



**Universidad de Concepción**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

Ingeniería Ambiental

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA RENOVABLE  
EÓLICO/FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO  
DEL SERVICIO SANITARIO RURAL DE PEHUÉN, COMUNA DE LEBU.  
TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE Ingeniera Ambiental.

Por: Isidora Belén Fernández Mardones

Profesor guía: Dra. Ana Carolina Baeza Freer

Concepción, Chile, agosto del 2023



**“Evaluación de un sistema híbrido de energías renovables Eólico/Fotovoltaico para abastecimiento eléctrico de servicio sanitario rural en la localidad de Pehuén, comuna de Lebu”**

**Profesor Guía: Dr. Carolina Baeza Freer**

**Profesor Comisión Dra. Patricia González Sánchez**

**Profesor Comisión: Dr. Ricardo Figueroa Jara**

**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima ( En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, octubre 2023**

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	i
INDICE DE TABLAS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
RESUMEN.....	vi
1. Introducción.....	1
1.1. Abastecimiento y seguridad del agua .....	1
1.2. Servicios Sanitarios Rurales .....	2
1.2.1. Ley N° 20.998 Regula los Servicios Sanitarios Rurales .....	3
1.2.2. Desafíos para los Servicios Sanitarios Rurales en Chile.....	5
1.3. Energías renovables en el sector sanitario .....	6
1.3.1. Selección y diseño de sistemas híbridos de energía renovable .....	8
1.4. Servicio Sanitario Rural Pehuén .....	10
1.5. Pregunta de investigación.....	12
1.6. Objetivos.....	12
1.6.1. Objetivo general .....	12
1.6.2 Objetivos específicos .....	12
2. Antecedentes .....	13
2.1 Área de estudio.....	13
2.1.1 Clima área de estudio .....	15
2.1.2 Radiación .....	16
2.1.3. Nubosidad .....	17
2.1.4. Red hidrográfica .....	18
3. Metodología.....	19
3.1. Caracterización del consumo de energía eléctrica del SSR .....	19
3.1.1. Auditoría energética .....	19
3.1.2. Validación.....	20
3.2. Potencial de recurso renovable disponible en el SSR. ....	21
3.2.1. Caracterización potencial solar .....	21
3.2.2. Caracterización potencial eólico.....	22
3.3. Selección de sistema óptimo para abastecer la demanda eléctrica del SSR .....	22

3.3.1. Supuestos y limitaciones.....	23
3.3.2. Creación de alternativas de sistemas híbridos de ER a través del software HOMER .....	24
3.3.3. Selección de sistemas óptimos. ....	32
4. Resultados y discusión.....	35
4.1. Demanda eléctrica SSR.....	35
4.1.1. Auditoría energética de SSR.....	35
4.1.2. Consumo eléctrico mensual estimado y validado con boletas Planta de tratamiento de agua potable y captación Pehuén. ....	36
4.2. Potencial de recurso renovable disponible .....	37
4.2.1. Recurso eólico.....	38
4.2.2. Recurso solar .....	40
4.3. Selección de sistema óptimo para abastecer la demanda eléctrica del SSR. ....	43
4.3.1. Variables de entrada HOMER Energy.....	43
4.3.2. Resultados sistemas posibles HOMER Energy .....	44
4.3.3. Selección de sistema óptimo.....	49
4.3.4. Características opción óptima .....	51
4.3.5. Características segunda opción óptima .....	54
4.3.6. Análisis comparativo de sistemas escogidos .....	58
5. Conclusiones.....	60
6. Referencias .....	62

## INDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Coordenadas localidad de Pehuén .....	13
Tabla N°2. Etapas SSR .....	15
Tabla N° 3. Creación de ciclo diario anual de demanda de energía eléctrica Servicio Sanitario Rural .....	19
Tabla N°4. Validación mediante datos de boletas de energía eléctrica periodo 2017-2022 .....	20
Tabla N°5. Presupuesto entregado por PIRDT a iniciativas de APR en la provincia de Arauco.....	24
Tabla N°6. Condiciones económicas ingresadas a HOMER.....	25
Tabla N°7. Variables de entrada HOMER .....	26
Tabla N°8. Modelos de equipos generadores de energía escogidos para evaluación .....	27
Tabla N°9. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas híbridos .....	28
Tabla N°10. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas abastecidos sólo por energía eólica. ....	29
Tabla N°11. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas abastecidos sólo por equipos fotovoltaicos .....	30
Tabla N°12. Variables de salida HOMER .....	31
Tabla N°13. Auditoría energética equipos plantas SSR .....	35
Tabla N°14. Variables de entrada HOMER Energy demanda energía eléctrica y potencial de recurso renovable.....	44
Tabla N°15. Características sistema óptimo .....	51
Tabla N°16. Producción anual por componente sistema óptimo .....	53
Tabla N°17. Estimación de energía producida por la solución consumida por el SSR y excedente para venta a la red .....	53
Tabla N°18. Características segundo sistema óptimo .....	55
Tabla N°19. Producción anual por componente segundo sistema óptimo ...	56
Tabla N°20. Estimación de energía producida por la segunda solución consumida por el SSR y excedente para venta a la red.....	57
Tabla N°21. Análisis comparativo entre ambos sistemas óptimos. ....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Esquema de abastecimiento de energía eléctrica para tratamiento de agua potable a través de sistema fotovoltaico/eolico on-grid .....	7
Figura N°2. Mapa área de estudio.....	14
Figura N°3. Climograma característico de la zona de estudio.....	16
Figura N°4. Radiación en zona de estudio. ....	17
Figura N°5: Frecuencia de nubosidad Pehuén.....	17
Figura N°6. Mapa red hídrica Pehuén. ....	18
Figura N°7. Representación esquemática de Homer. ....	25
Figura N°8. Método de selección conjunto de sistemas óptimos según mayor autonomía. ....	33
Figura N°9. Método de selección conjunto de sistemas óptimos según indicador.....	34
Figura N° 10. Matriz ciclo diaria anual de consumo eléctrico de Sistema Sanitario Rural completo. ....	36
Figura N°11. Grafico boxplot de consumo eléctrico mensual periodo 2017-2022. ....	37
Figura N°12. Perfil vertical mensual Pehuén.....	38
Figura N°13. Ciclo diario anual velocidad de viento a 20 metros de altura. ....	40
Figura N°14. Gráfico promedio diario mensual de radiación en plano horizontal en Pehuén. ....	41
Figura N°15. Ciclo diario anual radiación Pehuén.....	42
Figura N°16. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas híbridos.....	45
Figura N°17. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas eólicos. ....	47
Figura N°18. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas fotovoltaicos.....	48
Figura N°19. Indicador kWh producidos por el sistema 20 años / Capital inicial USD.....	50
Figura N°20. Producción de energía eléctrica mensual por componente.....	52
Figura N°21. Producción de energía eléctrica mensual por componente segundo opción sistema óptimo. ....	55

## **AGRADECIMIENTOS**

Junto con la entrega de mi tesis, se finaliza una etapa de mi vida que me entregó mucho más de lo que siempre soñé, del camino recorrido me llevo aprendizajes, fortaleza, y el amor y apoyo incondicional de las personas que están presentes en mi vida.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Karen y Rodrigo, que desde pequeña y hasta hoy me entregaron el amor, la dedicación y todas las herramientas a su alcance para que yo pudiese lograr todas las metas que me propusiera. A mis hermanos Maximiliano y Gisella por siempre mantener mi corazón alegre.

A mis abuelos, Mafalda, Luis, y Silvia, por siempre creer en mis capacidades y darme aliento para continuar en los momentos difíciles.

A mi pareja Luciano, por ser mi refugio y contención frente a todos los obstáculos del proceso de mi tesis.

También quiero agradecer a la familia que uno escoge, mis amigos, los que traigo desde antes de entrar a la carrera, que no sólo han estado en los momentos más felices de mi vida, sino que también durante los más difíciles. A mis amigos de ingeniería ambiental con quienes crecí y construí el CEE 2022, en donde juntos pudimos llevar a cabo una importante responsabilidad con éxito y alegría.

Quiero agradecer a los docentes y funcionarios de ingeniería ambiental UdeC, personas que se destacan por su calidad humana en el proceso de aprendizaje de los alumnos de la carrera.

Para finalizar quiero agradecer al Servicio Sanitario Rural de Pehuén, por su colaboración y excelente disposición en cada visita de terreno.

## RESUMEN

Los Servicios Sanitarios Rurales desempeñan un papel fundamental en la provisión de agua potable y saneamiento en las localidades rurales del país. Es crucial que estos servicios garanticen un acceso seguro y continuo al agua potable y saneamiento. El Servicio Sanitario Rural de Pehuén comenzó a operar en 1980 y en la actualidad abastece a más de 500 familias que residen en la localidad de Pehuén, ubicada en la comuna de Arauco.

La Ley 20998, promulgada en 2016, regula los servicios sanitarios rurales y exhorta a los Servicios Sanitarios Rurales a incluir la expansión del sistema en su planificación, al mismo tiempo que brinda herramientas para acceder a financiamiento.

La implementación de equipos generadores de energía renovable para abastecer de energía eléctrica los procesos sanitarios puede ofrecer diversas ventajas, como aumentar la autonomía y reducir los costos operacionales. En el caso de estudio del Servicio Sanitario Rural de Pehuén, se evaluó cuál es el sistema híbrido de energía renovable óptimo para abastecer los procesos del servicio, priorizando la consecución de una mayor autonomía del sistema. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando el software HOMER Energy, el cual es un software de optimización híbrida de múltiples fuentes de energía.

El año 2022, el Servicio Sanitario Rural de Pehuén consumió 167.318kWh de energía eléctrica, lo cual tuvo un costo de \$25.453.620 de pesos. Se obtuvo como resultado óptimo considerando variables económicas y de autonomía, un sistema de ERNC que combina 3 turbinas eólicas de 20kW de potencia y 3 paneles solares de 7,2kW de potencia, el cuál alcanza un 80,9% de autonomía,



autonomía que reduce en directa proporción el gasto en energía eléctrica a la red.

Este sistema óptimo permite obtener beneficios de venta de excedente de energía a compañías eléctricas.

Las energías renovables pueden utilizarse a pequeña y mediana escala, tanto a nivel doméstico como comunitario, como es el caso del Servicio Sanitario Rural de Pehuén, el cual es un servicio comunitario. La implementación de un sistema de producción de energía renovable para abastecer el servicio sanitario tiene un impacto directo en los usuarios, mejorando las condiciones de acceso para toda la comunidad.

## **1. Introducción**

### 1.1. Abastecimiento y seguridad del agua

El acceso al agua potable y al saneamiento son derechos humanos (ONU, 2020), otorgando beneficios al bienestar humano más allá de su impacto en la salud.

El agua es un recurso indispensable e irremplazable que garantiza las necesidades básicas humanas como lo son alimentación e higiene.

El suministro y saneamiento de agua, asegura el funcionamiento eficiente de las comunidades. (Kotulla, M. et al 2022)

El ODS 6 tiene como objetivo: "Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos", bajo la evaluación de indicadores que permitan conseguir esta meta. Actualmente 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros y 6 de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura (ONU, 2015). Sin embargo países con acceso casi universal al agua como lo es Chile, aún enfrentan problemas como lo son, servicios intermitentes, adecuado pago de tarifas, inequidad, y la falta de prácticas sustentables para mantener el suministro de agua. (Nelson-Nuñez, J. et al, 2019)

En Chile las comunidades más afectadas en cuanto al abastecimiento de agua potable y saneamiento son las localidades rurales, mientras que el 99,93% de la población urbana tiene acceso a agua potable, el sector rural alcanza un 88%, mientras que en el caso del acceso a alcantarillado la población rural sólo alcanza un 21% de cobertura (SISS, 2019).

El acceso al abastecimiento de agua potable y saneamiento en el 70% población rural en Chile es mediante Servicios Sanitarios Rurales. (MOP, 2018)

## 1.2. Servicios Sanitarios Rurales

Los Servicios Sanitarios Rurales en Chile se establecieron en 1964 bajo el nombre de Agua Potable Rural (APR), ya que en ese momento sólo aproximadamente el 6% de los habitantes de las áreas rurales tenía acceso a agua potable. Este programa tiene una cobertura nacional y, desde 2001, es ejecutado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Anteriormente, hasta principios de la década de 1990, cuando desapareció el Servicio Nacional de Obras Sanitarias, el programa estaba a cargo de la Dirección de Planeamiento del MOP (Donoso et al., 2015).

Actualmente se estima que la población rural en Chile es de aproximadamente 2,4 millones de personas, y el Programa de Agua Potable Rural de la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP atiende a 1.727.539 personas a través de 1.876 sistemas en funcionamiento hasta el año 2017 (MOP, 2018). En el momento de la creación del Programa de agua potable rural el objetivo era abastecer de agua potable a la población rural, para el día de hoy, un 88% de la población en Chile cuenta con acceso a agua potable (Donoso et al., 2018).

A pesar de tener una alta cobertura de población rural con acceso a agua potable, es necesario avanzar en saneamiento, para así disminuir la brecha en el tratamiento de aguas servidas entre la población rural y la población urbana. En relación con esta temática se presenta un retraso en el país en comparación con realidades de países de mayor desarrollo. Al respecto, en Europa y Norteamérica en el ámbito rural la conexión a sistemas de alcantarillado y al tratamiento de las aguas servidas alcanza al 50 y 47%, respectivamente, muy superior al 21% y 17% que se informa de Chile (Banco mundial, 2021).

Ante estos desafíos, fue necesaria la transformación desde el Programa de Agua Potable Rural hacia los ahora llamados Servicios Sanitarios Rurales, esto sucede bajo la promulgación de la Ley 20.998 que regula los Servicios Sanitarios Rurales.

#### 1.2.1. Ley N° 20.998 Regula los Servicios Sanitarios Rurales

En el año 2017, se promulgó la ley 20.998, la cual regula los Servicios Sanitarios Rurales y marca la transición desde los sistemas de Agua Potable Rural (APR) hacia los Servicios Sanitarios Rurales (SSR). Esta ley, promovida por el Ministerio de Obras Públicas, entró en vigencia el 20 de noviembre de 2020. Con su implementación, se ha logrado un avance significativo en el suministro de agua potable y saneamiento para los habitantes de las zonas rurales de Chile.

La ley 20.998 reconoce a las organizaciones sociales como los operadores y administradores de los servicios sanitarios en sus respectivos territorios. Además, establece el papel del Estado como proveedor de infraestructura, encargado de ejecutar obras para los servicios existentes y nuevos. Esta legislación ha fortalecido la participación de la comunidad en la gestión de los servicios sanitarios y garantiza su acceso en el ámbito rural (SISS, 2020).

En el marco de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), se ha creado la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales, la cual tiene como funciones principales asesorar, capacitar y brindar apoyo a los SSR durante la transición hacia la ley 20.998 y asegurar su pleno funcionamiento.

La ley 20.998 establece cuatro etapas para los Servicios Sanitarios Rurales

1. Producción de agua potable.
2. Distribución de agua potable.
3. Recolección de aguas servidas.
4. Tratamiento y disposición final de aguas servidas.

La nueva ley insta a los comités de SSR a incluir la expansión del sistema en su planificación, y junto con ello, entrega herramientas para acceder a financiamiento.

Una vez que se implemente la ley, los comités APR y las cooperativas deben tener postular a una licencia para poder administrar los Servicios Sanitarios Rurales.

Para esta obtener esta licencia, los Servicios Sanitarios Rurales deben certificar lo siguiente:

1. Derechos de agua
2. La cantidad, calidad y continuidad de su abastecimiento de agua;
3. Fondos de reserva como garantía de servicio
4. Un plan de inversiones aprobado por la Subdirección
5. Aprobación de los estados financieros por la Subdirección
6. Informe positivo de la gestión de la Subdirección
7. Un programa de precios aprobado.

### 1.2.2. Desafíos para los Servicios Sanitarios Rurales en Chile

A pesar de pasar de un 6% de población rural abastecida de agua potable en el año 1964 con la creación del PAPR, a un 88% de la población rural abastecida de agua potable para el año 2017 (Donoso et al. 2018), luego de la instalación de nuevos Servicios Sanitarios Rurales, con el tiempo han presentado problemas en abastecimiento de agua potable en cantidad, calidad y continuidad.

