

Evaluación de la factibilidad técnica de implementación de desalinizadores de agua de mar, implementando energía renovable en zonas rurales costeras de Chile.***Camila Villouta A.¹, María Elisa Neubauer R.², Claudio Correa R.³*****Resumen**

UNESCO (2019) señala que existen cerca de 2.000 millones de personas que viven en países con grave escasez hídrica, valores que continuarán aumentando tras los efectos del cambio climático y el aumento de la demanda de agua dulce. Por otra parte, existen sectores rurales con problemas de sequía, pero cercanos a la costa, por lo que se presenta la alternativa de desalinización de agua de mar para abastecimiento de agua dulce a través de procesos de desalinización. Sin embargo, dado los altos consumos energéticos y las emisiones ambientales que generan las plantas desalinizadoras, se precisa optimizar el proceso por medio del uso de energía renovables.

En este contexto, este trabajo estudia la factibilidad técnica de la implementación de plantas desalinizadoras a través del uso de paneles solares fotovoltaicos y aerogeneradores, para disminuir las emisiones CO₂ generadas por el funcionamiento de estas plantas. A modo de referencia en caso de implementación, se seleccionó la localidad de Curahue, ubicada en la Región de Los Lagos, Chile. De acuerdo a los resultados obtenidos, Curahue tiene una demanda de agua potable de 181,13 m³/día a 50 años, y en caso de implementarse una planta desalinizadora, es posible implementar 4 aerogeneradores con hélices de 18 metros de diámetro y complementar con paneles solares fotovoltaicos en un área de 6,25 m², los cuales tendrán una vida útil de 20 y 30 años respectivamente, este último no pudiendo funcionar de forma independiente.

Abstract

UNESCO (2019) points out that there are about 2 billion people living in countries with severe water scarcity, values that will continue to increase after the effects of climate change and the increase in the demand for fresh water. On the other hand, there are rural sectors with drought problems, but close to the coast, which presents the alternative of desalinating seawater to supply fresh water through desalination processes. However, given the high energy consumption and environmental emissions generated by desalination plants, it is necessary to optimize the process through the use of renewable energy.

In this context, this work studies the technical feasibility of the implementation of desalination plants through the use of photovoltaic solar panels and wind turbines, to reduce CO₂ emissions generated by the operation of these plants. As a reference in case of implementation, the town of Curahue, located in the Los Lagos Region, Chile, was selected. According to the results obtained, Curahue has a drinking water demand of 181,13 m³/day at 50 years, and in case of implementing a desalination plant, it is possible to implement 4 wind turbines of 18 meters in diameter and complement them with photovoltaic solar panels in an area of 6,25 m², which will have a useful life of 20 and 30 years respectively, the latter not being able to operate independently.

(1)Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cvillouta@ing.ucsc.cl

(2)Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, UCSC, CHILE, maria.neubauer@ucsc.cl

(3)Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, UCSC, CHILE, claudiocorrea@ucsc.cl

1. Introducción

El agua es un recurso renovable fundamental para el desarrollo de vida, sin embargo, a nivel mundial, el 97,5% de este recurso corresponde a agua de mar y sólo un 2,5% de agua dulce (ALADYR, 2019). Esta fracción de agua dulce se ha visto afectada por el cambio climático, que ha provocado sequías prolongadas en algunas regiones del mundo. Según la OCDE (2012) al año 2050, más del 40% de la población mundial vivirá en zonas con estrés hídrico severo, mientras que la Universidad de California en Irvine (Richey et al. 2015) indica que, 21 de los 37 principales acuíferos en el mundo se están agotando, y que 13 de éstos, se encuentran en un nivel crítico por su uso intensivo.

Para Chile, a través de un estudio realizado por Escenarios Hídricos 2030 (2017), se determinó que un 76% del país es afectado por sequía, desertificación y suelo degradado, y que 110 acuíferos se encuentran, actualmente, con una demanda comprometida superior a su recarga (Ministerio del Interior, 2015). Frente a esta situación, se presenta como alternativa la implementación de plantas desalinizadoras como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano, especialmente para zonas cercanas a las costas. Sin embargo, uno de los problemas ambientales asociados con la implementación de plantas desalinizadoras, está relacionado con la alta demanda energética de su funcionamiento, generando emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al ambiente (CO_2), que contribuyen al cambio climático, uno de los factores que generan la escasez hídrica, por lo que esta investigación tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica de la implementación de paneles solares y aerogeneradores en plantas desalinizadoras mediante osmosis inversa a través de uso de energías renovables en zonas rurales costeras con escasez hídrica de Chile.

2. Marco Teórico

Actualmente, existen diversas formas de abastecimiento de agua dulce, específicamente en zonas rurales. En general, Agüero (1997) señala que se consideran 3 principales fuentes de abastecimiento de agua dulce para consumo humano, correspondientes a captación de aguas superficiales, aguas subterráneas y colección de aguas lluvias. La Fundación Amulén (2019) señala que un 84,7% de la población rural carente de agua potable de Chile se abastece de agua a través de pozos o ríos, lagos o esteros, sin embargo, la calidad del agua para consumo no es regulada, por ejemplo, en el sur de Chile, la forma de abastecimiento de agua más común corresponde a la captación subterránea. Según el Manual de Pequeñas Obras de Riego (2010), es posible abastecerse de agua mediante pozos de captación por aproximadamente 20 años.

La escasez de agua potable y el difícil acceso a ésta en sectores aislados ha desencadenado la búsqueda de alternativas no convencionales de abastecimiento de agua potable, los desalinizadores son una solución a la crisis hídrica para sectores encontrados en zonas costeras ya que existe una menor distancia al lugar de obtención del recurso, abasteciendo de agua a zonas en las que no se tenga disponibilidad de agua subterránea o superficial. La desalinización es una alternativa propicia para lugares con escasez hídrica y cercanos a la costa, es por lo que países como Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos han optado por la implementación de plantas desalinizadoras, ALADYR (2019) señala que actualmente existen más de 20.000 plantas de producción de agua desalada en el mundo.

La RAE señala “desalinizar” como “quitar la sal del agua del mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines”, implementando plantas desalinizadoras como solución a la crisis de agua dulce. ALADYR (2019) explica el proceso que realiza una planta desalinizadora, observado en la Figura 1, la que comienza con el bombeo agua marina a través de tuberías, luego es almacenada para ser procesada a través de membranas de modo de extraer los contaminantes, posteriormente se retira la sal mediante un proceso denominado osmosis inversa, este sistema consume alrededor de 3 kWh/m³. El Decreto con fuerza de Ley N°30 (2005) indica que las concesiones marítimas tienen un plazo máximo de duración de 50 años, por lo que el funcionamiento de una planta desalinizadora debe considerar este aspecto.

