



Universidad de Concepción
Centro de Ciencias Ambientales
EULA-CHILE
Ingeniería Ambiental



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ERNC PARA
ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO DEL SERVICIO SANITARIO
RURAL (SSR) EN LA LOCALIDAD DE VILLA MERCEDES,
COMUNA DE QUILLECO**

**Habilitación presentada para adquirir el título de
Ingeniera Ambiental**

MARÍA CAROLINA ACUÑA ARRIAGADA

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Profesora Co-Guía: Dra. Ana Baeza

Concepción, Chile

2023

“Evaluación de un sistema híbrido ERNC para abastecimiento del servicio eléctricos del servicio sanitario rural (SSR) en la localidad de Villa Mercedes, Comuna de Quilleco”

Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza



Profesor Co-Guía: Dra. Carolina Baeza Freer



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, septiembre 2023

Índice General

Índice de tablas	iii
Índice de Figuras	iii
Agradecimientos	vi
Introducción	1
1. Antecedentes Generales	3
1.1. Seguridad hídrica y abastecimiento	3
1.1.1. Definición de seguridad hídrica en Chile	3
1.1.2. Aguas superficiales y subterráneas	4
1.2. Desafío de abastecimiento hídrico en el sector rural.....	6
1.2.1. Fuentes de abastecimiento hídrico en zonas rurales.....	6
1.2.2. Dimensiones que afecta el del desabastecimiento hídrico en zonas rurales	9
1.3. Servicios sanitarios rurales en Chile	10
1.3.1. Ley 20.998	10
1.3.2. Problemas de continuidad del servicio de los SSR.....	12
1.3.3. Situación de Villa Mercedes.....	15
1.4. Energías Renovable en el sector sanitario	17
1.4.1. Energías renovables no convencionales	17
1.4.2. Beneficios e implementación de las ER en sector rural.....	19
2. Pregunta de Investigación	21
3. Objetivos	21
3.1. General	21
3.2. Específicos.....	21
4. Metodología	22
4.1. Área de estudio	22
4.2. Caracterizar consumo de energía eléctrica del SSR.....	27
4.2.1. Estimación de consumo eléctrico horario mensual.....	27
4.2.2. Validación de consumo eléctrico horario mensual	29

4.3.	Determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR.....	29
4.3.1.	Potencial Solar.....	30
4.3.2.	Potencial Eólico	30
4.3.3.	Potencial Hidroeléctrico	30
4.4.	Seleccionar el sistema solar/eólico óptimo para abastecer el consumo del SSR	32
4.4.1.	Supuestos realizados	32
4.4.2.	HOMER Pro.....	32
4.4.3.	Catálogo de paneles solares y turbinas eólicas.....	33
4.4.4.	Optimización de HOMER con información recopilada	35
4.4.5.	Criterio de selección para sistema óptimo Solar/fotovoltaico.....	36
4.4.6.	Investigar alternativas de subsidio de financiamiento para el sistema de autoabastecimiento	36
5.	Resultados y Discusión	38
5.1.	Caracterizar consumo de energía eléctrica del SSR.....	38
5.1.1.	Estimación de consumo eléctrico horario mensual.....	38
5.1.2.	Validación de consumo eléctrico horario mensual.....	39
5.2.	Determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR.....	41
5.2.1.	Potencial Solar.....	41
5.2.2.	Potencial Eólico	43
5.3.	Seleccionar el sistema óptimo para abastecer el consumo de electricidad del SSR.....	44
5.3.1.	Optimización de HOMER con información recopilada	44
5.3.2.	Sistemas óptimos Solar/fotovoltaico obtenidos.....	44
5.3.3.	Investigar alternativas de subsidio de financiamiento para el sistema de autoabastecimiento	50
5.3.4.	Terrenos tentativos para implementación de sistema óptimo Solar/fotovoltaico.....	51

6. Conclusiones y Recomendaciones.....	52
7. Referencias Bibliográfica.....	54
8. Anexos.....	59

Índice de tablas

Tabla 1. Población urbana y rural villa mercedes censada 2017	26
Tabla 2. Información técnica paneles solares	34
Tabla 3. Información técnica turbinas eólicas.....	34
Tabla 4. Información económica agregada al HOMER	44
Tabla 5. Información de sistema seleccionado.....	49
Tabla 6. Área de cada zona tentativa (m ²)	51

Índice de Figuras

Figura 1. Relación entre caudales superficiales medios anuales y demanda de extracción	5
Figura 2. Actividades de demanda consuntiva en Chile	6
Figura 3. Gráfico circular con distribución de fuentes de abastecimiento de agua informales	7
Figura 4. Porcentaje de abastecimiento informal de localidades dispersas para la Región del Biobío en el periodo 2014-2018.....	9
Figura 5. Organigrama de ley 20.998 y Servicios sanitarios rurales (SSR) ...	11
Figura 6. Distribución geográfica de los SSR	13
Figura 7. Distribución geográfica de los SSR que presentaron cortes en el periodo 2014-2018.....	14
Figura 8. Esquema típico de SSR	17
Figura 9. Gráfico matriz energética primaria en Chile, año 2019	18
Figura 10. Red hidrográfica subcuenca del río Biobío entre río Vergara y río Laja	23
Figura 11. Mapa de uso de suelo de la comuna de Quilleco.....	24
Figura 12. Referencia cartográfica localidad de Villa Mercedes.....	25
Figura 13. Mapa ubicación de sectores del SSR de Villa Mercedes	26
Figura 14. Diagrama de proceso de la planta de tratamiento de aguas servidas	28
Figura 15. Diagrama de proceso de la planta de agua potable.....	28
Figura 16. Mapa estaciones pluviométrica de la red hidrográfica subcuenca río Vergara.....	31
Figura 17. Esquema típico de sistemas híbridos de energía renovable en Homer	33
Figura 18. Estimación escala de color horario mensual de consumo eléctrico (kwh)	38
Figura 19. Box plot de consumo mensual del SSR	39
Figura 20. Validación consumo mensual del SSR.....	40
Figura 21. Gráfico horario mensual de la radiación global horizontal (W/m ²)	41
Figura 22. Gráfico horario mensual temperatura (°C)	42