Por lo tanto, los Servicios Sanitarios Rurales identifican desafíos reales y necesidad de reformulaciones.

En términos de continuidad del servicio, más de la mitad de los Servicios Sanitarios Rurales presentaron cortes en el servicio en un periodo de seis meses (Fuster et al. 2016). Para enfrentar la discontinuidad en los servicios sanitarios, es clave identificar cuáles son las causas, dentro de las cuales se ha identificado principalmente, fallas en infraestructura, escasez hídrica, falta de recurso humano, e interrupción del suministro eléctrico. Es por aquello que la ley 20.998 exige planes de mantenimiento con plazos de más de un año ya que son necesarios para garantizar la continuidad del sistema, dentro de estos planes se considera la inversión en reparación, conservación, y ampliación de los servicios sanitarios rurales. Sin embargo, estas inversiones se ven limitadas bajo el segundo desafío al cual se enfrentan los servicios sanitarios rurales, el cual es el financiamiento y el pago adecuado de tarifas. Dado que la capacidad económica de los SSR proviene en la mayoría de los casos, de sus ganancias por suministro del servicio sanitario. A nivel nacional, el 63% de los servicios sanitarios rurales no generan suficientes ingresos para pagar sus propias inversiones y así poder lograr la autosuficiencia. Esto también se puede ver implicado en tarifas elevadas para poder cubrir los gastos del servicio.

Parte importante de los gastos de los SSR están asociados al consumo eléctrico, el cuál es imprescindible para los procesos como captación de agua potable y tratamiento de agua potable y aguas servidas, los cuales dependen de energía eléctrica.

El consumo eléctrico es raíz de dos problemas que son parte de los desafíos de los servicios sanitarios rurales, en primer lugar los altos costos para los usuarios que implica el consumo eléctrico de los procesos del servicio, y en segundo lugar la discontinuidad de los servicios sanitarios por interrupción del suministro eléctrico. Una solución que aborde el abastecimiento eléctrico puede ayudar a superar estos dos desafíos en torno a la continuidad y costos del servicio sanitario.

### 1.3. Energías renovables en el sector sanitario

Las energías renovables actualmente satisfacen distintos tipos de producción de energía, así como existen centrales eléctricas que inyectan energía al sistema interconectado, también las energías renovables se presentan como una solución de autoabastecimiento energético.

Los sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua son considerados parte de la denominada "infraestructura crítica" (ASCE, 2009). Esto se debe a que su operación continua es crucial para garantizar la seguridad de las comunidades y prevenir riesgos para la salud pública.

Dado que los sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua dependen de la energía eléctrica, el sector sanitario debe estar preparado para hacer frente a posibles interrupciones en el suministro energético.

La implementación de energías renovables para satisfacer la demanda de energía eléctrica de los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) puede ofrecer

ventajas significativas. Estas ventajas incluyen la autonomía parcial o total del servicio, así como la reducción de los costos de energía eléctrica del SSR, lo que se traduce en una disminución en los cobros realizados a los usuarios del servicio.

Según las Naciones Unidas, las energías renovables son aquellas que se derivan de fuentes naturales que tienen la capacidad de reponerse más rápidamente de lo que se consumen.

Se ha demostrado que un sistema híbrido eólico/FV conectado a la red (Figura N°1) puede ayudar a hacer frente a los futuros riesgos de variación de precios y alcanzar el índice de autosuficiencia factible de hasta 95% del sistema (Wang et al. 2018).

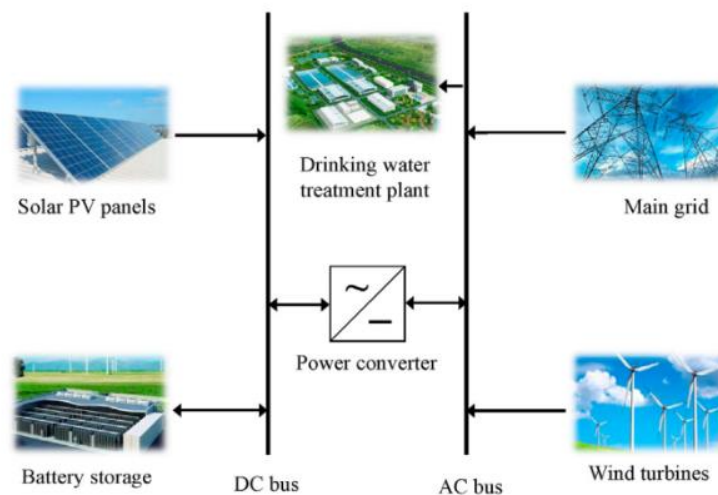


Figura N°1. Esquema de abastecimiento de energía eléctrica para tratamiento de agua potable a través de sistema fotovoltaico/eólico on-grid

*Fuente:* Wang et al. 2018

Desde mediados de la década de 1990 hasta la actualidad, se ha producido una importante transición hacia el uso de energías renovables. Esta transición se ha dado gracias a cuatro dimensiones críticas. En primer lugar, la disminución de los costos de inversión. En segundo lugar, el respaldo de políticas públicas y



beneficios fiscales. En tercer lugar, las fluctuaciones en los precios y la disponibilidad de combustibles fósiles, que están asociados a riesgos geopolíticos. Y, por último, el agotamiento de los recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionados con las fuentes de energía no renovable (Wang et al., 2022). Estas ventajas competitivas han generado un mercado más diverso en términos de equipos disponibles, lo que permite encontrar soluciones asequibles que se ajusten a las necesidades específicas de un SSR.

#### 1.3.1. Selección y diseño de sistemas híbridos de energía renovable

Un sistema híbrido de energía incorpora dos o más opciones de generación de electricidad. Los sistemas híbridos de energía presentan ventajas en comparación con los sistemas energéticos basados en una única fuente, como lo son una mayor fiabilidad, menor necesidad de almacenamiento de energía, mayor eficiencia, costo mínimo nivelado de generación de electricidad durante el ciclo de vida, cuando se utiliza una técnica de diseño óptima, sin embargo en la mayoría de los casos, debido a la falta de un diseño óptimo o un dimensionamiento, se sobredimensiona o no se diseña correctamente el sistema, lo que encarece los costes de instalación (Sinha, y Chandel, 2014). Los análisis técnicos y económicos de un sistema híbrido son esenciales para la utilización eficiente de los recursos energéticos renovables. Debido a las múltiples variables de cada sistema de generación, la solución de un sistema híbrido es compleja y requiere un análisis exhaustivo. Para ello se necesitan modelos que puedan utilizarse para el diseño, el análisis, la optimización y la planificación económica.

Se han desarrollado herramientas de software para evaluar el potencial técnico y económico de tecnologías de energía renovable para simplificar el proceso de diseño de sistemas híbridos y maximizar el uso de los recursos renovables. Dentro de los softwares disponibles actualmente, el software HOMER se ha destacado cómo la herramienta con mayor sensibilidad y precisión ante un análisis técnico de múltiples energías renovables (Sinha, y Chandel, 2014).

El Modelo Híbrido de Optimización para Renovables Eléctricas (HOMER) del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE. UU es un software adecuado para llevar a cabo análisis rápidos de pre-factibilidad, optimización y análisis de sensibilidad en las configuraciones posibles de sistemas generadores de energía (HOMER Energy, 2022).

HOMER utiliza datos de entrada, como los componentes, disponibilidad de recursos, datos de los fabricantes, y variables económicas para generar como una lista de configuraciones viables, en donde se realiza una simulación de cada configuración.

HOMER muestra en los resultados de cada simulación tablas y gráficos que ayudan a comparar configuraciones y evaluarlas por sus variables económicas y técnicas. Puede determinar políticas de servicio de carga con la fuente de menor costo para satisfacer la demanda eléctrica. Las tablas y gráficos realizados por la simulación HOMER también pueden exportarse. HOMER se ha utilizado ampliamente en la literatura para la optimización de sistemas híbridos de energía renovable y en varios estudios de casos energía renovable y en diversos estudios de casos.

#### 1.4. Servicio Sanitario Rural Pehuén

El Servicio Sanitario Rural de Pehuén, localizado en la comuna de Lebu, el cual actualmente abastece a 2.072 beneficiarios, es un ejemplo de un servicio sanitario el cuál ha sido afectado en su funcionamiento a raíz de problemáticas de abastecimiento eléctrico, por parte de la compañía distribuidora eléctrica Frontel.

Por una parte, el Servicio Sanitario Rural de Pehuén ha informado ha informado tener discontinuidad del servicio sanitario por hasta más de 24 horas por la interrupción del suministro eléctrico, esto es respaldado por el índice SAIDI (Índice de Duración Promedio de Interrupciones de Sistema) en el cual la comuna de Lebu registro un índice SAIDI de 15,08 horas para el año 2021 (Ministerio de Energía, 2022), la interrupción del abastecimiento eléctrico por periodos prolongados tiene consecuencias directas en la captación de agua y tratamiento de agua potable, como en la interrupción del tratamiento de aguas servidas, riesgos de salud pública para los usuarios. Además de esto, el Servicio Sanitario rural de Pehuén también han manifestado tener problemas relacionados al abastecimiento de agua potable a causa de los altos costos en energía eléctrica que contempla el uso de una captación de agua en estero Gorgolén, aumentando hasta en un 200% el consumo mensual de energía eléctrica cuando esta captación es ocupada.

Las energías renovables pueden ayudar a abordar el desafío de discontinuidad a raíz de problemáticas de suministro eléctrico que se presentan en el Servicio Sanitario Rural de Pehuén. Como se mencionaba anteriormente, un sistema híbrido de energía renovable para el abastecimiento eléctrico de un servicio

sanitario, puede aumentar significativamente la autonomía de este. La autonomía eléctrica se define como capacidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica mediante equipos generadores de energía propios, por lo tanto, una alta autonomía eléctrica del SSR, ayuda a evitar la discontinuidad causada por los cortes de suministro eléctrico que presenta la compañía distribuidora, al disminuir la dependencia a este servicio.

La autonomía energética no sólo puede enfrentar las interrupciones de servicio, sino que también tiene por beneficio el ahorro en gastos de energía eléctrica (Wang et al. 2018).

Estos antecedentes, junto con el auge de las energías renovables no convencionales en Chile, siendo la energía eólica y solar, las fuentes de energía con una mayor tasa de crecimiento en el país dentro de los últimos años (Watts et al. 2016), abren la posibilidad de evaluar un sistema híbrido de energía renovable para el abastecimiento eléctrico del SSR de Pehuén como una solución posible ante los desafíos que enfrentan.

## 1.5. Pregunta de investigación

¿Cuál es la autonomía eléctrica óptima que se puede llegar a generar en el SSR de Pehuén a través de un sistema híbrido de ER?

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

Evaluar un sistema híbrido de energía renovable para el Servicio Sanitario Rural de Pehuén

### 1.6.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el consumo de energía eléctrica del SSR
2. Determinar el potencial de recurso renovable disponible en el SSR
3. Seleccionar el sistema óptimo para abastecer el consumo del SSR

## 2. Antecedentes

### 2.1 Área de estudio

El Servicio Sanitario Rural de Pehuén se creó en el año 1980 como APR, a cargo del comité de Agua Potable Rural de Pehuén, con el fin de abastecer de agua potable y saneamiento a los habitantes de la localidad de Pehuén, comuna de Lebu.

La localidad de Pehuén está ubicada en la comuna de Lebu, provincia de Arauco, región del Biobío, a 11km del centro de la comuna de Lebu y a 7.5km de la comuna de Los Álamos.

Tabla N°1. Coordenadas localidad de Pehuén

Coordenadas Pehuén UTM	
<b>Este</b>	628761 metros
<b>Norte</b>	5829874,5 metros
<b>Datum</b>	WGS - 84
<b>Zona</b>	18S

En la localidad de Pehuén los habitantes se abastecen del Servicio Sanitario Rural de Pehuén, el cual cuenta con los servicios de captación y tratamiento de agua potable, distribución de agua potable, recolección de aguas servidas mediante alcantarillado y tratamiento y disposición de aguas servidas El SSR de Pehuén en la actualidad abastece a 567 arranques a la fecha y 2072 beneficiarios.

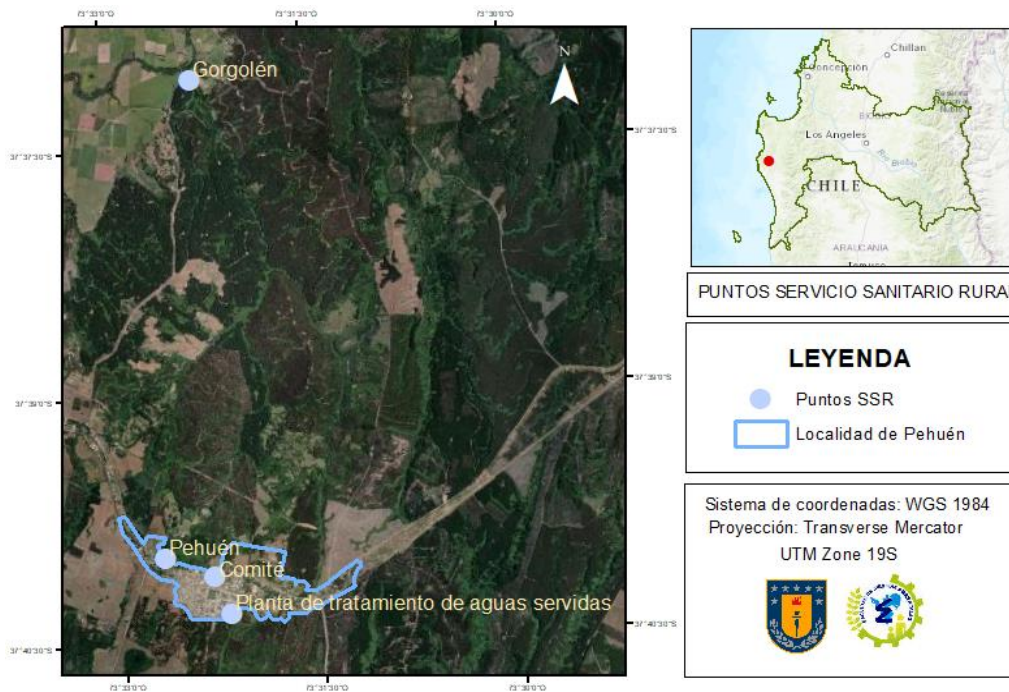


Figura N°2. Mapa área de estudio

*Fuente: Elaboración propia a través de software ArcGIS.*

Los procesos del servicio sanitario tienen lugar en cuatro puntos de la localidad (Figura 2).

1. Planta Pehuén
2. Estero Gorgolén
3. Planta de tratamiento de aguas servidas Pehuén
4. Comité APR

En estos cuatro puntos se desarrollan las distintas etapas del servicio sanitario rural descritas en la Tabla N°2.

Tabla N°2: Etapas SSR

Punto SSR	Etapas servicio sanitario	Coordenadas (UTM WGS84)
<b>Planta Pehuén</b>	Captación, tratamiento de agua potable, y distribución de agua	628375,8 Este 5830211,9 Norte
<b>Estero Gorgolén</b>	Captación de agua potable	628995,4 Este 5835554,4 Norte
<b>Planta de tratamiento de aguas servidas</b>	Tratamiento y disposición de aguas servidas	629107,8 Este 5829553,5 Norte
<b>Comité APR</b>	Administración y gestión del SSR	628919,8 Norte 5829896,50 Este

### 2.1.1 Clima área de estudio

Según la clasificación de Köppen, la localidad de Pehuén se encuentra en la categoría Cbs: Mediterráneo de lluvia invernal con influencia costera. Esta zona se caracteriza por tener un umbral térmico definido por una temperatura media inferior a 18°C y superior a -3°C. (DGA, 2022) Figura N°3.