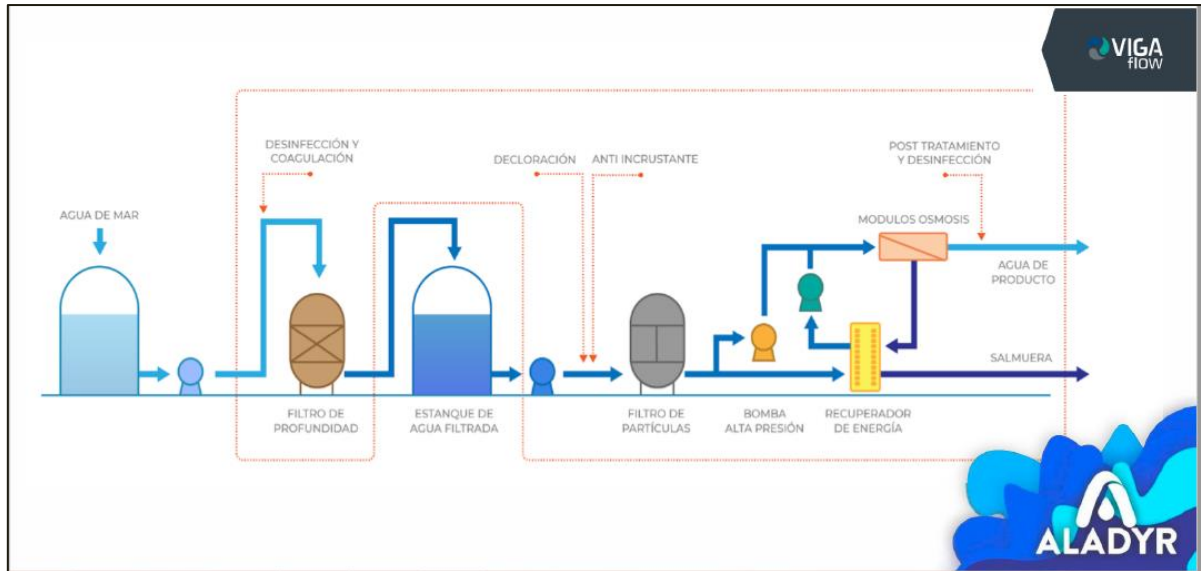


Figura 1. Proceso de desalinización

Fuente: ALADYR (2019)

Para extraer la sal del agua marina existen diversas tecnologías, Baeza, Vivanco y Harris (2019) indican que los métodos actuales para purificar el agua corresponden, principalmente, a destilación y osmosis inversa. La destilación requiere de mayor energía en comparación con la osmosis inversa, este aspecto abarca más del 40% de los costos operacionales del proceso, mientras que la osmosis inversa corresponde a un proceso más eficiente desde el punto de vista energético.

El volumen y concentración de sales contenidas en la salmuera resultante de los procesos dependerá de la tecnología utilizada, por ejemplo, se tiene que, para el proceso de desalación, la salmuera representa de 8 a 10 veces el volumen de agua desalada, mientras que, en el caso de la osmosis inversa, el volumen de salmuera es de 2,5 a 3 veces el volumen de agua desalada, lo que indica que este proceso es más eficiente. Colomina (2016), indica que esto se debe a que el proceso consiste en aplicar una presión externa mayor que la presión osmótica entre las dos soluciones para conseguir la inversión del proceso, es decir, el proceso requiere que exista circulación de la solución con menos sales a la solución con más sales. En la Figura 2 se observa el proceso de osmosis inversa descrito anteriormente.



Figura 2. Proceso de osmosis inversa.

Fuente: <https://cuidemoselplaneta.org/procesos-de-desalinizacion-del-agua/>

Renne y Kazmerski (2008) señalan que, en la ósmosis inversa, el agua en una solución salina presurizada se separa de los solutos (es decir, el material disuelto) por una membrana, para esta separación no es necesario ningún tipo de calentamiento y/o cambio de fase, y el principal requisito energético corresponde a la presurización del agua de alimentación. A pesar de que la osmosis inversa es uno de los procesos más eficientes para purificar el agua, este proceso requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, mediante el cual se generan emisiones al ambiente. La descarga de contaminantes a la atmósfera generados por actividades relacionadas al ser humano ha causado altas concentraciones de CO₂ en la atmosfera, por lo que es de suma importancia que el proceso de desalinización emita la menor cantidad de contaminantes al medio ambiente.

Estevan, A., & García, M. (2007) indican los procesos que implican consumo energético: accionamiento de las bombas de alta presión por los motores eléctricos; presurización del agua en las bombas de alta presión; pérdidas por rozamiento en los circuitos de entrada y en los tubos de presión; obtención de permeado y generación de un porcentaje de salmuera presurizada; recuperación de la energía de la salmuera mediante dispositivos recuperadores (Turbinas Pelton, Cámaras isobáricas); salida del producto y las salmueras con cierta energía residual. También Estevan, A., & García, M. (2007) señalan las principales etapas que forman parte de la desalinización de agua de mar: captación, pretratamiento, bombeo de alta presión, distribución de permeado y otros (vertido de rechazo, iluminación, post tratamiento y limpieza de filtros), además indican la distribución del consumo energético visualizado en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Consumo energético según las etapas de la desalinización

Etapas desalinización	%Del consumo total	Consumo energético
Captación	4,5%	0,135 kWh/m ³
Pretratamiento	2,6%	0,078 kWh/m ³
Bombeo de alta presión	84,4%	2,532 kWh/m ³
Distribución de permeado	6,7%	0,201 kWh/m ³
Otros	1,8%	0,054 kWh/m ³

Fuente: Elaboración propia mediante Estevan, A., & García, M. (2007)

El principal factor que influye en el costo de una planta desalinizadora es el consumo de energía. Según la Revista Electricidad (2014) el costo total del proceso que conlleva la desalinización oscila entre 0,6 y 1,2 US\$/m³ y el Consejo Minero (2013) indica que en Chile aproximadamente se paga US\$5 por m³ de agua de mar desalada para minería, en zonas lejanas a la costa y de altura, donde están ubicadas las mineras, mientras que Economía y Negocios (2015) indica que el metro cúbico de agua desalada tiene un costo mayor mientras más lejos se encuentre el punto receptor de la costa (US\$1) y sube conforme se bombea hacia el interior. Además, el consumo de energía eléctrica genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) lo que, al ser emitidos a la atmósfera, acrecientan el problema de cambio climático y efecto invernadero, que, a su vez, incrementan los índices de sequía. En este contexto, es necesario que la implementación de una planta desalinizadora para abastecimiento de agua para consumo humano se ejecute cercano a la costa y que posea una fuente de energía con poca o nula emisión de GEI, es decir, a través de energías renovables.