Figura 23.	Gráfico horario mensual velocidad de viento a 30 metros de altura	43
Figura 24.	Gráfico dispersión relación entre Autonomía del Sistema y Costo de Inversión con paneles solares	45
Figura 25.	Gráfico dispersión relación entre Autonomía del Sistema y Costo de Inversión con turbinas eólicas	46
Figura 26.	Gráfico dispersión relación entre Autonomía y Costo de Inversión con sistema híbrido.....	47
Figura 27.	Indicador Costo capital (CLP)/Energía(kWh) vs Autonomía del sistema híbrido	48
Figura 28.	Producción de electricidad del sistema óptimo	49
Figura 29.	Terrenos tentativos para implementación de ERNC	51

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, personas que han sido fundamentales en este viaje académico. Prestando su tiempo, disposición, compañía, palabras de aliento y tranquilidad financiera. Su confianza y apoyo fue sustancial para llegar aquí.

También quiero hacer mención a mi compañero de vida, Bastián Chávez, quien en más de una oportunidad me levantó en mis momentos de frustración, siendo mi roca en momentos de incertidumbre, siempre dispuesto a escucharme y recordar mis capacidades cada vez que fue necesario. Me encuentro agradecida profundamente de su disposición a ayudarme a resolver cada problema que se presentó en este camino.

A mi profesor guía, Pedro Arriagada, su paciencia y disposición lo valoro profundamente, dispuesto a repetir las explicaciones las veces que fuera necesaria para mi comprensión, además de lo académico me enseñó a confiar en mis capacidades, alentándome y convenciéndome de ellas. Su perseverancia demuestra su vocación y compromiso como docente.

No puedo dejar de mencionar a mi facuamigo, Sebastián Morales, quien me ha acompañado en este viaje académico y ahora la culminación de nuestras respectivas tesis. Compartiendo cada momento de altos y bajos y prestando el hombro de apoyo en cada momento requerido.

También quiero agradecer a Natalia Iriarte quien me brindo sus conocimientos los cuales fueron fundamentales para entender y comprender cómo funciona la estructura de los SSR, agradeciendo también el apoyo material y las pequeñas clases que me realizó.

Por último, quiero dedicar un agradecimiento a mi angelito de 4 patas, Maxito. Aunque nos dejó a días del inicio de este proceso, sé que estuvo en cada noche de desvelo acompañándome en su sillón.

Introducción

La seguridad hídrica es un tema crucial a nivel mundial. En Chile y mayormente en los sectores rurales, el abastecimiento de agua potable es un desafío constante. En ayuda de estos casos existen los servicios sanitarios rurales (SSR), los cuales tienen un papel fundamental en la entrega de agua potable a las comunidades rurales. Sin embargo, la mayoría de estos servicios dependen de fuentes de energía no renovables, lo que aumenta su vulnerabilidad y los hace menos sostenibles. Es por eso que la evaluación de sistemas híbridos de energía renovable no convencional (ERNC) es un tema de suma importancia para lograr abastecer eléctricamente los SSR logrando beneficios tales como autonomía, menor costo en el precio eléctrico, seguridad de continuidad del servicio. Direccionando esta situación, puntualmente en la localidad de Villa Mercedes, comuna de Quilleco, ubicada en la región del Biobío, nos encontramos con un lugar donde se presenta un gran desafío hídrico y energético, ya que es una de las zonas con mayor abastecimiento informal a nivel nacional.

La región del Biobío, es la región con mayor abastecimiento informal a nivel nacional, y se convierte en un escenario crucial para abordar estos desafíos. Esta investigación busca contribuir al desarrollo de soluciones energéticas adecuadas y eficientes para el abastecimiento eléctrico del SSR en la localidad de Villa Mercedes.

Esta tesis tiene como objetivo evaluar la autonomía de un sistema híbrido eólico/solar para abastecer eléctricamente el SSR de Villa Mercedes, y para ello se plantean objetivos específicos como caracterizar el consumo de energía eléctrica del SSR, determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR y seleccionar el sistema solar/eólico óptimo para abastecer el consumo de electricidad del SSR.

En esta situación, la evaluación de la autonomía de un sistema híbrido eólico/solar para abastecer eléctricamente un SSR es un tema de gran importancia, ya que

puede contribuir a mejorar la sostenibilidad y la seguridad hídrica en las comunidades rurales de Chile.

En un mundo en constante evolución y con crecientes preocupaciones sobre el medio ambiente y la sostenibilidad, la búsqueda de soluciones energéticas eficientes y respetuosas con el entorno se ha convertido en una prioridad global. En este escenario, el abastecimiento eléctrico en zonas rurales adquiere una importancia fundamental, ya que contribuye al bienestar de las comunidades y al desarrollo económico local.

1. Antecedentes Generales

1.1. Seguridad hídrica y abastecimiento

1.1.1. Definición de seguridad hídrica en Chile

El agua, recurso indispensable para la vida humana, la biodiversidad y la supervivencia planetaria, es fundamental para la existencia misma. En pocas palabras sin agua no hay vida. Es por esto que la seguridad hídrica se vuelve vital (Rojas & Barra., 2020). El término seguridad hídrica, fue discutido por primera vez en el segundo Foro mundial del agua en el año 2000, evento en el cual Chile fue partícipe. Diversos actores de organizaciones chilenas propusieron una definición de seguridad hídrica para el país: “La propuesta de definición de Seguridad Hídrica para Chile implica tener acceso al agua en un nivel de cantidad y calidad adecuada, definida por cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo, tanto para la salud, subsistencia, desarrollo socioeconómico y la conservación de los ecosistemas, manteniendo una alta resiliencia frente a amenazas asociadas a sequías, crecidas y contaminación” (Fuster et al., 2018).