Registra una velocidad de viento promedio de 7,3 m/s a 100 metros de altura y de 3,4 m/s a 5,5 metros de altura. (Ministerio de energía, 2022) Sus datos de radiación son de 5,92 (kWh/m<sup>2</sup>/día) global anual. (Ministerio de energía, 2022)



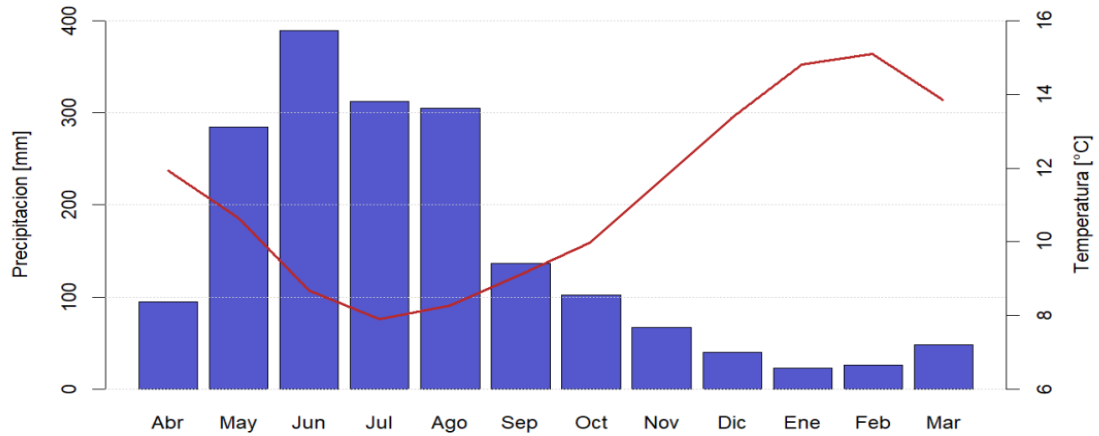


Figura N°3. Climograma característico de la zona de estudio.

Fuente: DGA, 2021.

### 2.1.2 Radiación

La localidad de Pehuén presenta sus mayores índices de radiación entre los meses de noviembre y febrero, con valores de radiación promedio de 6 y 8 kWh/m<sup>2</sup> día, mientras que los meses con menor radiación en la zona son desde mayo a agosto, los cuales registran un rango de entre 1,5 y 4 kWh/m<sup>2</sup>/día (Figura 4).

Estos valores promedio de radiación tienen directa relación con los horarios de sol que hay en el día durante las estaciones de verano e invierno.

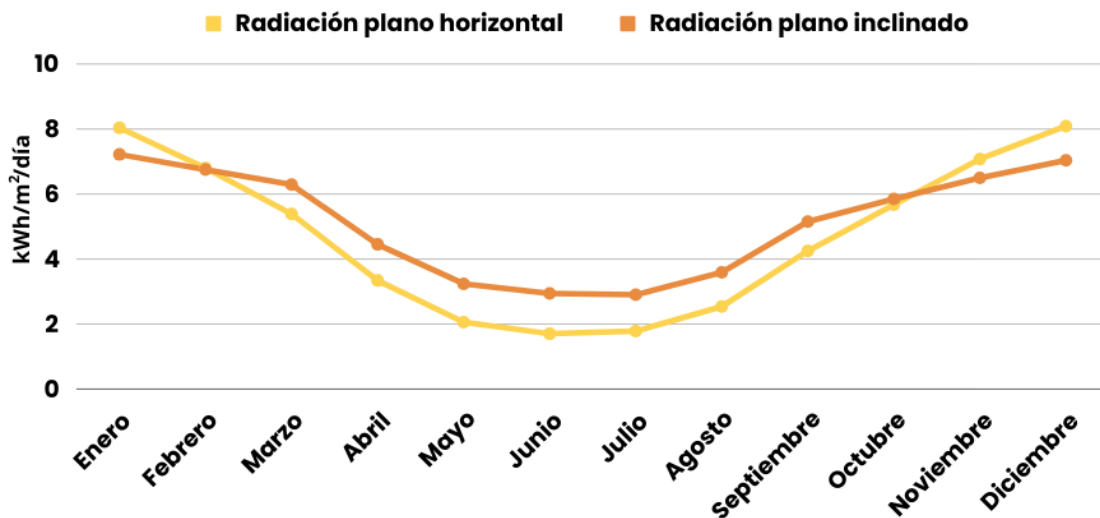


Figura N°4. Radiación en zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos en Explorador solar, 2022

### 2.1.3. Nubosidad

Pehuén a pesar de encontrarse en una zona de influencia costera, mantiene una frecuencia de nubes de un rango entre 16% en marzo, y 25% en noviembre. Por otra parte, no existe una correlación entre las temperaturas o precipitaciones mensuales, y la nubosidad (Figura 5).

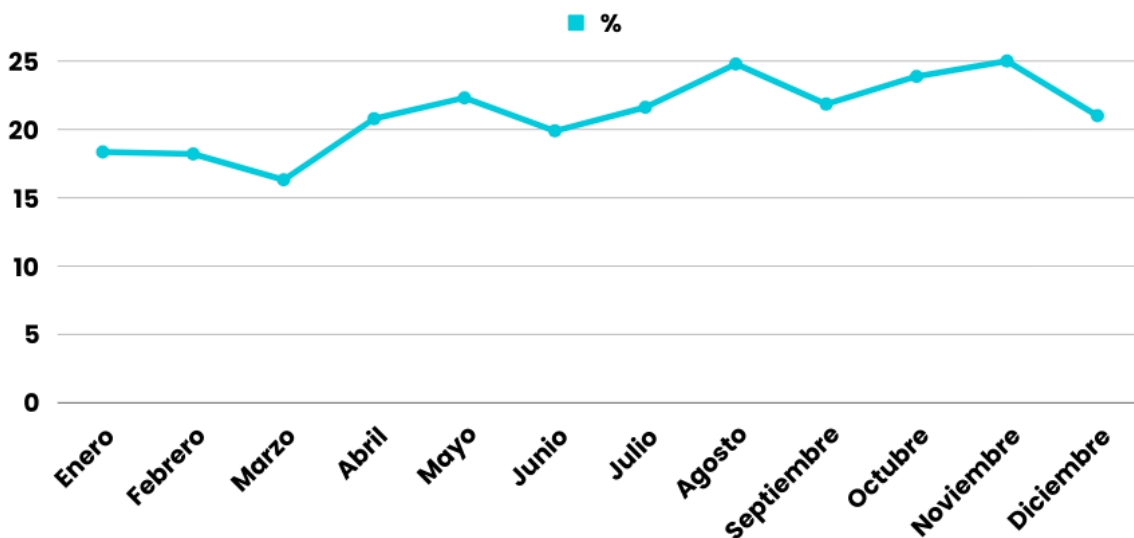


Figura N°5: Frecuencia de nubosidad Pehuén.

Fuente: Elaboración propia a través de datos obtenidos en Explorador Solar, Ministerio de energía, 2022.

#### 2.1.4. Red hidrográfica

La localidad de Pehuén se encuentra entre las cuencas de Río Lebu y Costeras Lebu-Paicaví (Códigos 087 y 088 según DGA). Cerca de la localidad de Pehuén podemos identificar el Estero Yeneco perteneciente a la cuenca de Costeras Lebu-Paicaví en el cual se descargan los efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas del SSR Pehuén, y luego el Estero Gorgolén, tributario del río Lebu, cuenca del Río Lebu, el cual es un punto de captación del SSR (Figura N°6).

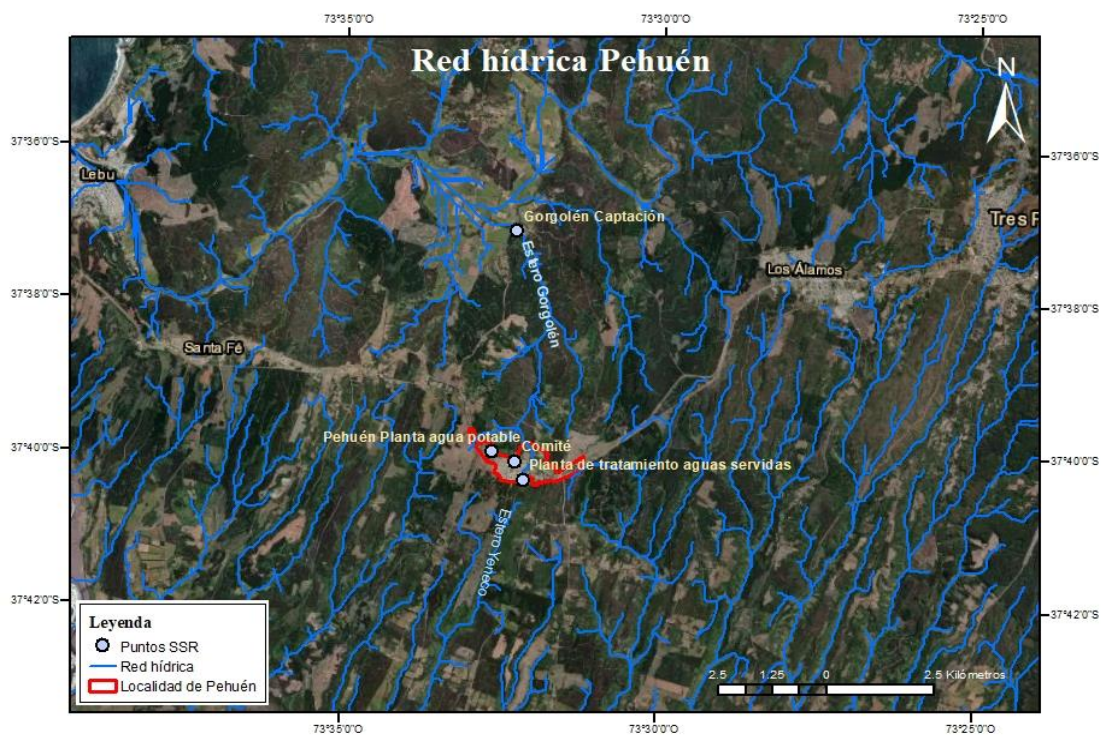


Figura N°6. Mapa red hídrica Pehuén.

Fuente: Elaboración propia a través de software ArcGIS utilizando modelo de elevación digital SRTM

### 3. Metodología

#### 3.1. Caracterización del consumo de energía eléctrica del SSR

Para responder la pregunta de investigación que busca la autonomía eléctrica óptima del SSR mediante un sistema híbrido de energía renovable, lo primero que debemos conocer es cuál es la demanda eléctrica del servicio sanitario rural, para aquello se debe identificar la demanda horaria mensual promedio del SSR y sus variaciones.

##### 3.1.1. Auditoría energética

Para caracterizar el sistema eléctrico del Servicio Sanitario Rural se realizó una auditoría energética en donde se obtuvo los siguientes datos.

1. Potencia (kW) de los equipos del sistema completo (Estero Gorgolén, Planta Pehuén y Planta de tratamiento de aguas servidas).
2. Horario de funcionamiento de cada planta y de los equipos de cada planta.

Tabla N° 3. Creación de ciclo diario anual de demanda de energía eléctrica Servicio Sanitario Rural

<b>Creación de ciclo diario anual.</b>		
<b>Planta Pehuén</b>	<b>Captación Gorgolén</b>	<b>Planta de tratamiento de aguas servidas</b>
1. Identificación de equipos que componen cada planta		
2. Potencia de cada equipo		
3. Horario de funcionamiento de cada equipo según mes del año.		
<b>4. Sumatoria de potencia horaria usada por los equipos de cada planta mensualmente</b>		

Mediante el proceso descrito en la Tabla N°3, se creó una matriz de ciclo diario anual de demanda eléctrica del Servicio Sanitario Rural, el cual se validará posteriormente con los datos de consumo de energía a la compañía eléctrica entre los años 2017 a 2022.

### 3.1.2. Validación

Mediante los datos obtenidos en la auditoría energética se realizó una estimación del consumo eléctrico horario anual de cada planta y analizar la variabilidad del consumo, esto se realizará mediante la siguiente manera:

Validación de la estimación de demanda mensual, mediante estadística descriptiva, gráficos Boxplot, usando los datos de consumo obtenidos en boletas de compañía eléctrica Frontel en el periodo 2017 a 2022.

Tabla N°4. Validación mediante datos de boletas de energía eléctrica periodo 2017-2022

<b>Boletas de compañía eléctrica</b>	
<b>Energía consumida kWh</b>	Gráfico de cajas y bigotes consumo mensual.
<b>Montos cancelados</b>	Estimación de gasto mensual en energía eléctrica
<b>Validación</b>	Comparación mediante datos estimados y datos obtenidos.

Los datos estimados previamente (Tabla N°3) de consumo diario y mensual según la potencia, se contraponen con los datos obtenidos de consumo mensual en boletas de la luz, si la estimación es válida, debe estar dentro de las medidas de tendencia del gráfico de caja y bigote.

La información sobre los montos cancelados a la compañía de energía eléctrica por el Servicio Sanitario Rural, se usarán posteriormente para evaluar resultados económicos.

### 3.2. Potencial de recurso renovable disponible en el SSR.

Para realizar una estimación de la cantidad de energía con la que podemos abastecer al SSR mediante un sistema de equipos de ER, es necesario conocer el potencial de recurso renovable, los cuales son, radiación en el caso de la energía solar, velocidad de viento en el caso de la energía eólica.

Para obtener datos de recursos renovables como velocidad de viento y radiación, el ministerio de energía otorga plataformas las cuales son los exploradores solar y eólico, en el cual se pueden obtener datos de velocidad de viento y radiación, ubicando espacialmente el área de estudio de interés, a través de todo el territorio nacional.

#### 3.2.1. Caracterización potencial solar

1. Se ubicó espacialmente el área de estudio mediante coordenadas geográficas en Explorador solar del Ministerio de energía
2. Se descargaron datos de radiación kWh/m<sup>2</sup> en el periodo de tiempo 2000-2020, en el punto seleccionado.
3. Cálculo de ciclo diario mensual radiación (kW/m<sup>2</sup>) plano horizontal
4. Matriz ciclo diario anual radiación (kW/m<sup>2</sup>)

### 3.2.2. Caracterización potencial eólico

1. Se ubicó espacialmente el área de estudio mediante coordenadas geográficas en Explorador Eólico del Ministerio de energía
2. Se descargaron datos de velocidad de viento (m/s) en el periodo de tiempo 2000-2020, en el punto seleccionado.
3. Se realizó un perfil vertical de velocidad de viento (m/s) en las alturas de 5,5 hasta 100 metros de altura.
4. Matriz ciclo diario anual velocidad de viento (m/s) a 20 metros de altura  
(Supuesto uso de equipos eólicos pequeños y medianos los cuales funcionan a 20 metros de altura)

### 3.3. Selección de sistema óptimo para abastecer la demanda eléctrica del SSR

El objetivo principal de este proyecto es seleccionar un sistema eléctrico que utilice diversas fuentes de energía renovable para abastecer al Servicio Sanitario Rural, con un enfoque prioritario en la autonomía energética. Se busca encontrar la mejor solución que garantice el suministro continuo de energía, considerando las necesidades del servicio sanitario y la importancia de su continuidad para la salud pública.

Las opciones de sistemas se basan en la premisa de que estarán conectados a la red eléctrica, permitiendo la compra y venta de energía en momentos en los que el sistema no pueda satisfacer plenamente la demanda o tenga excedentes de producción.

No se contempla el uso de baterías para almacenar la energía generada en esta evaluación.

### 3.3.1. Supuestos y limitaciones

1. No se considera evaluación de disponibilidad de terreno para la instalación de equipos generadores de energía
2. Se evaluarán sistemas de Energía renovable Eólico/Fotovoltaico on-grid sin almacenamiento
3. Inversión y capital inicial: Para iniciativas de ampliación o mejoras de Servicios Sanitarios Rurales, el principal instrumento para obtener financiamiento es el Gobierno Regional, mediante el **Programa de Infraestructura Rural para el Desarrollo Territorial (PIRDT)**, por lo tanto, se considerará como monto de inversión inicial máximo a evaluar el monto máximo entregado por GORE para reparaciones, ampliaciones y conservaciones de APR en la provincia de Arauco en el periodo 2019-2023 (Tabla N°5).