Gómez (2018) explica que la energía solar, como fuente de generación de energía para el funcionamiento de plantas desalinizadoras, ha sido mayoritariamente utilizada mediante paneles fotovoltaicos, los que transforman energía solar en electricidad, uno de los factores importantes de este método de generación de energía es que corresponde a una energía limpia, pues no genera emisiones en su etapa de operación, siendo este método una alternativa para abastecer de energía a plantas desalinizadoras, ya que en el proceso de extracción de sales marinas es donde se consume mayor energía.

Se estudia la energía solar como fuente de energía, para la implementación de paneles solares fotovoltaicos, es necesario conocer la irradiación presente en Chile, SUNFIELDS (2010) indica que irradiación corresponde a “la magnitud que describe la radiación o intensidad de iluminación solar recibida medida como una potencia instantánea por unidad de superficie. Sus unidades en el SI (Sistema Internacional) son el W/m².” Solargis (2010) entrega la irradiación presente en Chile según región, durante los años 1994-2010, en donde es posible notar que se presenta una mayor irradiación

en la zona norte del país, la que se encuentra entre 2600 kWh/m² y 3800 kWh/m², por lo que este sistema sería mucho más factible.

Otra alternativa de energía renovable para este tipo de sistemas, corresponde a la energía eólica, que funciona como fuente de generación de energía producto del viento. Landeta y Mayorga (2010) “un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina eólica accionada por el viento. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica”. Con respecto a la vida útil IDAE (2006) señala que para poder garantizar el correcto funcionamiento de los aerogeneradores se debe realizar un seguimiento rutinario, además contemplar una vida útil de 20 años.

INE (2017) señala que existen 383.204 viviendas sin acceso a agua potable en Chile, que corresponden en su mayoría a comunidades rurales de escasos recursos, quienes, con sus propios medios no pueden costear proyectos que abastezcan de agua a la población, por lo que es imprescindible la implementación de un sistema de abastecimiento de agua potable autosustentable en zonas decretadas con escasez hídrica y pertenecientes a las localidades más vulnerables.

Según el último Censo realizado (INE, 2017) en Chile, 372.116 chilenos viven en aldeas o entidades rurales, donde 727 aldeas corresponden a entidades rurales con una población entre 301 y 2000 habitantes, en donde más del 50% realiza actividades primarias como agricultura, ganadería, pesca, minería, entre otras.

La Dirección General de Aguas establece las zonas con escasez hídrica, señala en la Resolución N°1674 como método de clasificación las siguientes condiciones hidrometeorológicas: en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Libertador General Bernardo O'Higgins, Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, las precipitaciones acumuladas a contar del mes de abril, de modo que en cualquier caso quede comprendido a lo menos el periodo abril-agosto, tengan un indicador de sequía (ICE) igual o menos a -0,84. Los caudales medios mensuales acumulados de los últimos 3 meses consecutivos tengan un indicador de sequía (ICE) igual o menor a -0,84. Además, se indica que, en el caso de uso de aguas subterráneas, en el caso de sistemas de agua potable rural, la condición de sequía se verificará, si en cualquier momento en un sector hidrogeológico de aprovechamiento común del acuífero, la capacidad de la o las captaciones para abastecimiento de agua, cuando sea menor al 50% de los derechos de

aprovechamiento de agua subterránea otorgados. En caso de que una localidad presente una condición se presentan los decretos de escasez los cuales tienen un plazo de vigencia de 6 meses.

Según lo anteriormente mencionado se selecciona a la localidad de Curahue perteneciente a la comuna de Quellón, provincia de Chiloé, región de Los Lagos, la cual mediante el Decreto N°61 de 5 de abril de 2021 se estableció como zona con escasez hídrica, sumado a esto la localidad se encuentra en una zona cercana a la costa, disminuyendo así los costos asociados a la distribución de agua.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica de la implementación de paneles solares y aerogeneradores en plantas desalinizadoras mediante osmosis inversa a través de uso de energías renovables en zonas rurales costeras con escasez hídrica de Chile.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar las diferentes formas de abastecimiento de agua potable existentes frente a un desalinizador
- Calcular dotación máxima de agua requerida, el consumo energético de un desalinizador y determinar la factibilidad de implementar aerogeneradores y paneles solares.
- Evaluación de factibilidad técnica de implementación de una planta desalinizadora en la localidad de Curahue.

4. Metodología

4.1. Análisis de sistemas de abastecimiento de agua potable existentes frente a un desalinizador

Se estudió la desalinización como fuente de abastecimiento de agua potable mediante los parámetros costo, vida útil, emisiones ambientales y disponibilidad de agua.

Con la finalidad de analizar las emisiones ambientales generadas durante la operación de los sistemas de abastecimiento de agua existentes, se determinó la fuente de energía utilizada mediante fuentes teóricas, con la cual fué posible obtener la emisión de CO₂.

Se realizó una evaluación cualitativa mediante una tabla resumen con las distintas formas de abastecimiento de agua potable con respecto a factores ambientales y actividades humanas que podrían ser perturbadas, en la cual existen 3 niveles de evaluación -1, 0 y 1, donde 1 se identificó

como favorable, 0 indica neutralidad y -1 desfavorable. El método comparativo se realizó sumando filas y columnas para identificar parámetros que se encuentran mayormente alterados y determinar la alteración al ecosistema según sistema de abastecimiento de agua potable

4.2. Cálculo de dotación máxima de agua requerida, el consumo energético de un desalinizador y determinar la factibilidad de implementar aerogeneradores y paneles solares.

Se determinó la demanda futura de agua, mediante el manual de proyectos de agua potable rural (DGA, 2019) señala el procedimiento para obtener la dotación de agua requerida por la población proyectada.

Con la finalidad de determinar la población futura P_t , se indica en la ecuación 1 el procedimiento realizado mediante el método geométrico.

$$P_f = P_i(1 + r)^{ni} \quad \text{ec(1)}$$

Donde:

P_i : población inicial

r : tasa de crecimiento anual.

n : número de años a considerar.