La inexistencia de seguridad puede llevar a repercusiones e impactos negativos. Dentro de las macro consecuencias de la falta de seguridad hídrica se encuentran: consecuencias sociales, económicas y ambientales graves. En más detalle puede conllevar a escasez de agua, afectar la salud y el bienestar de la población (Rojas & Barra., 2020), conduce a efectos en la pérdida de biodiversidad, la degradación de los suelos, por consecuencia también se ve amenazada la producción agrícola y, por lo tanto, la seguridad alimentaria también se encontraría bajo amenaza, representando una fuente de pobreza y migración rural (Donoso G., 2018).

1.1.2. Aguas superficiales y subterráneas

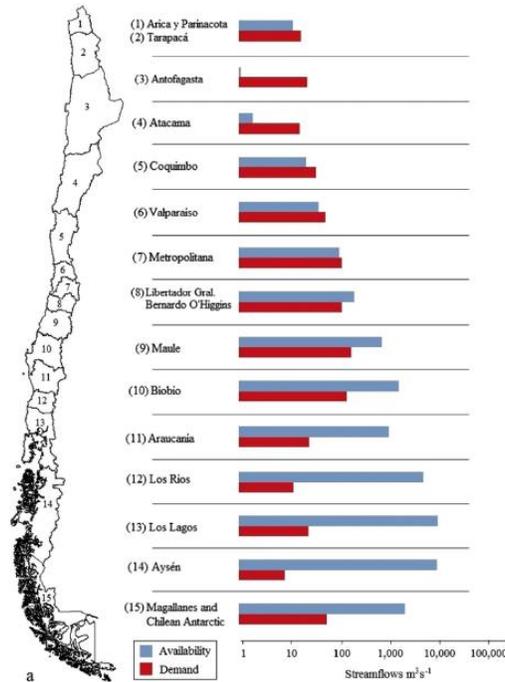
En cuanto a las aguas superficiales, se encuentran alrededor de 12.784 cuerpos de agua en el país (Baeza & Torres., 2020) y en general, los recursos hídricos existentes, contienen agua de alta calidad, e importantes reguladores del flujo de la cuenca (Salazar., 2003), como se citó en Banco Mundial, 2011, el uso excesivo de las aguas subterráneas ha sido el más afectado con el tiempo. En el 2015, la DGA (Dirección General de Aguas) declaró que el 11% de las aguas superficiales chilenas se encuentran agotadas.

En las últimas dos décadas el uso de pozos en la agricultura ha sido de 6 veces más que hace 20 años, por otro lado, el uso de pozos para agua potable ha aumentado 4 veces su extracción y la minería, ha duplicado su consumo. Por consecuencia, se declararon 153 acuíferos restringidos y 4 prohibidos en las macrorregion norte¹ y centro (Donoso G, 2018).

Producto de esta sobreexplotación de los acuíferos en el norte y centro de Chile se ha generado una situación de sequía permanente, ya que la demanda del recurso hídrico supera la disponibilidad de agua en estas zonas. No obstante, la relación extracción/disponibilidad de agua se presenta propicio entre las regiones del Libertador Bernardo O'Higgins, la Araucanía, y de la región de Los Lagos, al sur la disponibilidad del recurso hídrico supera ampliamente la disponibilidad hídrica (Donoso et al., 2012).

¹ Incluye las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo

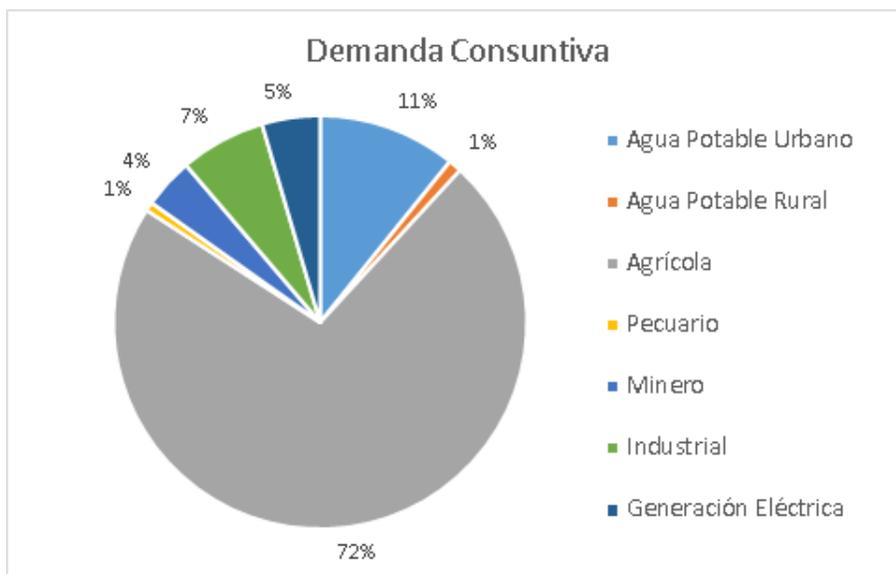
Figura 1. Relación entre caudales superficiales medios anuales y demanda de extracción



Fuente: (Valdés-Pineda et al., 2014)

Respecto a los recursos subterráneos de Chile se tiene que la extracción total de agua es de 4.900 m³/s, donde el 93% corresponde a usos no consuntivos y el 7% restante a usos consuntivos. Dentro de los usos no consuntivos se encuentra el uso acuícola 58% y la generación eléctrica 42%. Por otro lado, para los usos consuntivos se tiene, Agrícola 72% siendo el principal usuario consuntivo de agua, le sigue el agua potable urbana 11%, industrial 7%, generación eléctrica 5%, minero 4%, agua potable rural 1%, pecuario 1%. (Baeza & Torres, 2020). Esto se puede observar mejor en la figura 2.