Tabla N°5. Presupuesto entregado por PIRDT a iniciativas de APR en la provincia de Arauco.

<b>Presupuesto PIRDT a APR Provincia de Arauco 2020-2023</b>			
<b>Año</b>	<b>Iniciativas agua potable rural</b>	<b>Tipo de iniciativa</b>	<b>Monto</b>
<b>2020</b>	1	Ampliación y conservación	146.000.000 CLP
<b>2021</b>	1	Ampliación y conservación	93.000.000 CLP
<b>2022</b>	5	Ampliación y conservación	527.000.000 CLP
<b>2023</b>	4	Construcción de SSR	3.128.830.000 CLP

Fuente: GORE BIOBIO 2020-2023

Una vez definidos los supuestos y las limitaciones se pudo ingresar las variables de entrada adecuadas a los objetivos, para también una posterior evaluación correcta de los resultados.

### 3.3.2. Creación de alternativas de sistemas híbridos de ER a través del software HOMER

HOMER Energy es la herramienta que permitirá realizar el análisis para la selección de un sistema híbrido óptimo que pueda abastecer energéticamente el Servicio Sanitario rural, este análisis se realiza mediante las variables de salida entregadas por HOMER para cada simulación. Para esto HOMER requiere del ingreso de variables de entrada las cuales cubren las categorías de recurso renovable, demanda eléctrica, componentes y costos, y variables económicas. En la Figura N°7 se observa un esquema del funcionamiento de HOMER.

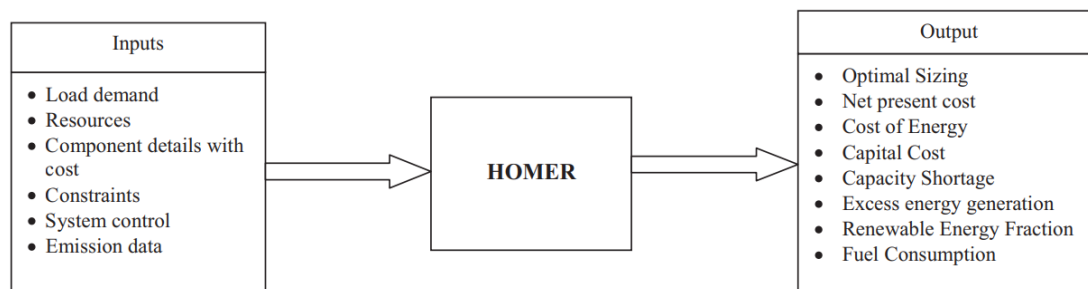


Figura N°7. Representación esquemática de Homer.

Fuente: Sinha, y Chandel, 2014.

Antes de cualquier variable de entrada a ingresar al programa, se ingresan las condiciones económicas actuales en las cuales se planea realizar este proyecto, estas se indican en la Tabla N°6.

Tabla N°6. Condiciones económicas ingresadas a HOMER

Condiciones económicas	
Tasa de inflación	11,1%
Vida útil del sistema	20 años
Tasa de descuento	6%
Cotización dólar	789,26 Pesos chilenos

Fuente: Instituto nacional de estadística, marzo 2023.

Para que el software pueda crear simulaciones de alternativas de sistemas híbridos de energías renovables, se deben ingresar variables de entrada, las cuales se especifican en la Tabla N°7.

Tabla N°7. Variables de entrada HOMER

Variables de entrada		
<b>Recursos</b>	<b>Solar</b>	Ciclo diario anual radiación W/m <sup>2</sup>
	<b>Eólico</b>	Ciclo diario anual velocidad de viento(m/s) Altura (m) de los datos de velocidad de viento
<b>Carga</b>	<b>Demanda eléctrica</b>	Ciclo diario anual consumo eléctrico (kW) Peak (kW)
	<b>Red</b>	Precio de compra kW Precio de venta kW
	<b>Turbinas Eólicas</b>	Cantidad de equipos (unidades) Potencia equipos (kW) Costo equipos(\$) Velocidad de inicio (m/s) Altura torre (m)
<b>Componentes</b>	<b>Paneles fotovoltaicos</b>	Cantidad equipos (kW) Potencia equipos (kW) Costo equipos (\$) Eficiencia(%)

\*Se considera instalación, traslado e inversores dentro del costo

Dentro de la evaluación de abastecimiento eléctrico del SSR mediante un sistema híbrido de energía renovable, también es pertinente evaluar también las opciones se sistemas de energía renovable de una sola fuente renovable, sólo energía solar y sólo energía eólica. Las simulaciones de sistemas generadores de energía se realizarán con equipos específicos presentes en el mercado actualmente, estos fueron escogidos dado su disponibilidad en el mercado actual, y también la disponibilidad de sus fichas técnicas para una evaluación más precisa, estos equipos se indican en la Tabla 8.

Tabla N°8. Modelos de equipos generadores de energía escogidos para evaluación

	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Dimensiones</b>
<b>Paneles fotovoltaicos</b>	RSM-144-7-430M-450M	Risen Solar technology	2108x1048x40 mm
	Poly-crystalline Series 270W-295W	Sine Energy	1640x992x35mm
<b>Turbinas eólicas</b>	EO10	Eocycle	Diámetro rotor: 8m Torre: 20m
	EO20	Eocycle	Diámetro rotor: 15m Torre: 20m
	EOX S-16	Eocycle	Diámetro rotor: 15,8m Torre: 20m

Fuentes: Sine Energy, Eocycle, Risen Solar.

Para la evaluación mediante un sistema híbrido de energía renovable (Tabla N°9), en el caso de los componentes energía eólica, se evaluó el uso de aerogeneradores de 10kW, 20kW, y 25kW, se escogió este rango de potencia de equipos ya que en el caso de los equipos menores a 10kW, los costos de instalación y traslado suponían inversiones iniciales muy altas en comparación con el potencial eólico de producción. Mientras que en el caso de los equipos mayores a 25kW de potencia, estos equipos tienen velocidad de inicio superiores a los 3,5 m/s por lo que, a pesar de ser equipos de alta potencia, necesitan velocidades de viento mayores las cuales no se alcanzan en el área de estudio todo el año, por lo cual la producción de energía eléctrica anual es menor aún que los equipos de potencias más bajas.

Por otra parte, los equipos eólicos considerados son equipos eólicos con torres de 20 metros, y dimensiones máximas de diámetro de rotor de 15,8m. Esto es considerado de esta manera ya que se busca la menor dimensión posible en

aerogeneradores para no alterar el nivel paisajístico de la zona, y tampoco, afectar dentro del ecosistema y la vida de los habitantes.

En el caso de los componentes de energía solar, se escogió evaluar sistemas con equipos fotovoltaicos de potencia 7,2kW ya que son equipos que son equipos que pueden generar más energía por una menor inversión comparado con equipos de potencia menores, y por otra parte no se escogió equipos de mayor potencia por poca disponibilidad en el mercado, y mayores costos de inversión, a esto se evaluó también paralelamente equipos de 2,475 kW de potencia en el caso de que la potencia óptima para el sistema en equipos fotovoltaicos se encuentre en un rango entre dos unidades de los equipos fotovoltaicos de 7,2kW.

Tabla N°9. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas híbridos

<b>Variables componentes sistemas híbridos</b>				
<b>Turbinas Eólicas</b>	<b>Potencia equipos (kW)</b>	<b>10kW</b>	<b>20kW</b>	<b>25kW</b>
	Altura torre	20	20	20
	Velocidad de inicio (m/s)	2,75	2,75	3,5
	Cantidad de equipos (unidades)	0 a 6	0 a 3	0 a 3
	Costo equipos(USD\$/un)*	35000	40000	45000
	Velocidad de corte (m/s)	20	20	25
<b>Paneles fotovoltaicos</b>	<b>Potencia equipos (kW)</b>	<b>2,475 kW</b>	<b>7,2 kW</b>	
	Eficiencia (%)	17.3	17.3	
	Cantidad de equipos (unidades)	0 a 2	0 a 5	
	Costo equipos(\$/un) *	3000	7000	

En el caso de la evaluación de sistemas abastecidos sólo por energía eólica (Tabla N°10) se mantuvieron los componentes de la evaluación híbrida, equipos de 10, 20 y 25 kW de potencia, sin embargo, se aumentó la cantidad máxima de cantidad de equipos en cada opción, con 7 unidades para los equipos de 10kW, y 4 unidades en el caso de los equipos de 20 y 25 kW, considerando el supuesto en que el peak de la demanda es 80kW. A pesar de que 7 unidades de equipos de 10kW sólo alcanzan una potencia máxima de 70kW, los sistemas posibles que entrega HOMER Energy combinan los 3 distintos equipos en todas las cantidades que se ingresó, desde 0 a 7 en el caso de equipos de 10kW y desde 0 a 4 en el caso de los equipos de 20 y 25 kW.

Tabla N°10. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas abastecidos sólo por energía eólica.

<b>Componentes sistemas sólo equipos eólicos</b>				
<b>Turbinas Eólicas</b>	<b>Potencia equipos (kW)</b>	<b>10kW</b>	<b>20kW</b>	<b>25kW</b>
	Altura torre (m)	20	20	20
	Velocidad de inicio (m/s)	2,75	2,75	3,5
	Velocidad de corte (m/s)	20	20	25
	Cantidad de equipos (unidades)	0 a 7	0 a 4	0 a 4
	Costo equipos(\$/un)*	35000	40000	45000

Para los sistemas abastecidos sólo por equipos fotovoltaicos (Tabla N°11) se aumentó la cantidad de equipos de 7,2 kW desde 0 a 10 unidades.

Mientras que los equipos de 2,475 se mantuvieron desde 0 a 2 unidades para cumplir la función de alcanzar una potencia óptima en el caso de que esta se encuentre entre dos unidades de los equipos de 7,2 kW.

En el caso de la evaluación para sistemas utilizando sólo energía solar se llegó a una variable máxima de 12 equipos, sin embargo, considerando el supuesto potencial solar del área de estudio el cual es bajo se espera como resultado de estos sistemas que el óptimo no será aquel que tenga la máxima potencia en cuanto a los equipos.

Tabla N°11. Variables de entrada HOMER Energy componentes sistemas abastecidos sólo por equipos fotovoltaicos

<b>Componentes sistemas sólo equipos fotovoltaicos</b>			
<b>Paneles fotovoltaicos</b>	<b>Potencia equipos (kW)</b>	<b>2,475</b>	<b>7,2</b>
	Eficiencia (%)	17,3	17,3
	Cantidad de equipos (Unidades)	0 a 2	0 a 10
	Costo equipos(\$/un) *	3000	7000

Homer entrega como resultado simulaciones de todas las configuraciones de los equipos ingresados, cada una de estas simulaciones de sistema trae variables de salida descritas en la Tabla N°12.

Tabla N°12. Variables de salida HOMER

<b>Categoría</b>	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>Costos</b>	<b>Capital inicial (\$)</b>	Costo total de inversión en equipos del sistema.
	<b>COE (\$/kWh)</b>	Costo promedio por kW/h producido por el sistema.
	<b>NPC (\$)</b>	El costo actual neto total, es el costo total del sistema durante su vida útil, es el flujo, entre capital inicial, costos de operación, compra y venta de energía a la red.
	<b>Costo de operación (\$/año)</b>	Costos anuales de operación del sistema.
	<b>Payback (años)</b>	Cantidad de años en los cuales se recupera la inversión del capital inicial del sistema.
<b>Red</b>	<b>Energía comprada a la red (kW/h)</b>	Energía total comprada a la red cuando el sistema no se está abasteciendo por sus propios equipos.
	<b>Energía vendida a la red (kW/h)</b>	Energía total vendida a la red cuando el sistema no necesita energía de sus propios equipos, y/o está produciendo más de lo requerido.
<b>Sistema</b>	<b>Autonomía (%)</b>	La autonomía es la fracción de la energía entregada a la carga, que se originó a partir de fuentes de energía renovables.

Fuente: Elaborada con información entregada por HOMER Energy

El Payback o retorno en el caso de esta investigación no considera la venta de energía a la red, por lo cual el valor entregado por HOMER no es indicado para realizar una evaluación precisa, por lo cual, se realiza un cálculo de retorno de inversión, en base a los años en que el ahorro en consumo de energía a la red completa el monto de inversión y costos de mantención. El cálculo de Payback se indica en (1)



$$(1) (C_i + C_m * (1 + i)^a) - A * (1 + i)^P = 0$$

*C<sub>i</sub>* = Capital inicial (\$)

*C<sub>m</sub>* = Costo de mantención (\$)

*i* = Tasa de inflación anual

*a* = Vida útil del sistema (años)

*A* = Ahorro en compra de energía a la red (\$/año)

*P* = Payback (años)

### 3.3.3. Selección de sistemas óptimos.

El propósito principal de este estudio de pregrado es buscar la mejor solución de autonomía eléctrica para el Servicio Sanitario Rural de Pehuén a través de un sistema híbrido de energía renovable. Sin embargo, es importante considerar que los resultados obtenidos mediante el uso del software HOMER Energy podrían revelar que un sistema híbrido de energía renovable no es la opción óptima para satisfacer la demanda eléctrica del Servicio Sanitario Rural. Por lo tanto, dentro de la evaluación de alternativas proporcionadas por el software, también se considerarán sistemas que dependan únicamente de paneles fotovoltaicos y estén conectados a la red, así como sistemas que dependan exclusivamente de turbinas eólicas y estén conectados a la red.

La selección del sistema óptimo se llevará a cabo mediante análisis de estadística descriptiva, donde se escogerá un grupo de sistemas en función de variables como el porcentaje de autonomía y el capital inicial. El objetivo es permitir que el Servicio Sanitario Rural alcance la máxima autonomía eléctrica que su capital inicial pueda permitir.

Este enfoque estadístico nos brindará una visión más precisa y detallada de las diferentes alternativas de sistemas disponibles, permitiéndonos tomar decisiones informadas basadas en el análisis de datos. Al seleccionar cuidadosamente el grupo de sistemas que cumpla con los criterios establecidos, podremos

garantizar que el Servicio Sanitario Rural obtenga la autonomía eléctrica óptima dentro de los límites de su capital inicial.

### Estadística descriptiva

1. Gráfico de dispersión bajo variables de autonomía y capital inicial:  
Bajo la evaluación de estas variables podemos obtener los sistemas que alcanzan una mayor autonomía dentro de un mismo valor de capital inicial. En este caso se hará una selección de los sistemas que alcancen mayor autonomía (Figura N°8).

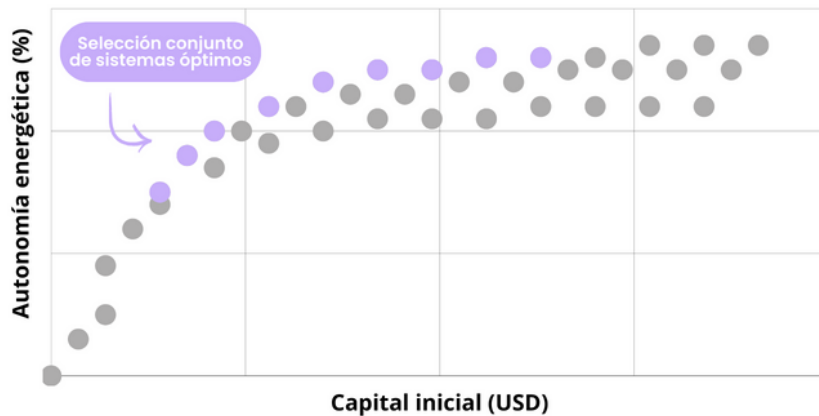


Figura N°8. Método de selección conjunto de sistemas óptimos según mayor autonomía.

2. Indicador kWh/1USD de capital inicial: Se creará el indicador para todos los sistemas seleccionados, considerando el resultado de energía calculada que el sistema puede producir en 20 años y su capital inicial.

$$\text{Indicador} = \frac{(\text{Energía estimada producida por el sistema})\text{kWh}}{(\text{Capital inicial})\text{ USD}}$$

3. Gráfico de dispersión sistemas seleccionados, bajo las variables de indicador kWh/Capital inicial y autonomía: El sistema óptimo será el cuál alcance un indicador y autonomía mayor, los cuales se situarán en el extremo superior derecho del gráfico, tal como se describe en la Figura N°9.