En caso de que considere el mejoramiento de un Sistema de Agua Potable Rural o bien que se encuentre información catastrada de periodos anteriores en la localidad, se debe realizar un análisis en base al crecimiento real de la población conectada al sistema existente, el que se determinará de acuerdo con la fórmula de tasa de crecimiento geométrico.

$$r = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{t_2-t_1}} - 1 \quad \text{ec(2)}$$

Donde:

P_2 : población actual

P_1 : población existente previamente

t_2 : año actual

t_1 : año previo

Con la población futura es posible determinar la dotación de consumo de agua en donde el manual de proyectos de agua potable rural (DGA, 2019) el cual indica que en caso de no disponer de información

se adoptará la dotación de acuerdo con los parámetros, por consiguiente, el caso en estudio es abastecer de agua potable, por lo que la dotación mínima es de 120 L/Hab/día y un máximo 150 L/Hab/día, adoptando un factor de 1,5 para el máximo consumo diario.

Para obtener la emisión de CO₂ se utiliza la página web proporcionada por ECODES (<https://ecodes.org/tiempo-de-actuar/hogares-sostenibles/ahorro-energetico/calculadora-electricidad>)

El Ministerio de Energía del gobierno de Chile facilita 2 plataformas web (<http://solar.minenergia.cl/fotovoltaico> y <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>) para determinar la generación eléctrica fotovoltaica y eólica, en donde según la generación de energía requerida se obtiene la totalidad de paneles solares y turbinas eólicas.

4.3. Evaluación de la factibilidad técnica de implementación de una planta desalinizadora en la localidad de Curahue

Con la finalidad de que este estudio sea de utilidad para poblaciones rurales o aldeas, es que se contempla una población máxima de 2000 habitantes, se escoge una localidad en la que la cantidad de habitantes se encuentre cercana al promedio de la población existente en las aldeas de Chile. Sumado a esto la zona de estudio debe encontrarse en el Decreto de zonas de escasas hídrica entregado por la DGA.

5. Resultados

5.1. Análisis de sistemas de abastecimiento de agua potable existentes frente a un desalinizador

En la Tabla 2 se detalla la generación de CO₂ de una electrobomba marca Humboldt usada comúnmente para el bombeo de agua.

Tabla 2. Emisión CO₂ bomba de uso común.

Electrobomba Humboldt	
Presión máxima	8 Bar
Caudal	127 l/min
Potencia	1 HP
Emisión CO ₂	0,328 kg

Fuente: www.sodimac.cl

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 2 es posible notar que existe una emisión de CO₂ de 0,328 kg.



En la búsqueda de abastecimiento de agua potable se analiza la captación de agua subterránea y superficial y uso de agua de mar, en donde en la Tabla 3 mostrada a continuación se presenta un análisis cualitativo de costo, vida útil, emisiones ambientales y disponibilidad de agua.

Tabla 3. Análisis cualitativo captación de agua subterránea y superficial con respecto a un desalinizador.

Parámetros	Captación agua subterránea y superficial		Desalinizador	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Costo	-Bajo costo de construcción y operación. -No requiere de especialistas para su manejo.	-Falta de fiscalización, no se tiene el debido cuidado de la fuente de obtención de agua.	-Tras mayor cercanía al borde costero el costo de implementación es menor, aun así, es posible implementarlo en sectores cordilleranos mediante tuberías.	-Alto costo energético, por lo que su implementación es costosa durante toda su operación. -Mayor costo en sectores cordilleranos.
Vida útil	-Caudal constante por al menos 20 años.	-Tras un largo y constante consumo se ven afectadas las fuentes de abastecimiento de agua dulce . -Se debe realizar una buena mantención para asegurar su durabilidad, además de una correcta desinfección y purificación del agua.	-Vida útil de 25 años en promedio y con un buen mantenimiento es posible extender su duración.	-Tras desgaste de bombas y equipos menores vida útil puede disminuir
Emisiones o aspectos ambientales	-Generan mínimas emisiones de CO2.	-Contaminación de acuíferos debido a infiltración de riles . -Su disponibilidad varía según ubicación geográfica, por lo que la explotación en la zona norte del país produjo escases de agua.	-Al utilizar energía renovable, se tiene una energía limpia sin emisión de contaminantes.	-Tras la desalación se generan desechos con alta concentración de salmuera.
Disponibilidad de agua	En zonas sin escases de agua es de fácil acceso.	Tras un uso prolongado y debido al calentamiento global	-Existe una gran disponibilidad de agua de mar para la implementación de desalinizadores, sequía no afecta al recurso. -Es posible ejecutar desalinizadores en lugares aislados del continente como islas, en las que las fuentes de agua dulce se encuentran disponibles en menor medida.	-Mayor dificultad de implementación en zonas cordilleranas
Fuente de energía	Se requiere de energía eléctrica la cual es de fácil disposición en Chile.	Los elevados costos asociados al consumo de energía eléctrica en Chile dificultan su funcionamiento.	La implementación de energías renovables disminuye los costos energéticos	-Requiere de alto consumo energético para funcionar

Fuente: Elaboración propia a partir de UNESCO (2015).

De la Tabla 3 es posible notar que el uso de agua potable mediante captación de agua subterránea o superficial existe de manera constante por al menos 20 años y es de bajo costo, pero esto depende de la ubicación geográfica y del tratamiento que se le dé al agua descargada.

5.2. Cálculo de dotación máxima de agua requerida, el consumo energético de un desalinizador y determinar la factibilidad de implementar aerogeneradores y paneles solares.

El último censo realizado entrega la información obtenida en la Tabla 4, correspondiente a la localidad seleccionada para estudio.

Tabla 4. Datos zona rural costera.

Región	Región de los Lagos
Provincia	Chiloé
Comuna	Quellón
Localidad	Curahue
Categoría	Aldea
Total, Habitantes	611
Hombres	311
Mujeres	300
Total viviendas	238

Fuente: INE 2017

La localidad de Curahue en la provincia de Chiloé perteneciente a la región de Los Lagos decretada como zona con escasez hídrica posee un total de 611 habitantes es seleccionada como la zona de estudio.

Con la información recabada en el Censo realizado el año 2002 junto con el Censo 2017 es posible determinar la tasa de crecimiento de la población mediante la ecuación (2), obteniendo una tasa de crecimiento de 0,51% visualizado en Tabla 5.

Tabla 5. Resultado tasa de crecimiento localidad de Curahue, comuna de Quellón, provincia de Chiloé, Chile.

Año	Curahue Habitantes	Tasa de crecimiento
2002	566	0,51%
2017	611	

Fuente: Elaboración propia.

En este estudio se determinará la población futura en 5, 10, 25 y 50 años, iniciando en el año 2021 y finalizando el año 2071 observado en la Tabla 6.

Tabla 6. Población futura, Curahue, provincia de Chiloé, región de los Lagos, Chile.

Curahue, Chiloé		
Año	n(años)	Habitantes
2017	CENSO	611
2021	0	624
2026	5	640
2031	10	656
2046	25	708
2071	50	805

Fuente: Elaboración propia.