Figura 2. Actividades de demanda consuntiva en Chile



Fuente: Elaboración propia con datos de Biblioteca Nacional (Baeza & Torres, 2020)

Es crucial destacar que todos los usos consuntivos de agua han aumentado un 13% entre 1990 y 2010 (Donoso et al., 2012).

Sin embargo, a diferencia de las zonas urbanas donde el 99,6% de la población utiliza servicios de agua potable de manera segura, en las zonas rurales esta cifra baja a 80,8%. Es así como los servicios sanitarios de agua potable rural no logran garantizar los estándares mínimos óptimos para la vida diaria. De este modo se encuentra que aproximadamente 350 mil personas han presentado interrupciones en el suministro de agua (SNU, 2021).

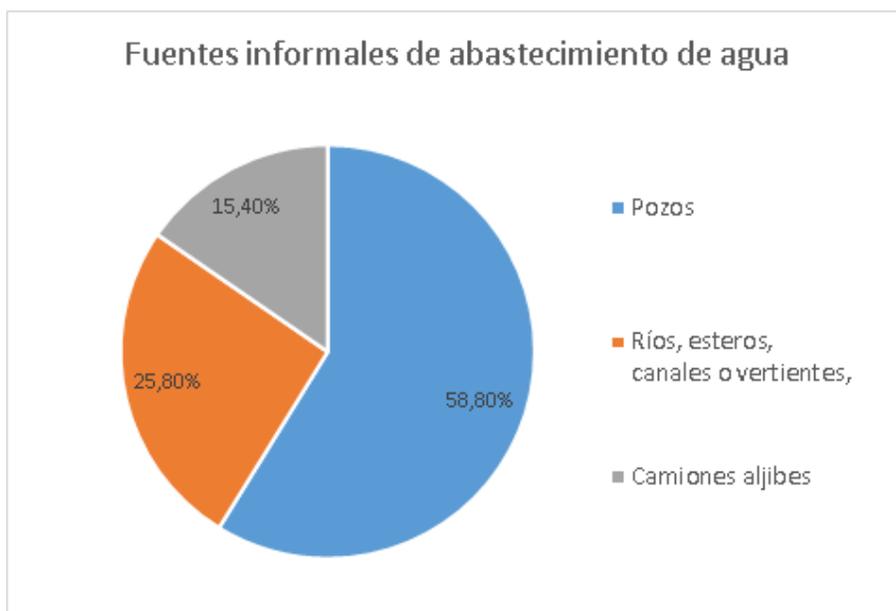
1.2. Desafío de abastecimiento hídrico en el sector rural

1.2.1. Fuentes de abastecimiento hídrico en zonas rurales

Tratándose de seguridad hídrica en el sector rural de Chile, se encuentra deficiente, puesto que la infraestructura hídrica aún es limitada en la mayoría de las regiones

de las zonas rurales del país, más aún, es preocupante que el 47,2% de la población rural no cuenta con un abastecimiento seguro de agua potable, peor aún, la calidad del agua que consumen no está siendo garantizada ni supervisada y son las poblaciones rurales más pobres son las que poseen mayor suministro de estas fuentes (Morales et al., 2019). Si bien históricamente hablando, en 1960 la cobertura de agua potable en la población rural era solo del 6%, al 2018 esta cifra aumentó a un 53% atendiendo así a 1.787.916 beneficiarios (Donoso et al., 2015). Pero aún existen 383.204 viviendas de la población rural en Chile las que aún no poseen la serenidad de una fuente de abastecimiento de agua segura, así es como la población rural carente se abastece de agua a través de pozos o ríos, lagos o esteros. En detalle el 58,8% se abastece desde pozos, le sigue el 25,8% de la población la cual se abastece de ríos, esteros, canales o vertientes y por último el 15,4% se abastece a través de camiones aljibes (Morales et al., 2019) tal como se puede apreciar en la figura 3.

Figura 3. Gráfico circular con distribución de fuentes de abastecimiento de agua informales



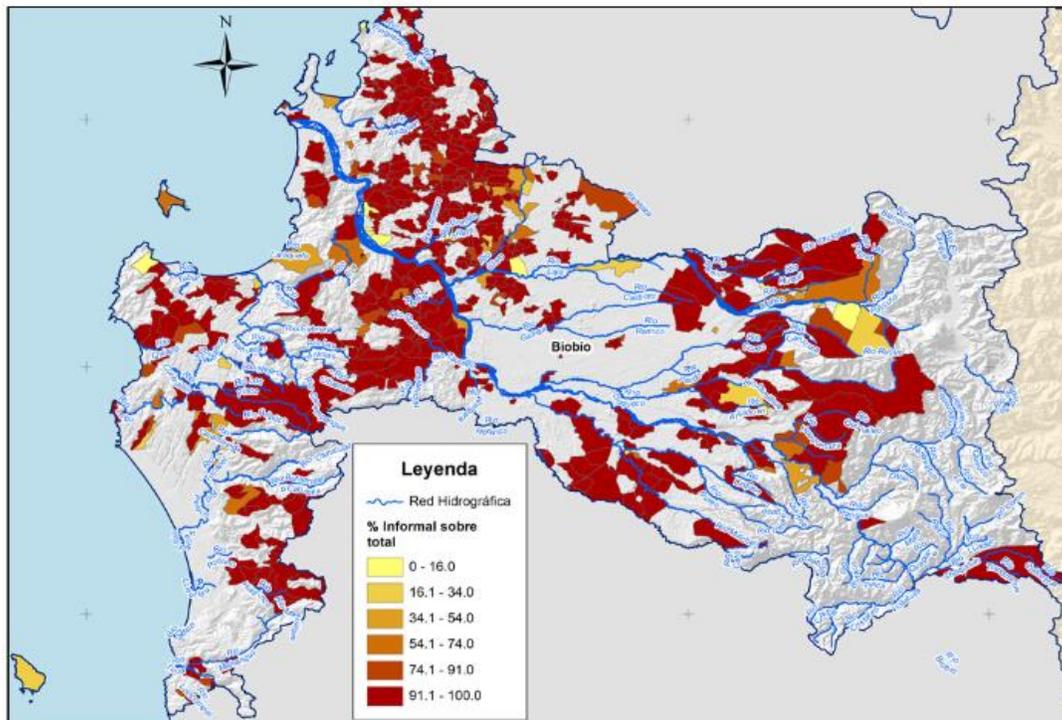
Fuente: Elaboración propia con datos (INE 2017, como se citó en Morales et al., 2019)