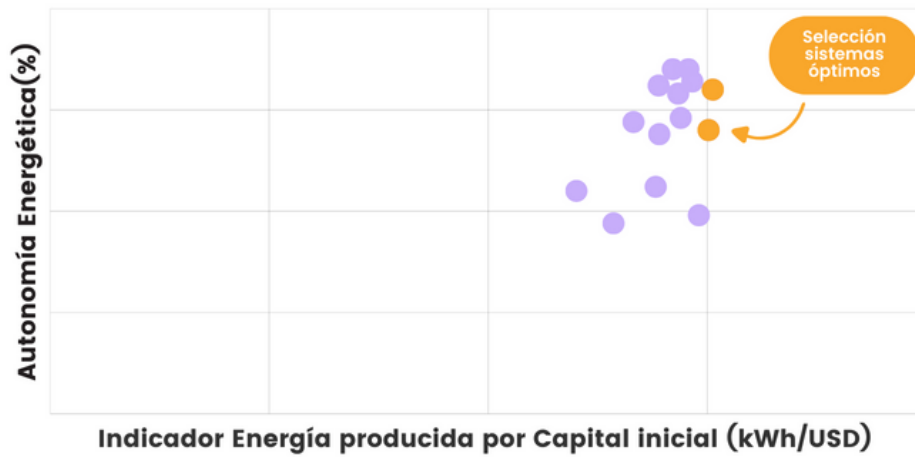


Figura N°9. Método de selección conjunto de sistemas óptimos según indicador.

Se seleccionará un segundo sistema con mayor indicador para evaluar, esto permitirá realizar un análisis comparativo, y así también, tener una opción de respaldo, en el caso de que la segunda opción se ajuste a requerimientos del SSR.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Demanda eléctrica SSR.

#### 4.1.1. Auditoría energética de SSR

Se visitó el área de estudio para realizar la auditoría energética del SSR de Pehuén, en esta visita a terreno se obtuvo datos de potencia de los equipos de cada planta del SSR, la potencia de cada equipo y las horas de uso de cada equipo en cada mes del año, con estos datos es posible hacer una estimación de la demanda horaria anual del SSR.

Tabla N°13. Auditoría energética equipos plantas SSR

Planta	Equipo	Cantidad	Potencia (kW)	Horas de uso diario
<b>Planta de tratamiento aguas servidas</b>	Motorreductor	1	5,5	24
	Bomba elevación	1	2	24
	Motor sumergido aireador digestor de lodos	1	3,4	24
	Bomba dosificadora de cloro	1	0,1	24
<b>Gorgolén</b>	Bomba sumergible	2	9,3	Verano: 6 Invierno: 10
	Bomba elevadora	2	3	Verano: 6 Invierno: 10
<b>Pehuén</b>	Bomba sumergible	1	9,3	Verano: 6 Invierno: 10
	Bomba elevadora	1	2,2	Verano: 6 Invierno: 10
	Bomba dosificadora de cloro	1	0,1	24
	Bomba dosificadora de polímeros	1	0,1	24

#### 4.1.2. Consumo eléctrico mensual estimado y validado con boletas Planta de tratamiento de agua potable y captación Pehuén.

Utilizando los datos de demanda eléctrica de los tres puntos del SSR se construyó una matriz de la demanda horaria anual promedio del SSR completo, considerando planta Pehuén, planta Gorgolén, y planta de tratamiento de aguas servidas.

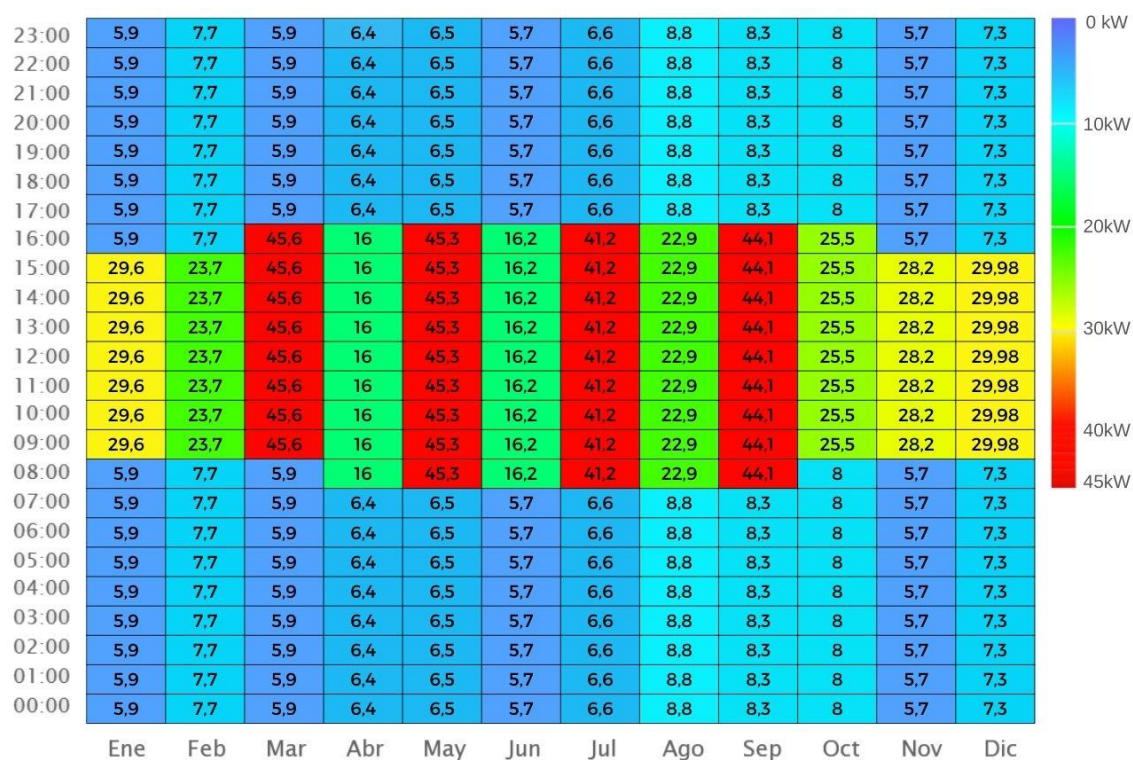


Figura N° 10. Matriz ciclo diaria anual de consumo eléctrico de Sistema Sanitario Rural completo.

Luego para la validación de la estimación del ciclo horario anual se realizó un gráfico de tipo boxplot en donde se analizó la variabilidad de consumo mensual en energía eléctrica utilizando los datos de las boletas de energía eléctrica en el periodo 2017-2022 y se sitúa el valor estimado indicado con un punto rojo,

Figura N°11.

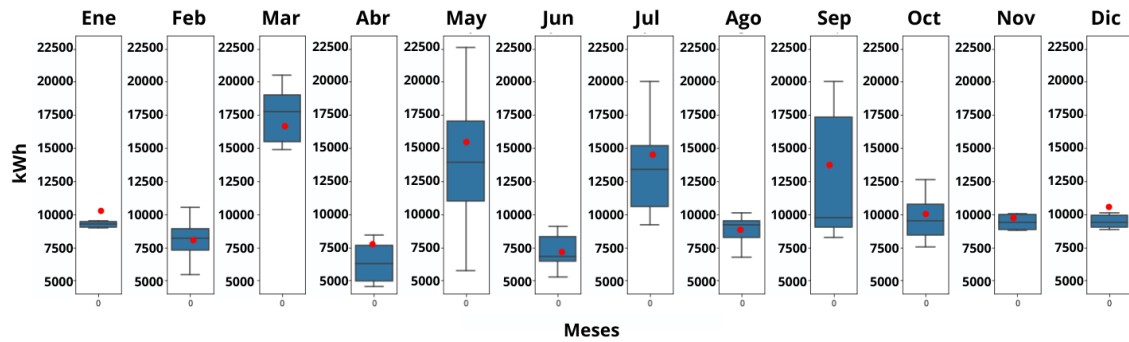


Figura N°11. Grafico boxplot de consumo eléctrico mensual periodo 2017-2022.

En la Figura N°11 se observa fácilmente como entre las horas 08:00 y 16:00 aumenta la demanda, esto es explicado por el horario en los que funcionan planta Pehuén y Gorgolen, las cuales funcionan entre 6 a 9 horas dependiendo el mes del año, mientras que el resto del día la planta de tratamiento de aguas servidas funciona de manera constante, ya que los procesos realizados por esta planta deben ser continuos.

En esta matriz resaltan los meses en donde funciona la captación de Gorgolén, marzo, mayo, julio y septiembre, duplicando la demanda en las horas de captación de agua potable.

#### 4.2. Potencial de recurso renovable disponible

Los recursos renovables a evaluar fueron, velocidad de viento (m/s), radiación ( $W/m^2$ ) y caudal ( $m^3/s$ ), se obtuvo el potencial de recurso renovable de ciclo diario anual para velocidad de viento y radiación, mientras que para el potencial hidroeléctrico no había suficientes datos para obtener datos de caudal.

Para calcular estos potenciales se usaron datos del Ministerio de energía y estaciones DGA.

#### 4.2.1. Recurso eólico

A través del Explorador Eólico del Ministerio de Energía, se obtuvieron datos de velocidad de viento en las coordenadas de la localidad de Pehuén.

La velocidad del viento aumenta según la altura, y también varía según la época del año.

Los meses de noviembre, diciembre y enero son aquellos en donde se alcanzan velocidades de viento promedio mayores, mientras que los meses de octubre y septiembre la velocidad de viento es menor (Figura N°12).

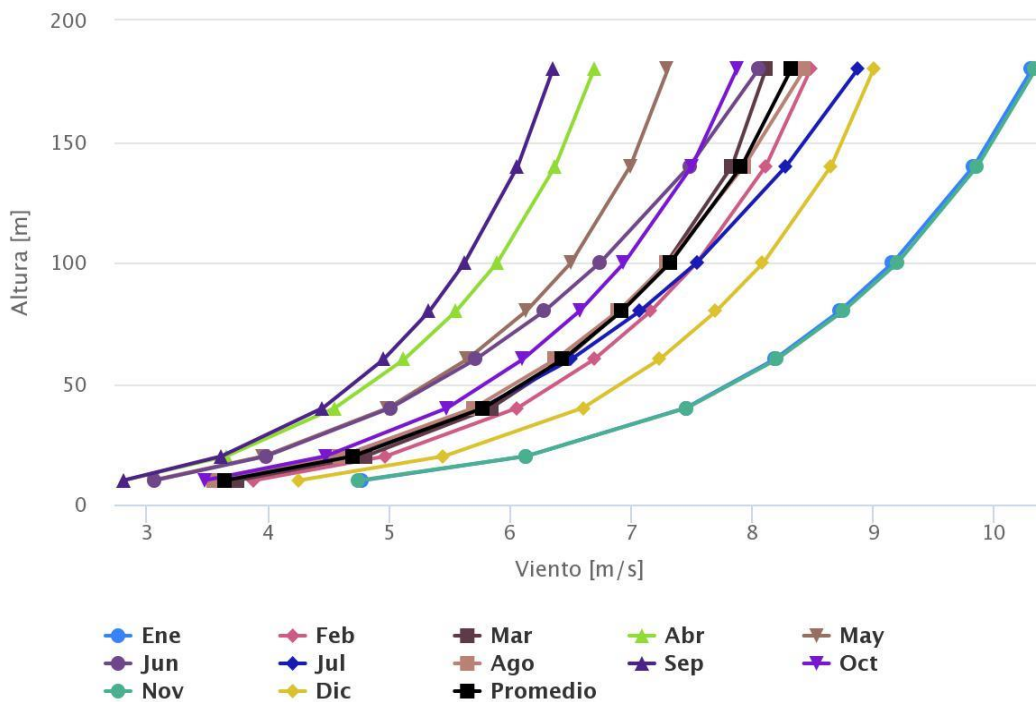


Figura N°12. Perfil vertical mensual Pehuén.

Fuente: Explorador Eólico Ministerio de energía.

Con los datos obtenidos mediante el Explorador Eólico se creó una matriz de ciclo diario anual con los datos de velocidad de viento a 20 metros de altura (Figura 13).

Se escogió trabajar con la altura de 20 metros dado que los equipos disponibles para cumplir la demanda del sistema ocupan torres de 20 metros de altura o similar.

Se puede observar que los periodos del día en donde la velocidad de viento presenta un aumento, es desde 11:00 horas hasta las 20:00 horas, presentando sus peaks de velocidad de viento entre 15:00 horas y 17:00 horas, alcanzando hasta 8m/s en los meses de noviembre y enero.

Los meses de abril y septiembre presentan las menores velocidades promedio, manteniendo velocidades de 3m/s durante la mayor parte del ciclo diaria, sin embargo, experimentan peaks de velocidad entre 15:00 y 17:00 que llegan a 5m/s.

Los meses de invierno mayo, junio y julio presentan las menores variaciones de velocidad de viento, manteniéndose dentro en rango de velocidad de 4m/s - 5m/s.

La matriz de ciclo diario anual nos muestra un potencial eólico favorable para las necesidades de nuestro sistema y la demanda de este mismo, dado que los equipos pequeños y medianos tienen velocidades de inicio de entre 2,75 m/s y 3,5 m/s.



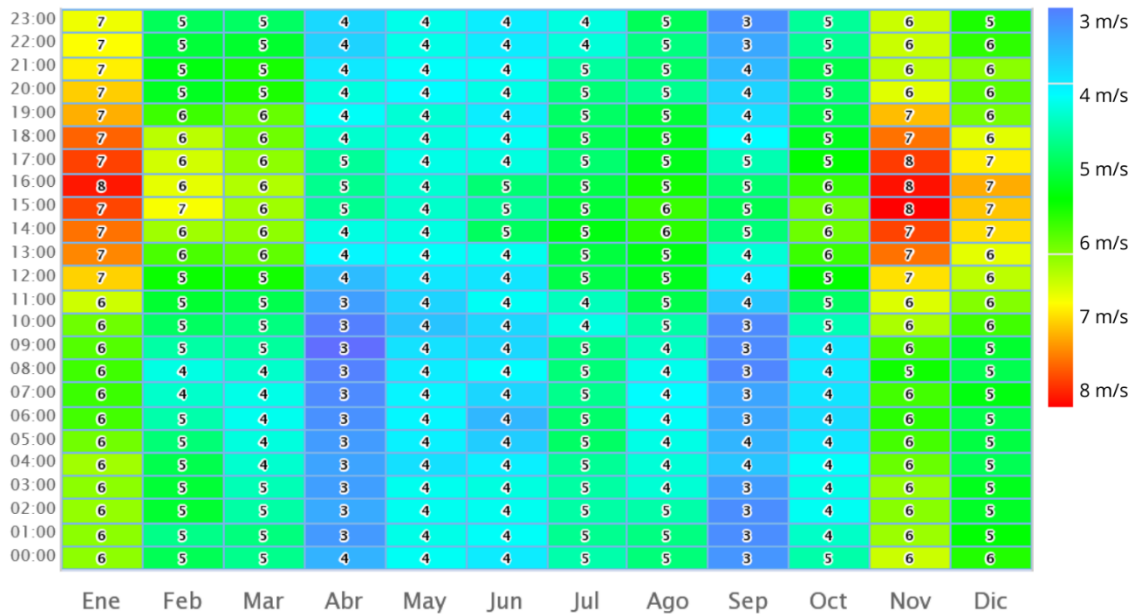


Figura N°13. Ciclo diario anual velocidad de viento a 20 metros de altura.

Fuente: Explorador eólico ministerio de energía.

#### 4.2.2. Recurso solar

Mediante el Explorador Eólico del Ministerio de Energía se obtuvieron los datos de radiación de Pehuén, con aquellos datos se pudo calcular el potencial de recurso solar de manera diaria mensual (Figura 14) y su ciclo diario anual (Figura 15).