Con una tasa de crecimiento de 0,51% se obtiene que al año 2071 existirá una población de 805 habitantes.

A partir de los datos obtenidos en la Tabla 6, población al año 5, 10, 25 y 50 años se estimó el consumo de agua potable máximo diario visualizado en la Tabla 7.

Tabla 7. Consumo máximo de agua potable en 5,10, 25 y 50 años para Curahue.

Año	Habitantes	Consumo máximo (L/día)
2021	624	140.400
2026	640	144.000
2031	656	147.600
2046	708	159.300
2071	805	181.125

Fuente: Elaboración propia.

En un plazo de 50 años, en el año 2071 existirán 805 habitantes con un consumo máximo de agua de 181.125 L/día, creciendo en cerca de un 22% con respecto al consumo máximo de agua al año 2021.

El estudio denominado Desalination at a glance (IDA, 2011) señala que en la actualidad el consumo de energía de una planta desalinizadora mediante osmosis inversa es de alrededor de 3 kWh/m³, obteniendo así el consumo energético en kWh en los años proyectados, además de la emisión de CO₂ presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Emisiones de CO₂ en 5, 10, 25 y 50 años para localidad de Curahue estimadas para una planta desalinizadora.

Año	Dotación máxima (m ³ /h)	Consumo (kWh)	Emisión CO ₂ (kg)
2021	5,85	17,54	7,18
2026	6,00	17,99	7,38
2031	6,15	18,46	7,59
2046	6,64	19,92	8,20
2071	7,55	22,64	9,27

Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de disminuir la emisión de CO₂ y en consecuencia la emisión de GEI se propone la implementación de aerogeneradores o paneles solares fotovoltaicos dependiendo de las condiciones del lugar, en este caso se estudia la localidad de Curahue, mediante el explorador de energía eólica entregado por el Gobierno de Chile. Se analiza la zona de estudio, en la Figura 4 se visualiza el promedio mensual de la velocidad del viento, correspondiente a una velocidad promedio anual de 6,2 m/s a una altura de 25 msnm. Un estudio realizado por Park, G.L. ; Richards, B.S. ; Schäfer, A.I., (2009) indica que es posible implementar aerogeneradores desde una velocidad del viento de 5 m/s, por lo que de acuerdo a esta información, es factible la implementación de aerogeneradores en Curahue. En este caso se requiere de 4 aerogeneradores para generar 24 kWh, siendo la energía solicitada de 22,64 kWh, utilizando el modelo Lagerwey FB18 con una potencia nominal de 80 kW a los 13 m/s y un diámetro de rotor de 18 metros.

El explorador de energía solar facilitado por el gobierno de Chile entrega la radiación anual y generación fotovoltaica mensual promedio, las figuras 9 y 10 indican valores respectivos a la zona de estudio, en donde se requerirá de un área de 6,25 m² para la instalación de paneles fotovoltaicos, obteniéndose una generación mínima de energía de 36 kWh durante los meses de junio y julio, estando un 36% por encima de lo requerido en la zona de estudio.

Como se observa, Curahue presenta las condiciones necesarias para la implementación de aerogeneradores y paneles solares fotovoltaicos. De esta manera es posible realizar el mismo análisis en cualquier zona rural costera.

5.2. Evaluación de la factibilidad técnica de implementación de una planta desalinizadora en la localidad de Curahue.

A continuación, se visualiza Tabla 9, donde se indican ventajas y desventajas de una planta desalinizadora en la localidad de Curahue.

Tabla 9. Análisis ventajas y desventajas del uso de energía solar y eólica.

Ventajas	Desventajas
-No emite contaminación ambiental.	-No es un recurso constante, según zona se debe complementar ya que los desalinizadores requieren de energía constante sin interrupción.
-No produce desechos durante su operación.	
-De gran accesibilidad, se encuentra disponible en todo el mundo, solo varía en intensidad.	
-Obtención de recurso de manera gratuita.	

Fuente: Elaboración propia a partir de IDAE (2006)

Principalmente con la finalidad de disminuir emisiones de CO₂ se propone la implementación de energía solar o eólica en el sector para abastecer de energía a la planta desalinizadora ya que al generar esta energía no se producen desechos durante su operación y es de gran accesibilidad, pero al no ser recursos constantes varían durante el año por lo que se debe complementar con otra fuente de energía.

En la Tabla 10 mostrada a continuación es posible observar la nomenclatura utilizada para realizar la comparación de los diversos sistemas de abastecimiento de agua potable.

Tabla 10. Nomenclatura comparativa sistemas de agua potable

Favorable	-1
Neutralidad	0
Desfavorable	+1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resumen comparativo de los diversos sistemas de abastecimiento de agua potable.

	Captación subterránea y superficial de agua dulce	Agua lluvia	Desalinizador	
Disponibilidad actual del recurso	-1	-1	1	-1
Recurso perpetuo	-1	1	1	1
Vida útil	-1	1	1	1
Alteración de ecosistema	-1	0	-1	-2
Generación de residuos	1	0	-1	0
Facilidad de implementación	1	1	-1	1
Costo de construcción y operación	1	1	-1	1
Requiere de especialistas	0	1	-1	0
Consumo energético	0	1	-1	0
Emisiones CO ₂	1	0	-1	0
Influencia del calentamiento global	-1	-1	1	-1
Interferencia a la calidad de vida	1	0	-1	0
Disminución del recurso tras el uso	-1	0	1	0
	-1	4	-3	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los parámetros establecidos para captación de agua subterránea o superficial se tiene que los factores que afectan a este tipo de analogía tiene que ver con influencia del calentamiento global, vida útil y disponibilidad actual del recurso, por otro lado la mejor alternativa natural es la captación de aguas lluvias ya que no afecta el ecosistema, no se ve disminuido el recurso tras el uso, es un recurso perpetuo y su implementación no conlleva grandes dificultades, siendo mayormente afectada por una baja disponibilidad de agua, influencia del calentamiento global y la vida útil de esta, luego se encuentra el abastecimiento de agua mediante desalinizador, donde es el único sistema estudiado que no es influenciado por el calentamiento global y la disponibilidad actual del recurso se encuentra de manera favorable. Así los parámetros más representativos es la alteración al ecosistema, recurso perpetuo, vida útil, facilidad de implementación, costo de construcción y operación

6. Discusión

Los sistemas de abastecimiento de agua potable comunes utilizan bombas para la captación y distribución de agua, en donde la fuente de energía es la electricidad, en una bomba de uso común con una potencia de 1 HP se tiene una emisión de 0,328 kg de CO₂. En Chile, la electricidad es

generada principalmente por fuentes térmicas. Generadoras de Chile (2020) indica que en Chile actualmente cerca de un 50% de la energía es generada a través de fuentes térmicas, la cual produce efectos nocivos al ecosistema y a la sociedad, en consecuencia, se debe optar por energías limpias, libres de contaminación como lo es la energía solar y eólica.

