ganancia Bruta		35.935.870	31.625.260	15.655.884	16.126.713
Otros ingresos	26	877.756	559.230	452.509	278.745
Gastos de administración	27	(9.624.011)	(9.416.286)	(4.371.957)	(4.367.395)
Otros gastos, por función	28	(1.460.719)	(949.468)	(1.112.367)	(152.688)
Ganancias (pérdidas) de actividades operacionales		25.728.896	21.818.736	10.624.069	11.885.375
Ingresos financieros	29	1.068.444	547.934	587.042	281.661
Costos financieros	29	(3.085.875)	(2.179.424)	(1.586.726)	(1.238.150)
Deterioro de valor de ganancias y reversión de pérdidas por deterioro de valor (pérdidas por deterioro de valor)	6	(412.607)	628.323	653.355	369.926
Diferencias de cambio	30	177.177	91.649	204.526	14.835
Resultado por unidades de reajuste	31	(21.601.603)	(6.729.212)	(14.004.227)	(3.329.331)
Ganancia (pérdida), antes de impuesto		1.874.432	14.178.006	(3.521.961)	7.984.316
Gasto por impuestos a las ganancias	8	11.147.978	11.366.824	7.482.666	9.466.974
Ganancia (pérdida)		13.022.410	25.544.830	3.960.705	17.451.290
Otro resultado Integral					
Componentes de otro resultado integral que no se reclasificarán al resultado del periodo, antes de impuestos					
Otro resultado integral, antes de impuestos, ganancias (pérdidas) por nuevas mediciones de planes de beneficios definidos	8	(425.910)	417.884	(204.435)	133.467
Impuesto a las ganancias relativo a nuevas mediciones de planes de beneficios definidos de otro resultado integral	8	114.996	(112.829)	55.198	(36.036)
Total otro resultado integral	8	(310.914)	305.055	(149.238)	97.431
Resultado integral total		12.711.496	25.849.885	3.811.467	17.548.721
Ganancias por acción:					
Ganancias básicas por acción:					
Ganancia (pérdida) por acción básica en operaciones continuadas	20	23,55	46,19	7,16	31,55
Ganancia (pérdida) por acción básica		23,55	46,19	7,16	31,55

Imagen 47: Estado resultado integral por función de Aguas Antofagasta. Fuente: Sitio web Aguas Antofagasta.

Para el calculo del EBITDA se le sumo a las Ganancias (pérdidas) de actividades operacionales presente en la Imagen 47, las amortizaciones y depreciaciones presentes en la Imagen 48 e Imagen 49.

Nota 25. Costo de ventas

El detalle de Costos de ventas es el siguiente:

Costo de ventas	30-06-2022	30-06-2021
Amortizaciones de activos intangibles	14.334.949	13.806.616
Energía y compra de agua cruda	9.439.085	9.296.346
Órdenes y contratos de mantenimiento y reparaciones	5.830.320	5.646.531
Servicios personales	4.870.667	4.820.888
Órdenes y contratos por otros servicios	2.467.226	2.317.085
Consumo de insumos directos	2.091.162	1.882.172
Generales	748.315	611.469
Arrendamientos	772.343	291.603
Honorarios	129.322	171.076
Multas e infracciones	28.767	-
Rebaja de valor de inventarios	(45.099)	6.611
Total costo de ventas	40.667.057	38.850.397

Miles de pesos Chilenos.-

Imagen 48: Detalle de costos de venta de Aguas Antofagasta. Fuente: Sitio web Aguas Antofagasta.

Nota 27. Gastos de administración

El detalle de los gastos de administración es el siguiente:

Gastos de administración	30-06-2022	30-06-2021
Gastos de personal		
Sueldos y salarios	2.991.202	3.383.571
Otros beneficios de largo plazo	5.083	120.444
Total gastos de personal	2.996.285	3.504.015
Gastos Generales		
Litigios Judiciales	1.022.196	2.724.474
Otros gastos generales	807.686	212.898
Provisión Cierre capital de trabajo ¹	662.746	(97.861)
Seguros generales	489.628	402.759
Vigilancia y seguridad	462.946	419.395
Consumo de insumos directos	417.808	59.908
Licencias Computacionales	404.817	263.783
Comunicaciones y transporte	385.803	186.662
Depreciación de propiedades, planta y equipo	376.705	325.412
Mantenimiento	330.071	223.765
Servicios de aseo, cafetería, restaurante y lavandería	273.847	224.815
Procesamiento de información	221.784	104.693
Impuestos, contribuciones y tasas	215.793	134.960
Comisiones, honorarios y servicios	180.853	370.398
Servicios públicos	146.661	150.021
Publicidad y propaganda	81.936	94.201
Arrendamiento	76.071	37.342
Impresos, publicaciones, suscripciones y afiliaciones	59.785	55.220
Elementos de aseo, lavandería y cafetería	7.954	17.076
Otros gastos	2.636	2.350
Total gastos generales	6.627.726	5.912.271
Total Gastos de administración	9.624.011	9.416.286

Miles de pesos Chilenos.-

Imagen 49: Detalle de Gasto de administración de Aguas Antofagasta. Fuente: Sitio web Aguas Antofagasta.

Al calcular el ratio deuda-patrimonio para Aguas Antofagasta utilizando la Imagen 44, se obtiene un valor del 87,95%, lo cual muestra una proximidad notable al valor de referencia para la industria del

agua, establecido en un 82,63%. En cuanto al ROE de la misma empresa, se registra un 3%, una cifra también cercana al 5,01% para la industria en cuestión. Sin embargo, al comparar el ratio deuda/EBITDA, se observa una diferencia más pronunciada, siendo el valor de la industria del 6,02% y el de Aguas Antofagasta del 11,2%, lo que constituye la disparidad más significativa entre los indicadores. Esta discrepancia puede explicarse por la mayor proporción de deuda de Aguas Antofagasta en relación con el mercado, lo cual se refleja de manera más evidente en este último ratio. La comparación entre el EBITDA y la deuda resulta más impactante debido a las considerables diferencias de valor entre ambos, lo que hace que incluso una pequeña variación porcentual en la distribución de la deuda y el patrimonio afecte considerablemente este indicador. A pesar de estas variaciones, es crucial destacar que estos indicadores financieros son evaluados a nivel global, y todos los demás valores se mantuvieron cercanos, incluyendo el precio del ingreso bruto obtenido de manera indirecta. En conclusión, los valores finales obtenidos se sitúan dentro de las expectativas para la industria del agua en Chile.