Se optó por usar datos de radiación en plano horizontal ya que sus datos presentaban un mayor potencial. En la Figura 14 podemos identificar que en el caso de Pehuén el mayor potencial solar se presenta en los meses de diciembre, enero y febrero, los meses que corresponden al verano en nuestra área de estudio, en un rango de 280 W/m<sup>2</sup>/día y 330 W/m<sup>2</sup>/día. Por otra parte, en los meses correspondientes a invierno, mayo, junio, julio y agosto, tiene sus menores registros de radiación en un rango promedio de 60 W/m<sup>2</sup>/día a 90 W/m<sup>2</sup>/día alcanzando su menor radiación total en junio promediando 64 W/m<sup>2</sup>/día.

Los meses de octubre y noviembre son aquellos en donde se percibe una mayor radiación difusa con respecto a la radiación total, en comparación con los meses de verano, que presenta mayor radiación total, pero menor radiación difusa.

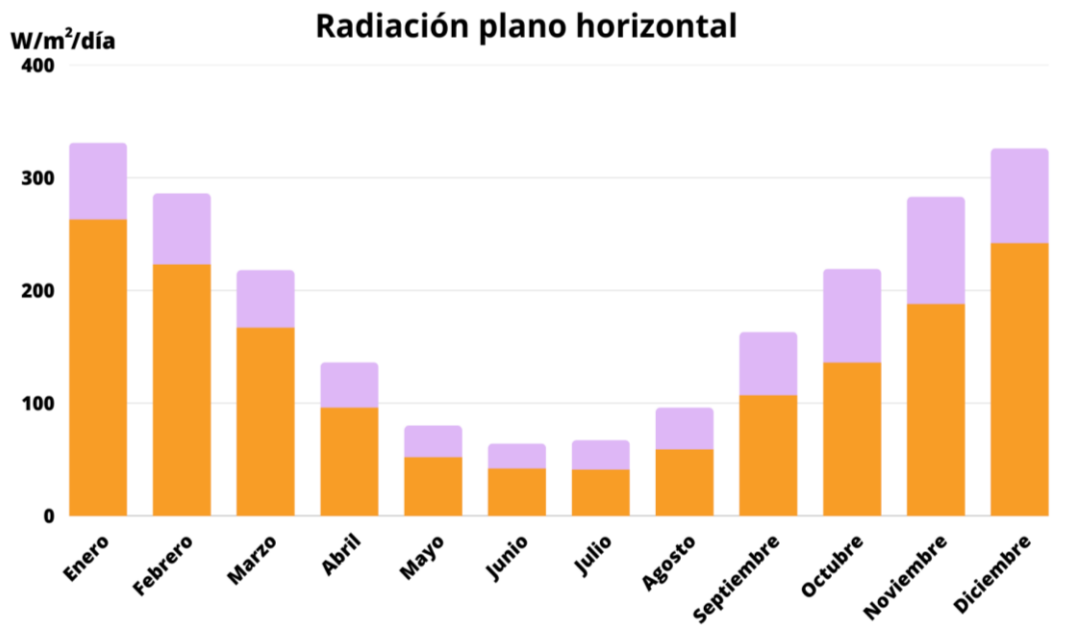


Figura N°14. Gráfico promedio diario mensual de radiación en plano horizontal en Pehuén.

Se creó una matriz de ciclo diario anual de la localidad de Pehuén (Figura 12). En esta matriz podemos observar los meses con mayor cantidad de horas de radiación los cuales son noviembre, diciembre, enero y febrero, con ciclos de radiación de 14 horas, y también presentando los mayores peaks de radiación entre las horas 11:00 y 15:00, alcanzando la orden de los 900 W/m<sup>2</sup>.

Los rangos de radiación mayores a 500 W/m<sup>2</sup> se mantienen desde septiembre hasta abril, siendo septiembre, octubre, marzo y abril meses que alcanzan valores de radiación más altos que 500 W/m<sup>2</sup> pero que sin embargo tienen un ciclo diario de radiación más corto que los meses de verano en un rango de entre 10 y 12 horas.

En los meses de invierno, mayo, junio, julio y abril, los ciclos diarios de radiación llegan hasta las 9 horas de radiación, y tienen sus máximos valores de radiación en el rango de entre los 240 W/m<sup>2</sup> y 260 W/m<sup>2</sup>.

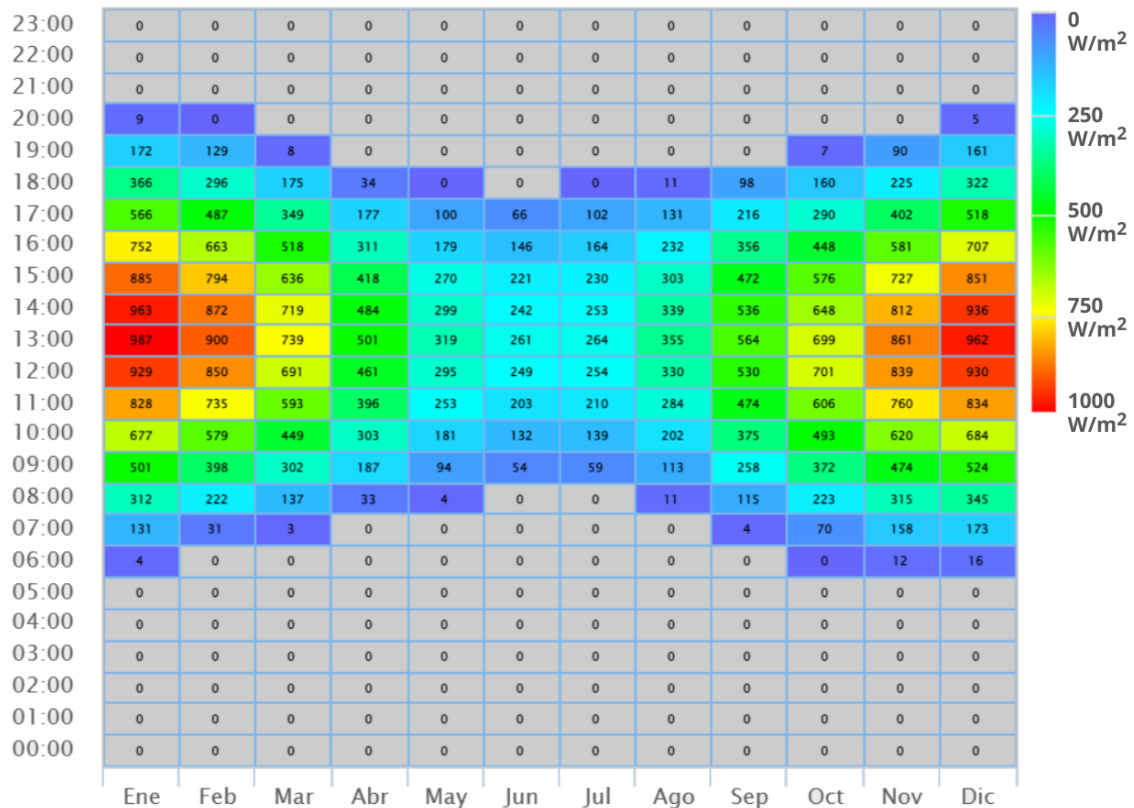


Figura N°15. Ciclo diario anual radiación Pehuén.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de energía.

Los datos de radiación muestran un potencial de recurso solar favorable durante los meses de verano, los cuales presentan mayor cantidad de horas en donde se presentan valores de radiación global mayores a 500 W/m<sup>2</sup>.

Por lo tanto, los meses en que posiblemente se perciba una mayor fracción de producción solar sean en verano (Figura 15).

Por otra parte, los periodos horarios en donde se alcanzan los peak de radiación, coinciden con los horarios de mayor demanda del sistema.

#### 4.3. Selección de sistema óptimo para abastecer la demanda eléctrica del SSR.

Para seleccionar el sistema eléctrico óptimo que pueda abastecer al Servicio Sanitario Rural (SSR) utilizando el software HOMER Energy, se procedió ingresando variables de entrada. Estas variables abarcan la caracterización de la demanda de energía eléctrica del SSR, incluyendo el ciclo diario anual de consumo, los picos de consumo y el consumo promedio por hora. Por otro lado, se consideraron variables relacionadas con el potencial de recursos renovables disponibles en el área de estudio y condiciones económicas pertinentes.

Una vez que se definieron la demanda, el potencial de recursos renovables y las condiciones económicas, se ingresaron las variables necesarias para evaluar los componentes específicos por parte del software. En este caso, se evaluaron los equipos eólicos y fotovoltaicos.

El objetivo principal de esta evaluación fue buscar la autonomía óptima mediante un sistema híbrido de energía renovable. No obstante, también se evaluaron los casos de sistemas compuestos exclusivamente por equipos eólicos o fotovoltaicos.

##### 4.3.1. Variables de entrada HOMER Energy

Las variables de entrada de demanda de energía eléctrica, potenciales de recurso renovable y condiciones económicas del proyecto se mantendrán constantes para las evaluaciones de sistemas híbridos, sólo eólicos, y sólo fotovoltaicos.

Se ingresaron las variables de carga, recursos y proyecto y componentes (Tabla N°14).

Tabla N°14. Variables de entrada HOMER Energy demanda energía eléctrica y potencial de recurso renovable.

<b>Variables de entrada</b>			
<b>Recursos</b>	Solar	Ciclo diario anual radiación (W/m <sup>2</sup> )	Figura 15.
	Eólico	Ciclo diario anual velocidad de viento (m/s)	Figura 13.
		Altura (m) de los datos de velocidad de viento	20 metros
<b>Carga</b>	Demanda eléctrica	Ciclo diario anual consumo eléctrico (kW)	Figura 10.
		Promedio (kW)	15,6
		Peak (kW)	80
<b>Carga</b>	Red	Precio de compra kW (\$)	0,230
		Precio de venta kW (\$)	0,120
<b>Proyecto</b>	Variables económicas	Tasa de inflación estimada	10%
		Tasa nominal de descuento	8%
		Vida útil del proyecto	20 años
		Moneda variables	Dólar US
	Equipos	Cantidad de equipos	Unidades

#### 4.3.2. Resultados sistemas posibles HOMER Energy

HOMER Energy con las variables de entrada y las opciones de componentes que se le entregó en cada caso creó todas las combinaciones posibles de estos componentes como opciones de sistemas de producción de energía eléctrica para la demanda del SSR.

Para escoger el sistema óptimo, en primer lugar, se crearon gráficos de dispersión con las variables de capital inicial y autonomía de cada sistema, en donde de estas se seleccionan sólo los sistemas que alcancen una mayor autonomía por un mismo capital inicial, es decir aquellos puntos que aparecen más alto dentro la nube de puntos.

En los tres casos, sistemas híbridos, sólo solares y sólo eólicos se pudo observar una curva que se estabiliza en la nube de puntos, es decir que existe un punto en el cual la autonomía se estabiliza en todos los casos de estudio.

En la Figura 16, se evalúan los sistemas híbridos mediante las variables de autonomía y capital inicial, mediante un gráfico de dispersión.

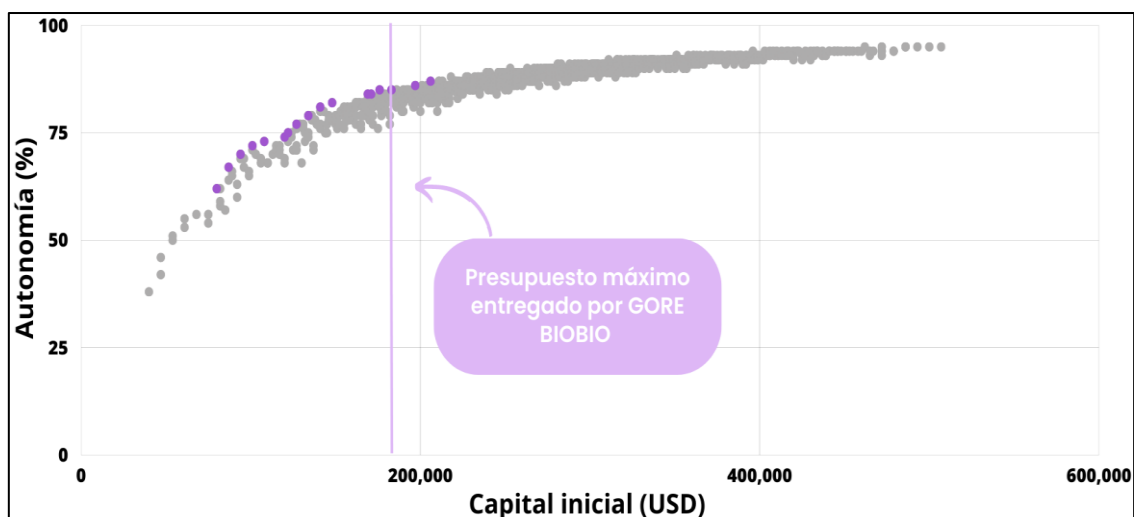


Figura N°16. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas híbridos.

Fuente: Elaboración propia a través de software HOMER Energy.

Para el caso de evaluación de sistemas híbridos de energía eléctrica (Figura 16), HOMER Energy dio como resultado 2000 simulaciones combinando los componentes entregados, y se observa que la autonomía se comienza a estabilizar en una inversión inicial en el rango entre 150.000USD y 200.000USD. Si se considera el capital máximo entregado por GORE Biobío a iniciativas de ampliación y conservación de SSR/APR en la provincia de Arauco, el cual es 182500USD considerando el precio de US dólar a 789,26 CLP, la mayor autonomía fue de 85%.

El sistema que alcanzó la autonomía más alta de todas las simulaciones fue de 94,8%, lo cual se acerca a ser un sistema completamente autónomo, sin

embargo, el capital inicial de este sistema es de 493.000USD, esto nos indica que, aunque se logre una mayor autonomía, probablemente no sea lo óptimo para nuestro caso de estudio considerando otras variables, como lo son la inversión inicial.

Por otro lado, al analizar la nube de puntos, los puntos más bajos de la nube corresponden a aquellos que alcanzan menor autonomía por capital inicial. Los sistemas que corresponden a estos puntos serían los menos óptimos en nuestro caso de estudio.

Considerando que nuestros sistemas óptimos son los cuales nos entregan una mayor autonomía por capital inicial, aquellos puntos en donde la curva de la nube de puntos se estabiliza también son considerados como los sistemas menos óptimos, puesto que el aumento de la inversión no es directamente proporcional con el aumento de autonomía.

Los sistemas que no fueron considerados óptimos según este gráfico tenían en común estar compuestos por aerogeneradores de potencia 25kW, mientras que los óptimos tenían 0 unidades de aerogeneradores de potencia 25kW en su combinación, por lo cual este equipo sería considerado como el menos eficiente en nuestra área de estudio, ya que esto depende de la velocidad de viento en el punto y altura a la que será instalado el aerogenerador.

En el caso de los componentes solares, los sistemas que obtuvieron menor autonomía por capital inicial fueron aquellas combinaciones que incluían 0 equipos fotovoltaicos, o aquellas combinaciones que incluían equipos fotovoltaicos que en conjunto suman 21kW, por lo cual en un sistema híbrido la cantidad de paneles fotovoltaicos óptima es 2 a 3 unidades de 7,2kW de potencia y 0 a 2 unidades de 2,475kW de potencia.

En la Figura N°17, se evalúan los sistemas sólo eólicos mediante las variables de autonomía y capital inicial, mediante un gráfico de dispersión.