Mediante el análisis comparativo se obtuvo que la utilización de aguas lluvias como método de abastecimiento de agua potable soluciona los problemas de contaminación y alteración al ecosistema producido por los demás sistemas, pero este sistema no puede ser utilizado de manera independiente ya que debe cumplir con la demanda de agua de la población y no se asegura disponibilidad de agua lluvia en todas las estaciones del año, por lo que no es posible contar únicamente con abastecimiento de agua potable mediante agua lluvia. Con respecto a la desalinización de agua de mar como fuente de abastecimiento de agua potable, el ecosistema es interferido en mayor magnitud que como lo hace la captación de agua subterránea, pero posee mayores beneficios, como que la fuente de abastecimiento no disminuye tras su uso, es un recurso perpetuo y no es influenciado por el calentamiento global.

La localidad de Curahue, identificada por el INE como zona rural, con 611 habitantes al año 2017, en la actualidad requiere de una dotación de agua potable de 140,4 m³/día, emitiendo más de 62 toneladas de CO₂ al año, por lo que para disminuir la emisión GEI se estudió la implementación de paneles solares y aerogeneradores para generar energía, debido a que se tiene una velocidad de viento promedio de 6,2 m/s con un rango de velocidades entre 4,99 m/s y 7,97 m/s los aerogeneradores funcionarán en su potencia mínima por lo que en este caso no se recomienda la implementación de aerogeneradores como única fuente de energía, pero de manera contraria la generación fotovoltaica mensual promedio en la zona, indica que es posible abastecer de energía a la población por 50 años, generando en promedio un 50% más de energía con respecto a la generación de energía a través de aerogeneradores, durante todo el año inclusive en temporada de invierno, en donde el promedio mínimo de generación fotovoltaica mensual ocurre en junio y julio y es de 36 kWh.

Respecto a las plantas desalinizadoras, se tiene que, una de las mayores desventajas ambientales, es la emisión de CO₂ al ambiente, por lo que estas se ven disminuidas implementando energías renovables como las estudiadas, pero a cambio, se tiene un mayor costo de inversión. Sin embargo, se disminuyen los costos asociados a energía.

Si bien no fue parte de este estudio, es necesario mencionar que la implementación de este tipo de plantas debe considerar manejo de residuos según la legislación ambiental vigente, con el objetivo de evitar consecuencias dañinas en el área de vertido resultante del proceso de desalinización mediante

osmosis inversa, ya que genera un caudal de agua con una alta concentración de sal, la cual se regresa al mar en mayores proporciones, por lo que estas aguas son tratadas con la finalidad de eliminar cualquier mineral presente tras el paso por el sistema de osmosis inversa. BCN (2016) ha estudiado el impacto de las descargas producidas en el mar en donde se realizó un análisis de los organismos marinos, indicándose que el vertido de la salmuera en el medio marino costero podría producir efectos negativos sobre las comunidades vegetales y animales de organismos marinos, llegando a destruir o modificar estructuras ecológicas.

7. Conclusión

En busca de solucionar la escasez hídrica en zonas rurales costeras se propone la implementación de una planta desalinizadora abastecida mediante energía solar y/o eólica para disminuir los costos energéticos, así como también la emisión de CO₂ tras los consumos de energía necesarios para el funcionamiento de la planta. Con la finalidad de evaluar la puesta en marcha de desalinizadores con paneles solares o aerogeneradores se debe realizar este estudio mediante plataforma web, procurando que la zona de estudio tenga una velocidad del viento mayor a 5 m/s, como también una generación fotovoltaica capaz de abastecer el consumo energético requerido por la población

Tras los resultados obtenidos, se concluye que es factible la implementación de plantas desalinizadoras para obtención de agua potable en las localidades rurales cercanas a la costa, ya que suple el requerimiento de agua, teniendo una mayor disponibilidad actual del recurso y sin existir disminución del recurso tras su uso.

La localidad de Curahue denominada por la DGA como zona con escasas hídrica en el año 2021 posee graves problemas de sequía, provocando pérdidas de cultivos, hambre, desnutrición, pobreza, entre otros, ya que el agua dulce es un factor fundamental para la vida humana. Según el estudio realizado, para esta localidad, se recomienda la implementación de 4 turbinas eólicas de 18 metros de diámetro de rotor como única fuente de energía para abastecer una planta desalinizadora, no siendo factible la ejecución de paneles solares fotovoltaicos.

La implementación de una planta de desalinización para abastecimiento de agua potable alimentada con energía eólica puede suplir la necesidad de abastecimiento de este recurso para una localidad como Curahue, pues esta tecnología trabaja con un recurso de mayor disponibilidad (agua salada), lo que aumenta su vida útil. Además, con el rápido aumento de la escasez de agua dulce no existirá otra alternativa que implementar plantas desalinizadoras, para lo cual se debe buscar su implementación

de la manera menos invasiva posible, con la menor emisión de GEI, utilizando energía limpia para su operación.

7. Bibliografía

- World Bank. (2007). The World Bank Annual Report 2007.
- Fundación Amulen, La fundación del agua (2019) Radiografía del agua potable rural en Chile: Pobres de agua.
- Agüero Pittman, R. (1997). Agua potable para poblaciones rurales; sistemas de abastecimiento por gravedad sin tratamiento (No. P10 A34). Asociación de Servicios Educativos Rurales, Lima (Peru).
- Aladyr, Asociación latinoamericana de desalación y reúso de agua (2019). Desalación de agua de mar: Situación en Chile y en el mundo.
- Colomina, J. (2016). Diseño de una planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa para producir 20.000 m³/día.
- Al-Karaghoulí, A., Renne, D., & Kazmerski, L. L. (2009). Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions.
- Escenarios hídricos 2030 (2017) Radiografía del agua, brecha y riesgo hídrico en Chile
- MOP (2013) Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025. Chile
- Chile cuida su agua. Estrategia Nacional de recursos hídricos 2012-2025.
- WACCLIM (2017) Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del agua
- Estevan, A., & García, M. (2007). El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa: situación actual y perspectivas.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2016) Funcionamiento e Impacto del proceso de desalinización de agua de mar.
- González (2019) Estudio de viabilidad técnica y económico-financiera para la construcción, explotación y mantenimiento de una desaladora de agua de mar.
- Roberts, Johnston, Knott (2010) Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies.
- Baeza, Vivanco Harris (2019) La desalinización de agua de mar: tecnologías, regulaciones y efectos ambientales.
- Park, G.L. ; Richards, B.S. ; Schäfer, A.I. (2009) Potential Potential of wind-powered renewable energy membrane systems for Ghana, Desalination