En los últimos 5 años se ha calculado un gasto de 150.000.000.000 \$CLP en compra de camiones aljibes, esto es equivalente a construir dos hospitales de alta complejidad.

En el momento actual cuatro son las regiones más afectadas a lo largo de nuestro país las que están siendo abastecidas informalmente, donde se encuentra la región de la Araucanía, la región del Biobío, los Lagos y la región de los Ríos (Morales et al., 2019).

Específicamente para la región del Biobío en todas sus provincias se presentan localidades con alto porcentaje de desabastecimiento, teniendo así más de 11.000 viviendas sin suministro de agua potable. Las más damnificadas corresponden a Florida, Santa Juana, Nacimiento y Hualqui. Según un análisis realizado por Morales et al. (2019) la Provincia de Biobío corresponde a la población con acceso de agua más informal.

Figura 4. Porcentaje de abastecimiento informal de localidades dispersas para la Región del Biobío en el periodo 2014-2018



Fuente: (Morales et al., 2019)

1.2.2. Dimensiones que afecta el del desabastecimiento hídrico en zonas rurales

El acceso al agua es indispensable tanto en el sector urbano como en el rural, la carencia de esta afecta múltiples dimensiones tales como la salud, el sector educacional, económico y, por último, equidad de género.

- Salud: Según datos de Oxfam Intermón 361.000 son los infantes que mueren cada año a causa de la diarrea la cual es provocada principalmente por falta de saneamiento, agua potable e higiene (Prüss-Ustün et al., 2014). El saneamiento ineficiente y el agua impurificada también están directamente

relacionados con el contagio de enfermedades como la hepatitis A, el cólera, la fiebre tifoidea y la disentería (Roberto et al., 2001).

- Educación: La educación se ve afectada por los estudiantes producto que los menores de vez en cuando deben dedicar tiempo a recolección de agua, en vez de asistir a su jornada escolar. En regiones más críticas como lo es en el caso de la región de la Araucanía existen jardines infantiles y escuelas básicas que se deben abastecer de camiones aljibes, bidones y pozos.
- Económico: Un estudio de la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que entre tres y 34 dólares se ahorran en saneamiento por cada \$1 dólar invertido en agua potable. En el mismo contexto el valor del litro de agua equivale a aproximadamente \$0,36 pesos versus los \$150 por litro de agua del abastecimiento por bidones de agua (Morales et al., 2019).
- Equidad de género: La equidad de género se ve perjudicada en consecuencia que las mujeres pasan de una a tres horas más al día que los hombres en tareas domésticas. Es así como en la mayoría de los hogares rurales la mujer es la encargada de reservar el recurso hídrico (Duflo, E. 2012).

1.3. Servicios sanitarios rurales en Chile

1.3.1. Ley 20.998

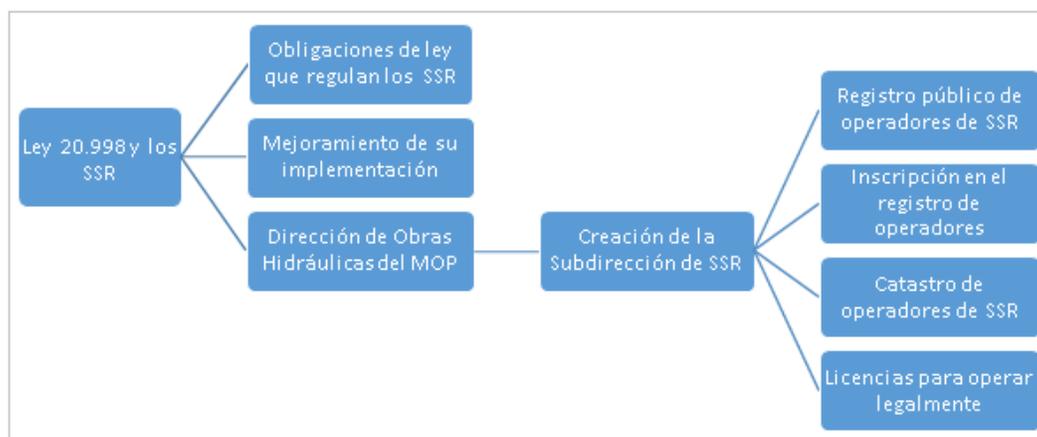
Los servicios sanitarios rurales o también llamados SSR por sus siglas, son servicios sin fines de lucro que consisten en el suministro de agua potable y se encargan de llevar a cabo proyectos de saneamiento, gestión comunitaria, entre otros servicios. Estas están reglamentadas por la ley de Servicios Sanitarios Rurales, la ley 20.998, la cual fue publicada el 14 de febrero del año 2017 en el Diario Oficial de la República de Chile y entró en vigor en noviembre del 2020, estableciendo "Un marco jurídico e institucional que regula la prestación de servicios

sanitarios rurales, y reconoce a las organizaciones que prestan estos servicios” (BCN, 2016).