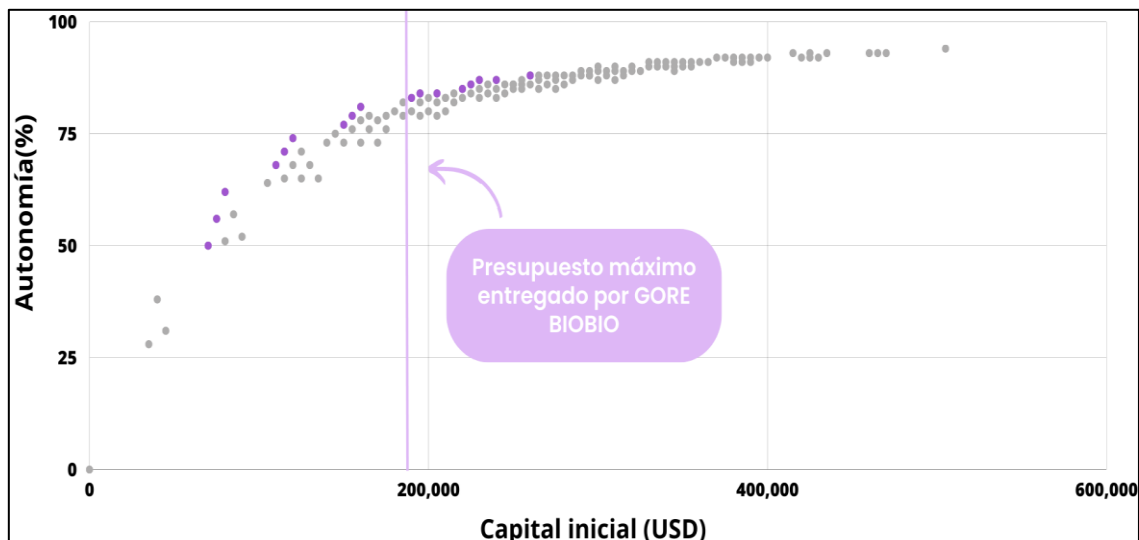


Figura N°17. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas eólicos.

Fuente: Elaboración propia a través de software Homer Energy.

En la evaluación de sistemas abastecidos sólo con equipos eólicos (Figura 17), HOMER Energy creó 140 posibles sistemas combinando los distintos componentes ingresados.

La curva de la nube de puntos se comienza a estabilizar entre los 180.000USD y los 220.000USD alcanzando rangos de autonomía de entre 74% y 84%.

Para el capital máximo entregado por GORE Biobío a iniciativas de ampliación y conservación de SSR/APR en la provincia de Arauco, el cual es 182.500 USD considerando el precio de US dólar a 789,26 CLP, el sistema que alcanzó mayor autonomía fue de 80%, un 5% menor que la mayor autonomía a 182.500 USD de los sistemas híbridos.

El sistema que alcanza la mayor autonomía es de 93,86%, sólo un 0,94% menor que el sistema con mayor autonomía de los sistemas híbridos. El sistema con



mayor autonomía es también el sistema que requiere mayor capital inicial, de 505.000USD, 12.000USD mayor que la opción con mayor autonomía híbrida.

Al igual que en el caso de los sistemas híbridos, los sistemas considerados menos óptimos en esta nube de puntos son aquellos que consideran dentro de sus componentes equipos aerogeneradores de 25kW de potencia.

Las soluciones sólo eólicas, a pesar de obtener alta autonomía del sistema, no lograron equiparar la autonomía de las soluciones híbridas en ninguna de sus combinaciones, esto se debe también a que la disponibilidad de recursos eólicos y solares varía de manera distinta a través de ciclos diarios y anuales.

Dado que tenemos como objetivo buscar un sistema que pueda otorgar la autonomía más alta posible al sistema, y otorgue continuidad de servicio, no se considerarán las soluciones sólo eólicas dentro de los sistemas óptimos.

En la Figura N°18, se evalúan los sistemas sólo abastecidos por generadores fotovoltaicos mediante las variables de autonomía y capital inicial, mediante un gráfico de dispersión.

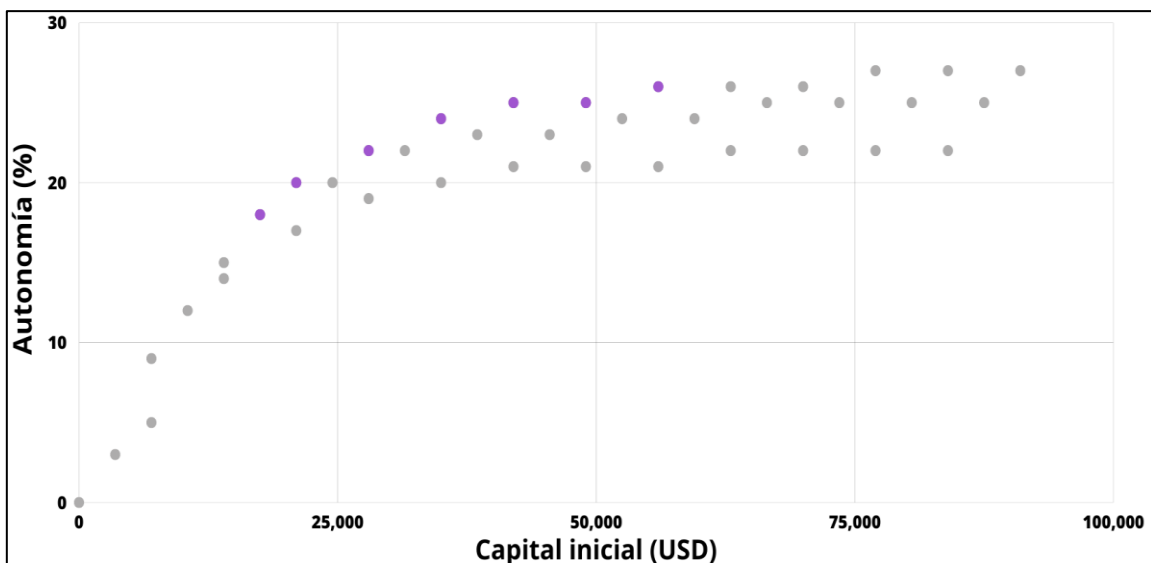


Figura N°18. Gráfico de dispersión según variable capital inicial y autonomía. Sistemas fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración propia a través de software HOMER Energy.

En el caso de sistemas sólo fotovoltaicos (Figura N°18), HOMER Energy creó 40 simulaciones de sistemas posibles combinando los componentes entregados. Ninguno de estos sistemas alcanzó una autonomía mayor que 27% y la curva comienza a estabilizarse desde el orden de la autonomía del 20%, en el rango de capital inicial de 24.000USD y 35.000USD. El sistema que ocupa la máxima cantidad de equipos entregados en los componente de las variables de entrada, es decir 86,4kW en equipos fotovoltaicos de 7,2kW y 4,95kW en equipos fotovoltaicos de 7,2kW, sin embargo este sistema sólo alcanzó el 27,01% de autonomía, mientras que su capital inicial es de 91.000USD.

En el caso de los sistemas de equipos exclusivamente fotovoltaicos los resultados evidencian que una mayor cantidad de equipos y por tanto una mayor inversión inicial no necesariamente responde a lograr una mayor autonomía.

Las soluciones sólo solares al igual que las soluciones sólo eólicas no equiparan los resultados obtenidos por los sistemas híbridos en autonomía, y además se obtienen fracciones renovables menores a 27%, por lo que la inversión en sólo equipos fotovoltaicos podría contribuir en un aspecto económico, más no en la autonomía del servicio, por lo tanto, las soluciones sólo solares no serán consideradas dentro de la selección sistema óptimo.

#### 4.3.3. Selección de sistema óptimo

Dentro de la evaluación los sistemas menos productivos fueron los sistemas abastecidos por equipos solo fotovoltaicos, alcanzando sus fracciones renovables de entre 20% y 27%

Por otra parte, los sistemas abastecidos sólo por aerogeneradores, se obtienen resultados que se pueden considerar igual de eficientes que los sistemas híbridos, dependiendo qué variables consideremos como prioridad, en este caso la autonomía, en donde los resultados demostraron que los sistemas híbridos FV/Eólicos permiten alcanzar niveles mayores, por lo tanto la selección del sistema óptimo para abastecer eléctricamente el Servicio Sanitario Rural se realizó a partir de la simulaciones de sistemas híbridos.

Una vez hecha la selección de soluciones con mayores valores de autonomía, con potencial de lograr mayor autonomía, esta selección de soluciones se evaluó bajo el indicador kWh/Capital inicial (USD), representada en un gráfico de dispersión en la Figura N°19, el sistema óptimo será aquel cuyo indicador y autonomía alcancen en conjunto los mayores valores. También se seleccionó dos una opción que sucede al sistema óptimo bajo estas variables.

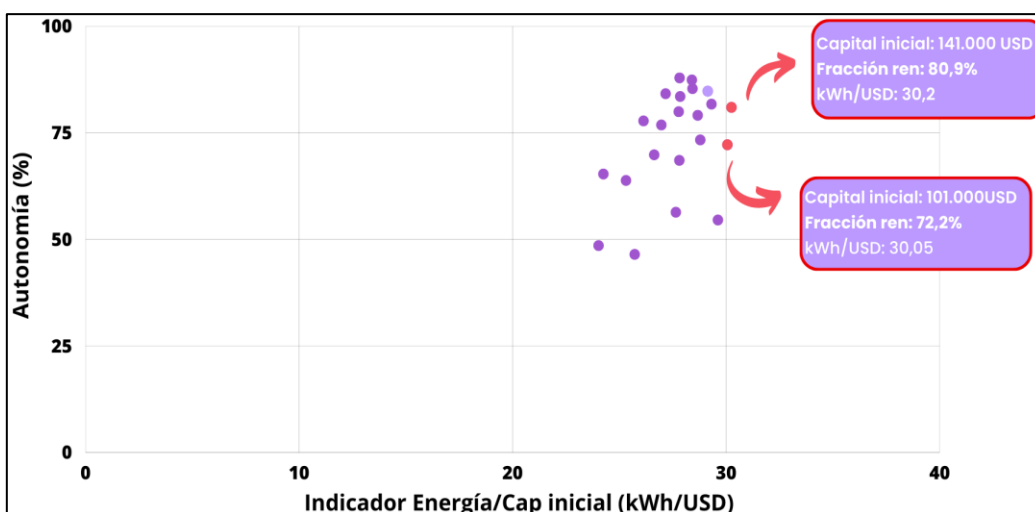


Figura N°19. Indicador kWh producidos por el sistema 20 años / Capital inicial USD.

Fuente: Elaboración propia a través de variables obtenidas en HOMER Energy

#### 4.3.4. Características opción óptima

La opción óptima seleccionada estima 30,2 kWh por 1USD de capital inicial, está compuesta de 14,4kW en equipos fotovoltaicos de 7,2kW de potencia, 4,95 kW en equipos fotovoltaicos de 2,475 kW de potencia, y 3 unidades de aerogeneradores de 20 kW de potencia (Tabla N° 15).

La inversión inicial total para estos equipos es de 111.285.660 CLP a la fecha, considerando una conversión de 789,26CLP = 1 USD.

Tabla N°15. Características sistema óptimo

<b>Sistema óptimo 1</b>				
<b>Paneles solares 7,2 kW (Unidad)</b>	<b>Torres eólicas 20 kW (Unidad)</b>	<b>Capital inicial (USD)</b>	<b>Autonomía (%)</b>	<b>Payback (Años)</b>
3	3	141000	80,9	4,2

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

Considerando el ahorro estimado en compra de energía eléctrica a la red según las tarifas pagadas en 2022, y considerando una tasa de inflación del 10% anual, se calcula un periodo de retorno de la inversión inicial (Payback), el cual en el caso de esta opción sería de 4,2 años.

Cada componente, es decir, eólico y solar, estima una producción mensual y anual, la producción de energía eléctrica mediante recursos renovables no es constante, ya que en el caso de la velocidad de viento y radiación estos varían según horario del día y además según las estaciones del año, por lo cual cada mes del año tendrá un porcentaje distinto de producción de energía eléctrica mensual por componente, HOMER junto con esto estima la compra a la red. (Figura N°20).

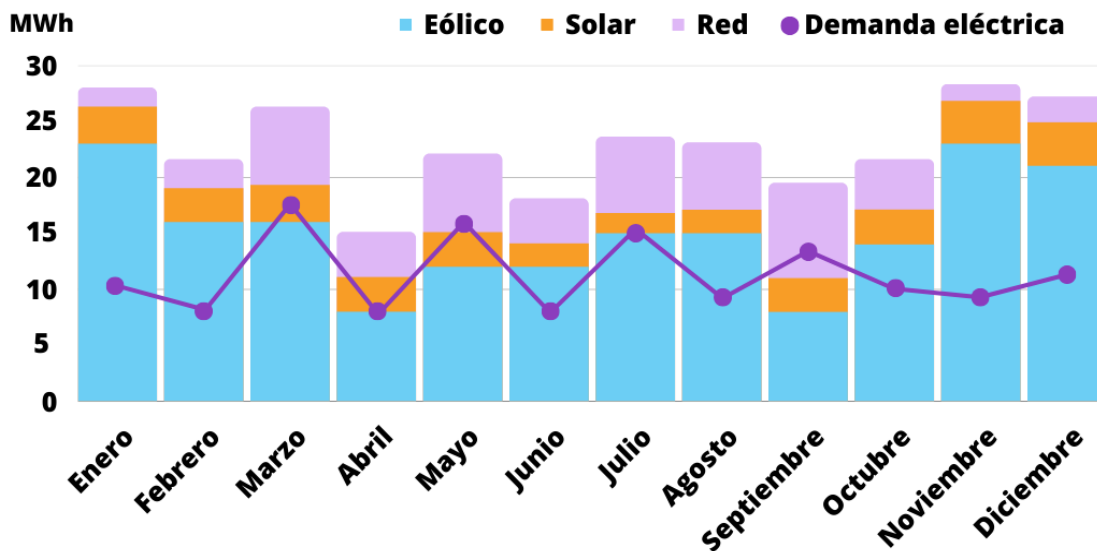


Figura N°20. Producción de energía eléctrica mensual por componente.  
Fuente: Gráfico elaborado con información entregada por HOMER Energy.

Para este sistema los meses con mayor autonomía serán los meses de noviembre y enero, alcanzando autonomías de 86% y 88% respectivamente, lo cual coincide con los meses con mayor velocidad de viento y radiación.

Los meses con menor autonomía son los meses de mayo y septiembre, con autonomías de 58% y 54% respectivamente, meses en que funciona la captación de Gorgolén, por lo cual la demanda de energía eléctrica es mayor, por otra parte, septiembre es el mes con menor velocidad de viento promedio, siendo el mes que produce una menor energía eléctrica a partir de equipos eólicos (Figura 20).

Según se puede observar en la Figura N°20, los componentes solar y eólico estiman una producción de energía mayor a la demanda actual de energía eléctrica en todos los meses de incluso más del 50%, excepto en los meses de mayo y septiembre.

A pesar de que la producción de energía eléctrica a través de las fuentes eólicas sea alta, debido al potencial eólico del área de estudio, el porcentaje de

producción de energía eléctrica anualmente a partir de los equipos fotovoltaicos del sistema óptimo es de un 11% (Tabla N°16).

Tabla N°16. Producción anual por componente sistema óptimo

<b>Producción sistema óptimo 1</b>	
<b>Componente</b>	<b>Porcentaje anual (%)</b>
<b>Paneles solares 7,2 kW</b>	11
<b>Torres eólicas 20 kW</b>	70
<b>Compra a la red</b>	19

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

El sistema al no tener almacenamiento de la energía eléctrica producidas por sus componentes considera venta de la energía eléctrica producida a la red y compra de energía eléctrica a la red cuando la energía producida por el sistema no cumpla la demanda de energía del SSR, o por seguridad de los procesos del SSR se decida abastecer al SSR de la red, en casos de peak de demanda.

Tabla N°17. Estimación de energía producida por la solución consumida por el SSR y excedente para venta a la red

<b>Consumo</b>	<b>kW/año</b>	<b>Porcentaje anual (%)</b>
<b>Carga al Servicio Sanitario Rural</b>	146000	55,5
<b>Excedente</b>	117314	44,5

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

En la Tabla N°17 se exponen los datos de consumo de la energía producida por el sistema, el cual produce en total 263.314 kWh/año, en donde 117.314 es excedente, por lo cual la venta a la red sería el panorama ideal, para un uso eficiente del sistema instalado.