- Claudio-Gómez, O. G. (2018). Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría). Centro de investigaciones en óptica. León, Guanajuato).
- Landeta Terán, J. A., & Mayorga Morales, P. A. (2010). Diseño y simulación de un sistema desalinizador de agua de mar con capacidad de producción de 400 litros diarios mediante la utilización de energía eólica (Bachelor's thesis).
- Abdulla, F.A. and Al-Shareef, A. Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan. October, (2006), 291-300.
- INE. Censo, ciudades, pueblos aldeas y caseríos 2019.
- DGA (2019) Manual de proyectos de agua potable rural.
- International Desalination Association (2011). Desalination at a glance.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE (2006). Manual energía solar
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE (2006). Manual energía eólica
- Decreto de fuerza de ley N°30 (2015). Artículo N°3
- Martín y Sanchez (2005) Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras. Nuevos sistemas de recuperación de energía. Ingeniería y Territorio, n°72. Barcelona
- Aladyr, Asociación latinoamericana de desalación y reúso de agua (2018). La desalinización de agua es una alternativa compatible con el medio ambiente.
- Clark, G. F., Knott, N. A., Miller, B. M., Kelaher, B. P., Coleman, M. A., Ushiyama, S., & Johnston, E. L. (2018). First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics.
- Torras, L. (2017). El Agua: el petróleo del Siglo XXI. Foro Economico Mundial.
- Richey, A., Thomas, B., Lo, M., Reager, J., Famiglietti, J., Voss, K. y Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE.
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico- OCDE. (2012). Environmental outlook to 2050: The consequences of inaction.
- Solar, E. (2017). Ministerio de Energía. Explorador Solar.
- Meza, L., Corso, S., Soza, S., Hammarskjöld, A. D., de Estudios, O., & Agrarias-ODEPA, P. (2010). Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Registro pesquero artesanal (2019). Servicio nacional de pesca y acuicultura.



8. Linkografía

- <https://www.fundacionaquae.org/cifras-sobre-la-desalinizacion/>
- <https://ecodes.org/tiempo-de-actuar/hogares-sostenibles/ahorro-energetico/calculadora-electricidad>
- <https://solar.minenergia.cl/fotovoltaico>
- <http://eolico.minenergia.cl/exploracion>

9. Anexos

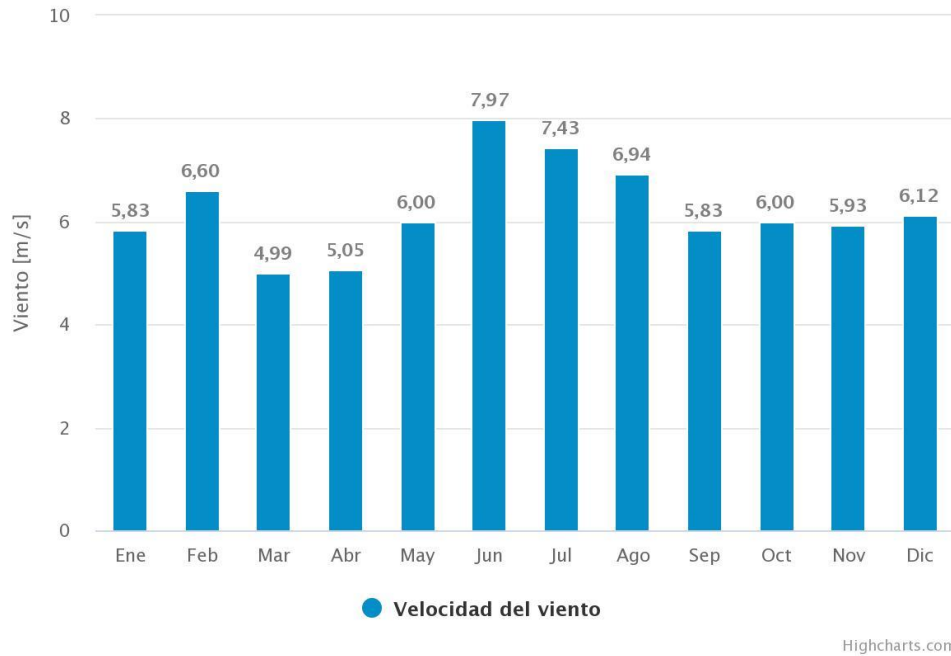


Figura 3. Ciclo anual de velocidad del viento a 100 [m], Curahue, región de Los Lagos, Chile
 Fuente: Explorador eólico, Ministerio de Energía.

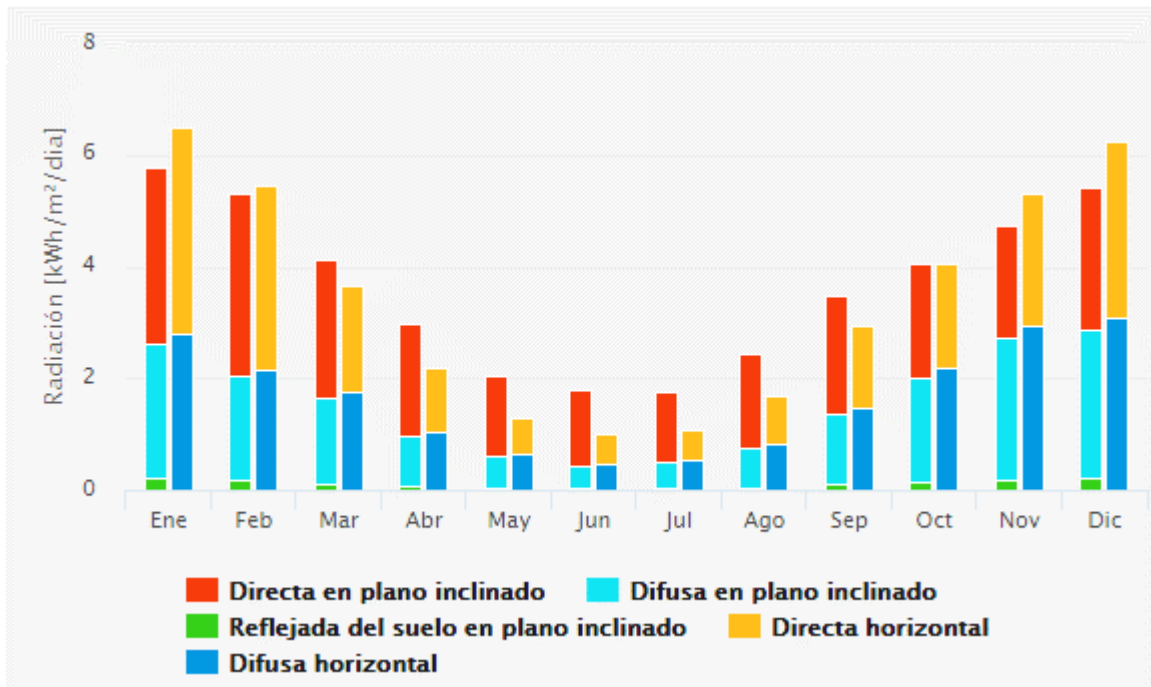


Figura 4. Variación anual de la radiación, Curahue, región de Los Lagos, Chile.
 Fuente: Explorador de energía solar, Ministerio de Energía.