Dentro de los criterios que establece la ley, dicta que los SSR deben ser operados por un comité o una organización cooperativa, los cuales previamente deben poseer una licencia para operar (BCN, 2016). La ley establece que el abastecimiento de agua potable para los habitantes de la zona rural debe ser garantizado por los SSR al igual que el saneamiento de este. También se instaura un catastro de operadores de Servicios Sanitarios Rurales (MOP, mayo 2023).

La Dirección de Obras Hidráulicas del MOP, Ministerio de Obras Públicas, es la agencia de gobierno encargada de la Subdirección de Servicios sanitarios rurales la cual posee la responsabilidad de implementar la ley y supervisar el funcionamiento correcto de los servicios sanitarios rurales (BCN, 2020), funciones entre las que se encuentran: promoción de las organizaciones sociales, apoyando, capacitando asesorando y también asistiendo a los SSR en todo el proceso de implementación de la ley (MOP, mayo 2023.).

Figura 5. Organigrama de ley 20.998 y Servicios sanitarios rurales (SSR)



Fuentes: Elaboración propia con información de BCN, (2020)

Por otro lado, se encuentra la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) un organismo público encargado de realizar: cálculo tarifario, supervisar, fiscalizar y

garantizar la debida culminación de las regulaciones establecidas por la ley, de igual modo, la SISS tiene la potestad de sancionar a las organizaciones que infrinjan la ley (BCN, 2020).

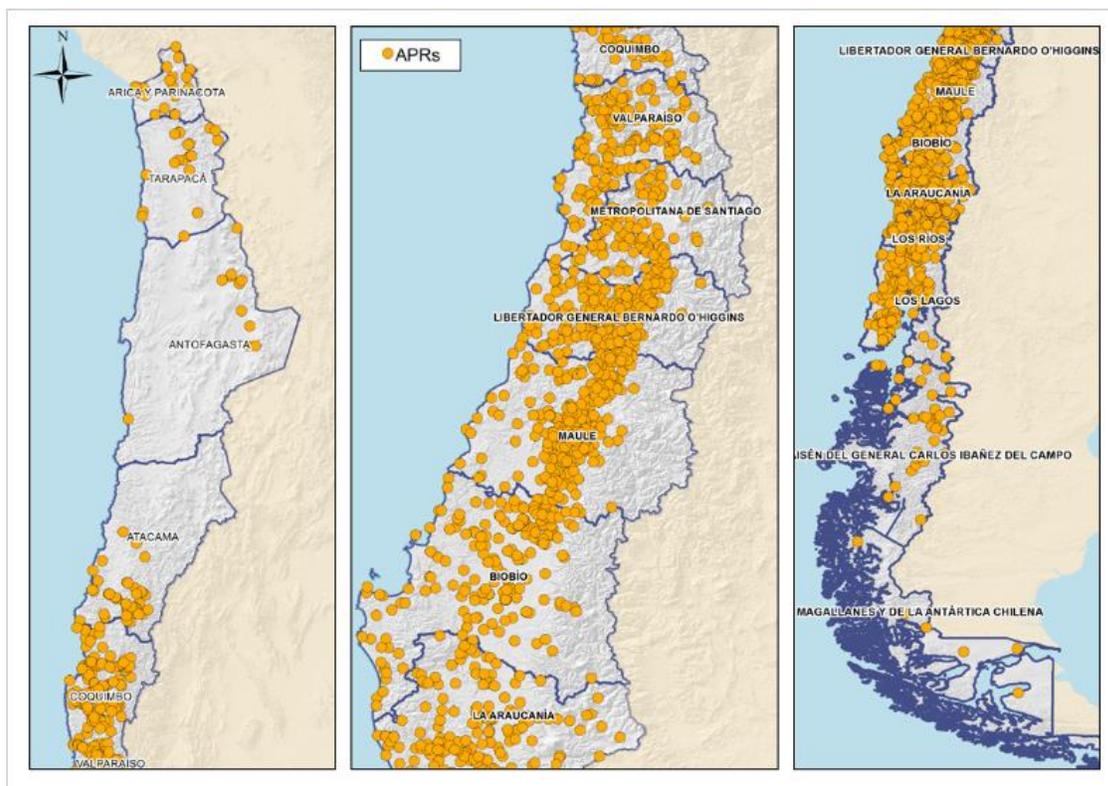
1.3.2. Problemas de continuidad del servicio de los SSR

Hasta el año 2017, de acuerdo con el informe presentado por Morales et al. (2019), se pudo constatar un total de 1.875 servicios sanitarios rurales atendiendo a una cifra de 1.787.916 beneficiarios, distribuida en diferentes proporciones entre las distintas macrozonas del país, siendo un 5,5% correspondiente a la macrozona norte, un 52% a la macrozona centro² y un 42,5% abarcando la macrozona sur-austral³. Esta distribución geográfica se puede observar de mejor modo en la figura 6.