La demanda anual estimada del SSR es de 146.000kWh al año, esta demanda anual puede variar según la instalación de nuevos equipos en donde podría aumentar, o en ciertas ocasiones ante algún imprevisto la paralización de actividades en alguna de las captaciones del SSR como lo es la captación Gorgolén que tiene un funcionamiento intermitente.

Aunque no se considerará la venta de energía a la red en esta evaluación dado que la venta a la red depende del contrato que se tenga con la compañía distribuidora, la solución óptima tiene como ventaja la opción de venta a la red, que es beneficiosa frente a una de las problemáticas del Servicio Sanitario Rural, que es el elevado precio de captación Gorgolén, y el desabastecimiento de agua potable a raíz de no poder acceder a pagar el consumo eléctrico de esta captación, ya que además de un ahorro en compra a la red existe la posibilidad de generar un ingreso mediante los excedentes de energía.

#### 4.3.5. Características segunda opción óptima

La segunda opción óptima seleccionada estima 30 kWh por 1USD de capital inicial, está compuesta de 3 equipos fotovoltaicos de 7,2kW de potencia y 2 unidades de aerogeneradores de 20 kW de potencia. La inversión inicial total para estos equipos es de 79.715.260 CLP a la fecha, considerando una conversión de 789,26CLP = 1 USD (Tabla N°18).

Tabla N°18. Características segundo sistema óptimo

Sistema óptimo 2				
Paneles solares 7,2 kW (Unidad)	Torres eólicas 20 kW (Unidad)	Capital inicial (USD)	Autonomía (%)	Payback (Años)
3	2	101000	72,2	3,9

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

Considerando el ahorro estimado en compra de energía eléctrica a la red según las tarifas pagadas en 2022, y considerando una tasa de inflación del 10% anual, se calcula un periodo de retorno de la inversión inicial (Payback), el cual en el caso de esta opción sería de 3,9 años.

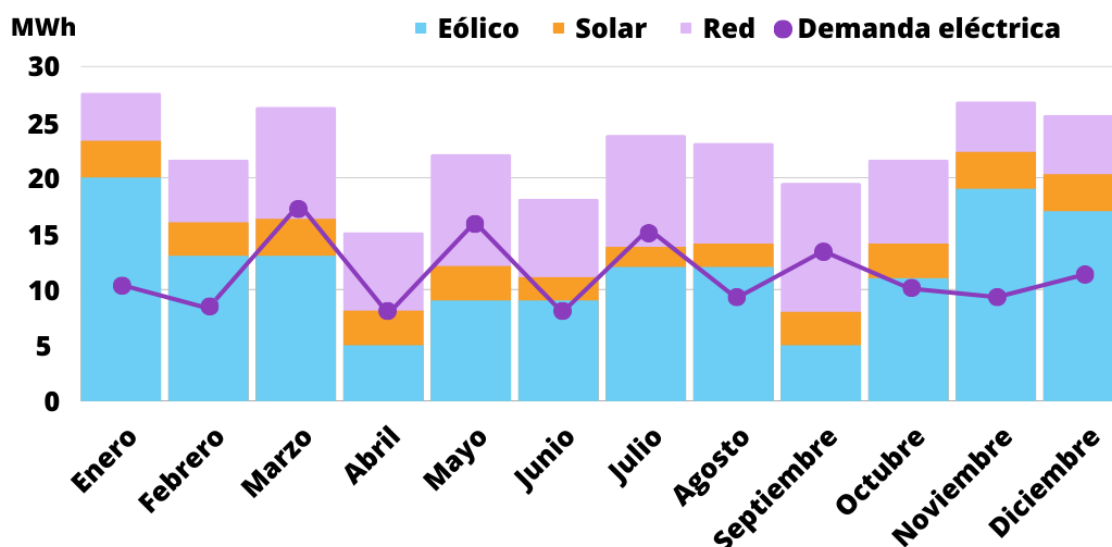


Figura N°21. Producción de energía eléctrica mensual por componente segundo opción sistema óptimo.

Fuente: Gráfico elaborado con información entregada por HOMER Energy.

En la Figura N°21 se puede observar que al igual que en la primera solución óptima los meses con mayor autonomía serán los meses de noviembre y enero, en este caso alcanzando autonomías de 80% y 82% respectivamente, lo cual



coincide con los meses con mayor velocidad de viento y radiación, teniendo en estos meses también excedentes de energía mayores al 50%.

Sin embargo, para los meses de abril y septiembre la autonomía del sistema no supera el 50%, por lo cual ante un eventual corte de la compañía distribuidora de electricidad este sistema podría no hacer frente a cubrir la demanda de energía eléctrica en estos meses con menor disponibilidad de recurso renovable. En este caso, la producción de energía eléctrica por fuentes renovables no supera la demanda estimada en los meses de marzo, abril, mayo, julio y septiembre (Figura N°21).

Tabla N°19. Producción anual por componente segundo sistema óptimo

<b>Producción sistema óptimo 2</b>	
<b>Componente</b>	<b>Porcentaje anual (%)</b>
<b>Paneles solares 7,2 kW</b>	14
<b>Torres eólicas 20 kW</b>	58
<b>Compra a la red</b>	27

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

La segunda solución óptima al estar compuesta por un aerogenerador menos que la primera solución óptima, reduce su producción eólica a un 58%, comparado con el 70% de producción eólica de la primera solución óptima.

En el caso de los componentes solares, los paneles fotovoltaicos en esta solución son el 14% de la producción anual.

Tabla N°20. Estimación de energía producida por la segunda solución, consumida por el SSR y excedente para venta a la red.

<b>Consumo</b>	<b>kWh/año</b>	<b>Porcentaje anual (%)</b>
<b>Carga al Servicio Sanitario Rural</b>	146000	69,5
<b>Excedente</b>	65185	30,5

Fuente: Elaboración propia a través de datos entregados por HOMER Energy.

La energía producida anualmente calculada para la segunda solución óptima es de 210.185 kWh, en la cual un 69,5% es consumida por el SSR, y un 30,5% es excedente considerado para venta de energía a la red (Tabla N°20).

#### 4.3.6. Análisis comparativo de sistemas escogidos

Tabla N°21. Análisis comparativo entre ambos sistemas óptimos.

	<b>Sistema 1</b>	<b>Sistema 2</b>
<b>Continuidad Servicio Sanitario Rural</b>	Asegura una mayor continuidad del servicio sanitario al tener durante todos los meses del año autonomía mayor al 54%	Los meses de abril y septiembre estiman autonomías energéticas menores a 50% por lo que aseguran menor continuidad de servicio.
<b>Ahorro económico</b>	Se estima un ahorro en consumo a la red de un 81%	Se estima un ahorro sólo un 8% menor al sistema 1
<b>Uso de terreno</b>	Precisa un uso de terreno de 176m <sup>2</sup> mayor que el sistema 1.	Precisa de una menor área de ocupación.
<b>Payback</b>	Se retorna la inversión considerando el ahorro en un plazo de alrededor 4 meses mayor que el sistema 1.	Retorno de la inversión inicial considerando el ahorro, de 3,9 años
<b>Excedente de energía</b>	117 MW (anual)	65 MW (anual)

Un análisis de las simulaciones creadas por HOMER, a través de sus variables de salida, llevó a que se identificaran dos sistemas que obtuvieron un rendimiento mayor en generación de energía eléctrica en la zona de estudio, y para las necesidades prioritarias del Servicio Sanitario Rural. Para ambos se realizó un análisis comparativo de sus características, en donde la selección de cuál es el óptimo dependerá de las preferencias y necesidades del usuario. Mientras que el Sistema 1, tiene como su mayor ventaja, asegurar autonomía energética durante todo el año por sobre el 54% e incluso alcanzando un 92% en los meses de mayor producción, siendo la opción que puede asegurar mayor continuidad, por otra parte precisa de 176m<sup>2</sup> más de terreno que su contraparte el Sistema 2, al contemplar una turbina eólica más, sin embargo este mismo

factor, también proporciona una mayor seguridad de autonomía, en el caso de que una de las tres turbinas eólicas presente una falla, frente al Sistema 2, que sólo estaría compuesto por dos turbinas eólicas.

El Sistema 2 a diferencia del Sistema 1, contempla un capital inicial 40.000USD menor que el Sistema 1, junto con lo mencionado anteriormente, una necesidad de terreno sustancialmente menor. El Sistema 2 por su parte, estima una autonomía energética de un 72% anual, y por lo tanto un payback en base al ahorro de compra de energía a la red, de 3,9 años.

Si bien el Sistema 1, es el sistema que asegura un mejor resultado en cuanto al objetivo principal de aumentar la continuidad del Servicio Sanitario, asegurar una autonomía, y maximizar el ahorro en compra de energía eléctrica a la red, el Sistema 2 también estima resultados altos de autonomía y ahorro, y tiene como ventaja menor necesidad de terreno y capital inicial.

El sistema óptimo entre las dos opciones escogidas dependerá de la disponibilidad de capital inicial, y de terreno que disponga el SSR, o también dentro de las prioridades económicas del mismo.

## 5. Conclusiones

Se caracterizó el consumo de energía eléctrica del Servicio Sanitario Rural satisfactoriamente mediante la identificación de la información de potencia y horario de uso de los equipos, esto se logró verificar con los datos de consumo a compañía eléctrica desde los años 2017 a 2022, se pudo realizar un ciclo diario anual de la demanda eléctrica del SSR, para luego poder evaluar como satisfacer esta demanda, se comprobó que los meses en donde funciona la captación de Gorgolén, la demanda horaria del SSR aumenta hasta tres veces la demanda de energía eléctrica, superando los 40 kWh.

Al determinar el potencial de recurso renovable disponible en la zona, de recurso eólico y solar, se destacó, el alto potencial eólico que se determinó en la zona geográfica de Pehuén, sobre todo en los meses correspondientes a verano, en los cuales, la velocidad de viento a 20 metros de altura registra valores sobre los 7m/s. Mientras que por otra parte el potencial solar, no registra un potencial de radiación tan elevado como lo fue en el caso del potencial eólico, y también registra alta disminución en las horas de radiación durante los meses de invierno. Estos datos abrieron la interrogante sobre si es lo óptimo para el SSR un sistema híbrido de energía, o dado el alto potencial eólico, proponer un sistema sólo de energía eólica.

Se crearon simulaciones para, sistemas híbridos, sistemas sólo eólicos y sistemas sólo de paneles fotovoltaicos. En el caso de las simulaciones de sistemas sólo de generación fotovoltaica, ninguna obtuvo una autonomía mayor a 27%, por otro lado, las simulaciones de sistemas de energía generada sólo por turbinas eólicas, obtuvieron altos valores de autonomía, de hasta un 93,86%, a pesar de estos excelentes resultados, las simulaciones de sistemas híbridos, llegaron a superar el 94% de autonomía, y también registraron capitales iniciales

en promedio 20.000 USD menores que las simulaciones sólo eólicas, para los mismos porcentajes de autonomía.

Los sistemas híbridos fueron determinados como los óptimos, en este caso, ya que se obtuvieron mayores autonomías, por una menor inversión, a pesar de esto, la simulación con la autonomía mayor, no es siempre la mejor opción.

Considerando las variables de, capital inicial, costo de mantención, retorno de la inversión y el indicador de energía generada por costo de inversión, se consideró como el sistema óptimo para el SSR de Pehuén, un sistema que estima un 80,92% de autonomía y con un payback de 4,2 años. Considerando que este sistema no pueda ser factible para el SSR por diversas razones, se consideró una segunda opción la cual obtuvo el segundo indicador más alto de energía generada por costo de inversión. Esta segunda opción se consideró ya que su costo de inversión inicial es 40.000 USD menor que la primera opción óptima, y requiere una cantidad menor de terreno disponibles.

Es por esto que el sistema óptimo de energía renovable no es aquel que produce una mayor cantidad de energía, sino el sistema que se ajuste a los requerimientos del consumidor, en este caso el SSR de Pehuén.

## 6. Referencias

American Society of Civil Engineers (ASCE). Guiding Principles for the Nation's Critical Infrastructure; ASCE Press: Reston, VA, USA, 2009.

Ayop, R.; Isa, N.M.; Tan, C.W. 2018. Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2731–2743.

Budds, J. (2004). POWER, NATURE AND NEOLIBERALISM: THE POLITICAL ECOLOGY OF WATER IN CHILE. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 25(3), 322–342.

Bustos S., Gallardo L., Garreaud R. & Tondreau N. 2015. La Megasequía 2010–2015: una lección para el futuro. Informe a la Nación. Centre for Climate and Resilience Research (CR)2, Chile.

Clarvis, M. H. & Allan, A. 2014. Adaptive capacity in a Chilean context: a questionable model for Latin America. *Environmental Science & Policy* 43, 78–90.

Cuesta MA, Castillo-Calzadilla T, Borges CE. 2020. A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: an emerging opportunity to include social indicators to optimize systems in small communities. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;122.

Dawoud, S. Lin X., Okba M. 2018. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018 February 1;82(Part 3):2039–52.

Donoso, G., Calderón, C., & Silva, M. 2015. Informe Final De Evaluación Programa De Agua Potable Rural. Santiago: DIPRES, Ministry of Finance.

Donoso, G. (Ed.). 2018. Water Policy in Chile. *Global Issues in Water Policy*.

Dirección General de Aguas. (2022). PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN CUENCA DEL RÍO LEBU, RÍO CARAMPANGUE Y CARAMPANGUE LEBU

Explorador eólico (2022). Explorador de energía eólica. Ministerio de Energía.

Explorador solar (2022). Explorador de energía eólica. Ministerio de Energía.

Fuster, R., Jara, P., Vidal, K., Descoop, A., & F. 2016. Estado del Arte y Desafíos de los Servicios Sanitarios Rurales. Santiago: Laboratorio de Análisis Territorial (LAT) de la Universidad de Chile.

Fuster, R. y Donoso, G., 2018. "Rural water management", en Donoso, G. (Ed.), *Water Policy in Chile*, Vol. 21. Springer Series "Global Issues in water Policy", Springer International Publishing, Switzerland, pp. 151-163.

Kotulla, M., Gono, M., Gono, R., Vrzala, M., Leonowicz, Z., Klosok-Bazan, I., & Boguniewicz-Zablocka, J. 2022. Renewable Energy Sources as Backup for a Water Treatment Plant. *Energies*, 15(17), Article 6288.

Ministerio Secretaría General de Gobierno de Chile (2021), Guía de fondos concursables 2020-2021.

Ministerio de obras públicas (2018), Implementación Ley 20.998 Regulación Servicios Sanitarios Rurales. Noviembre de 2018.

Nelson-Nuñez, J., Walters, J. P., & Charpentier, D. 2019. Exploring the challenges to sustainable rural drinking water services in Chile. *Water Policy*.

Sinha, S., y Chandel, S. S. (2014). Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 192–205.

Superintendencia de Servicios Sanitarios, Informe de gestión del sector sanitario 2018, Santiago, 2019, 231 pp.

Schuster, J. P. y Tapia, F., 2017. “El modelo de gestión comunitaria del agua potable rural en Chile: contexto institucional, normativo e intenciones de reforma”, *Foro Jurídico*, N° 16. pp. 110-120

United Nations General Assembly. 2020 UN Resolution A/RES/64/292: the human right to water and sanitation. UN: New York, 2010. <https://undocs.org/A/RES/64/292> (accessed March 10, 2020).

Vargas-Ferrer, P., Álvarez-Miranda, E., Tenreiro, C., Jalil-Vega, F., 2022. Assessing flexibility for integrating renewable energies into carbon neutral multi-regional systems: The case of the Chilean power system, *Energy for Sustainable Development*, 442-455,

Wang, E., Gozgor, G., Kumar Mahalik, M., Patel, G., Hu, G., (2022). Effects of institutional quality and political risk on the renewable energy consumption in the OECD countries, *Resources Policy*, Volume 79

Watts, D., Osses, N., Pérez, D. 2016. Assessment of wind energy potential in Chile: A project-based regional wind supply function approach, *Renewable Energy*, Volume 96, Part A, 2016, Pages 738-755, ISSN 0960-1481,

Zhou, W.; Lou, C.; Li, Z.; Lu, L.; Yang, H. 2010. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Appl. Energy* 87, 380–389