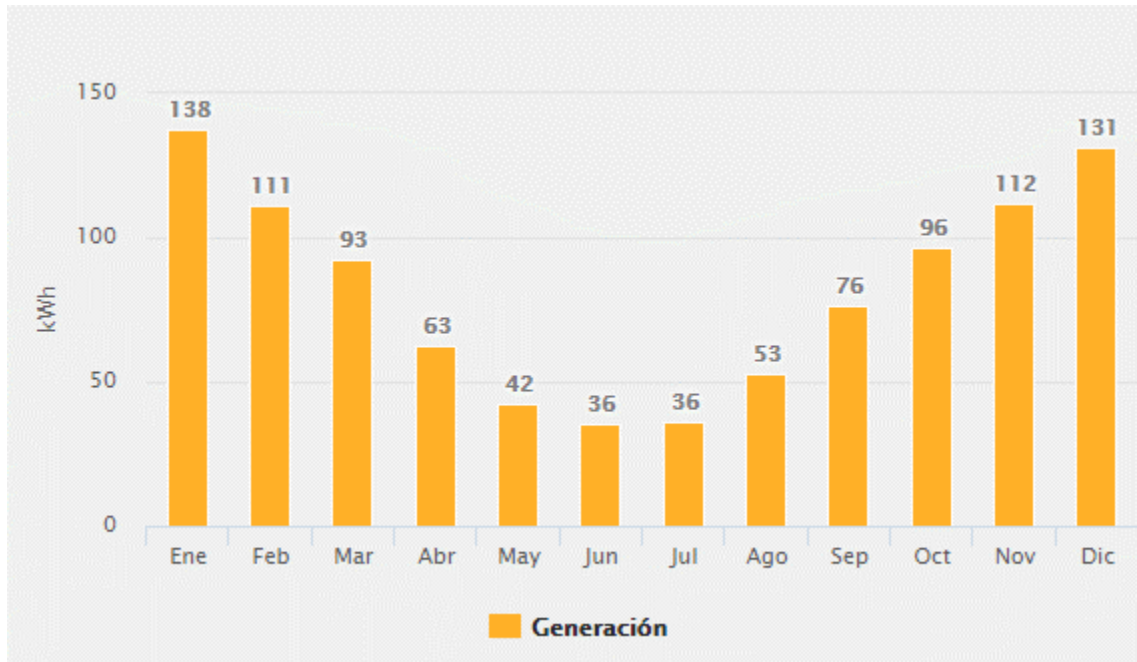


Figura 5. Generación fotovoltaica mensual promedio, Curahue, región de Los Lagos, Chile.

Fuente: Explorador de energía solar, Ministerio de Energía.

Fuente: Generadoras de Chile (2020)

Tabla 14. Análisis de datos.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Generación edifica mensual promedio	12	23,85	71,49	40,9500	17,85658
Generación fotovoltaica mensual promedio	12	36,00	138,00	82,2500	36,51183
N válido (según lista)	12				

Fuente: Elaboración propia

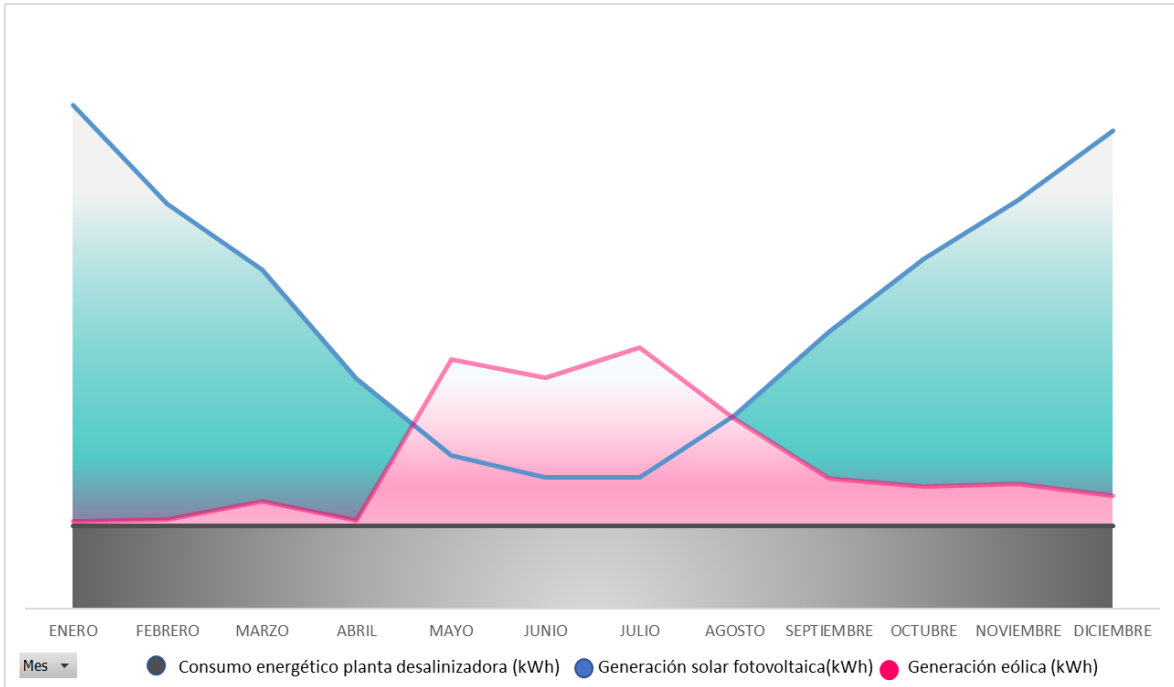


Figura 6. Comparación generación de energía solar y eólica con respecto al consumo energético requerido por la localidad de Curahue, región de Los Lagos, Chile.

Fuente: Elaboración propia.