² Comprende regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule

³ Regiones que incorpora, Biobío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos, Aysén, Magallanes

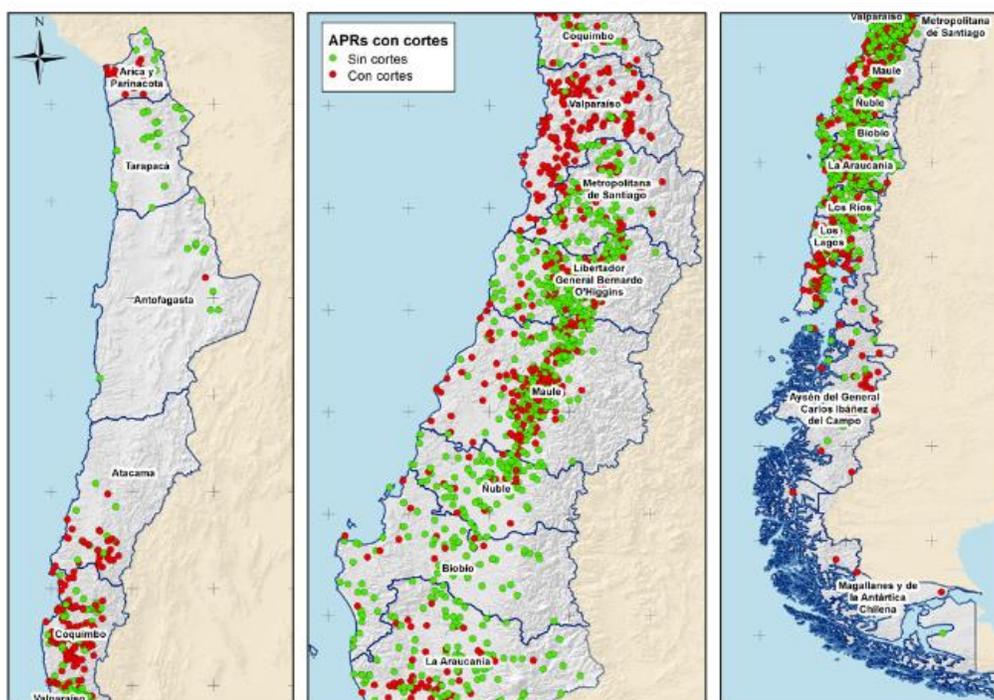
Figura 6. Distribución geográfica de los SSR



Fuente: (Morales et al., 2019)

A nivel nacional, aproximadamente el 80% de los Servicios Sanitario Rural (SSR) tienen un alto nivel de continuidad en el servicio, lo que significa que cumplen con el objetivo de suministrar agua potable de manera constante. Sin embargo, a lo largo del tiempo, alrededor del 20% de los APR ha experimentado cortes en el suministro de agua de forma anual. La distribución de estos cortes muestra que el 54,5% se concentra en la macrozona centro, seguido por el 29,1% en la macrozona sur y, en último lugar, el 16,3% en la macrozona norte, dejando así a familias completas sin suministro de agua.

Figura 7. Distribución geográfica de los SSR que presentaron cortes en el periodo 2014-2018



Fuente: (Morales et al., 2019)

A nivel regional, este porcentaje varía significativamente, desde un 7% anual en la región de Biobío hasta un 69% en la región de Valparaíso. La mayoría de estos cortes se deben a razones operacionales, ya sea por problemas internos de gestión o factores externos como cortes de energía eléctrica. Solo un pequeño 6% de los cortes son programados para realizar mantenimientos en el sistema, lo que significa que la gran mayoría son cortes no programados (94%). Cinco regiones presentan más del 40% de cortes no programados en sus APR: Valparaíso (60%), Tarapacá (51%), Arica-Parinacota (46%), Antofagasta (40%) y Atacama (40%) (Morales et al., 2019).

A continuación, se examinan las causas asociadas a las fallas que presentan los Sistemas de Agua Potable Rural, con un enfoque en los siguientes aspectos:

1. Causas de fuerza mayor, como fenómenos naturales impredecibles, por ejemplo, terremotos o crecidas de ríos.
2. Fallas en la infraestructura, incluyendo roturas, obstrucciones, interrupciones de energía eléctrica, entre otros.
3. Acciones de terceros.
4. Ampliación de redes y/o conexiones.
5. Problemas en los arranques, conexiones, uniones, válvulas, piezas especiales, filtros saturados, etc.
6. Bajo nivel de agua en estanques, deficiencias de producción o disminución del caudal de producción debido a la sequía.
7. Fallas en los equipos, como bombas quemadas, contactos de horario punta quemados, equipos de bombeo, tableros eléctricos, etc.
8. Fallas de impulsión y matriz, relacionadas con fatiga de material, roturas espontáneas o roturas causadas por raíces, entre otras.
9. Problemas en la red de distribución, subestaciones, estanques, etc.
10. Mantenimiento programado de la infraestructura.
11. Fallas causadas por frentes climáticos, como inundaciones en la sala de control o intensas lluvias, entre otros.
12. Red de distribución sin suministro de agua

1.3.3. Situación de Villa Mercedes

En el mismo contexto anterior, dentro de los problemas que presenta Villa Mercedes, se encuentran:

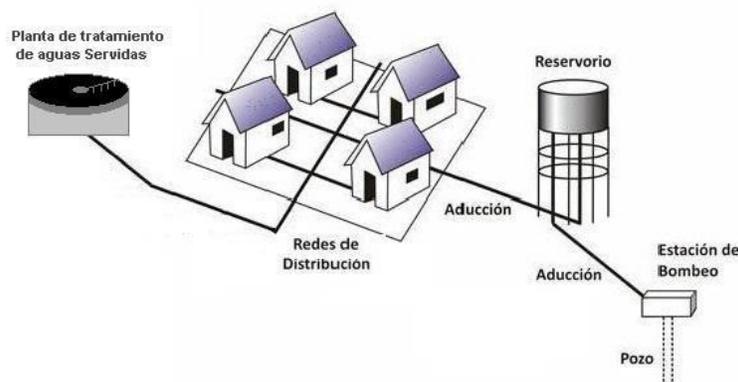
- Falla en los equipos: Las bombas presentan fallas debido a la falta de mantenimiento y reparación adecuados. Esto puede deberse a la falta de recursos o a la falta de personal capacitado para realizar el mantenimiento y las reparaciones necesarias.

- Interrupciones de energía eléctrica: Existen cortes de energía eléctrica a causa de la compañía eléctrica, lo que puede afectar el funcionamiento de las bombas y otros equipos. Estas interrupciones pueden ocurrir de manera imprevista y causar interrupciones en el suministro de agua.
- Cantidad de agua insuficiente: Se enfrentan dificultades en cuanto al volumen de agua proveniente del pozo, lo que puede llevar a fallas en las bombas de Villa Mercedes. Además, la sobreexplotación de los acuíferos en el norte y centro de Chile puede afectar la disponibilidad de agua en Villa Mercedes.
- Acciones de terceros: Producto que el personal nuevo no sabe manipular los equipos, lo que puede llevar a errores y fallas en el sistema.

Estos problemas pueden tener un impacto significativo en la calidad y disponibilidad del servicio de agua en Villa Mercedes. Es importante abordar estos problemas mediante la implementación de medidas de mantenimiento adecuadas, capacitación del personal, coordinación con la compañía eléctrica para minimizar las interrupciones de energía y/o buscar soluciones para ser un SSR lo más autónomo para así garantizar un suministro de agua adecuado a pesar de la sequía y los problemas de volumen del pozo. Refiriéndose al concepto de autonomía como la capacidad del sistema para funcionar de forma autónoma, la capacidad del sistema para generar y suministrar energía de manera independiente y sin conexión a la red total o parcial.

Actualmente y realizando una encuesta a los trabajadores del pueblo Villa Mercedes se informó que presenta interrupciones de energía eléctrica de 5 a 10 minutos semanalmente, por compañía eléctrica (frontel) inestable. Además, menciona que estos cortes de luz aumentan su periodo de tiempo en los meses de invierno.

Figura 8. Esquema típico de SSR



Fuente: Gómez Hernández, (2015)

1.4. Energías Renovable en el sector sanitario

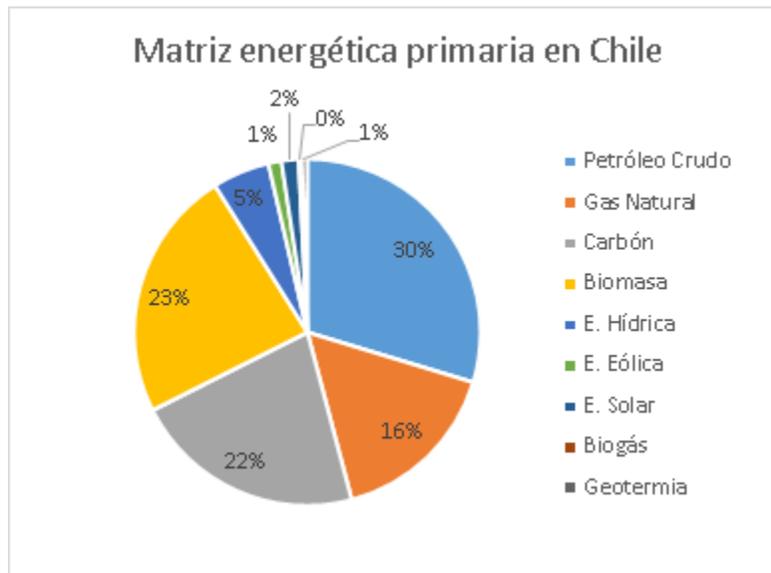
1.4.1. Energías renovables no convencionales

Cuando se habla de energía renovable se refiere a cualquier fuente energética que se encuentre disponible en la naturaleza y que posea la capacidad de regenerarse a sí misma. Las energías renovables (ER) se clasifican en: Energías renovables convencionales (ERC) y Energías renovables no convencionales (ERNC), el término a referirse depende del grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento. Dentro de las ERC la más distinguida equivale a la hidráulica a gran escala, esta debe poseer una capacidad instalada de más de 20 MW (Instituto libertad, 2018). Las energías renovables no convencionales (ERNC) derivan de diversas fuentes categorizadas en primarias y secundarias. La energía primaria es aquella obtenida de fuentes en su estado natural, mientras que la secundaria abarca recursos convertidos o almacenados

En la figura 9 se puede observar que la matriz energética primaria los recursos fósiles son los predominantes, los cuales abarcan, petróleo crudo (30%), carbón

mineral (22%) y gas natural (16%) representando así el 68% de la energía primaria (Ministerio de Energía, 2021).

Figura 9. Gráfico matriz energética primaria en Chile, año 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de Ministerio de energía gobierno de Chile 2021

Dentro de los beneficios que se poseen las ER se encuentra:

- Declive de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y gases de efecto invernadero. Se estima que el uso de ER puede llegar a reducir entre un 41% a 54% las emisiones (CO₂), debido al decrecimiento desde un 37% a un 86% del uso de combustibles fósiles (Gielen et al., 2019).
- Reduce la dependencia a la red eléctrica y mejora la seguridad del suministro de energía (Herrera Jenó, R. 2011).
- Incremento de oferta laboral. Las ERNC generan cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales, estas podrían llegar a generar alrededor de 19 millones de empleos directos e indirectos adicionales mundialmente para el 2050 en el sector de energía renovable, eficiencia y mejora energética (Gielen et al., 2019).

- Contribuyen significativamente al equilibrio interterritorial, ya que tienden a asentarse en áreas rurales (Herrera Jenó, R. 2011).

1.4.2. Beneficios e implementación de las ER en sector rural

Uno de los problemas más apremiantes que presentan los SSR corresponde al gran consumo energético y la falta de continuidad de suministro del mismo, siendo este uno de los principales beneficios que poseen las ERNC en zonas rurales, generando autonomía al consumidor. Bukhary et al. (2017) mencionan que: “El tratamiento del agua, un paso indispensable para salvaguardar la salud pública, es un proceso que consume mucha energía” (p. 256).

Para la industria de tratamiento de agua, alentar el establecimiento de sistemas de generación híbridos in situ para el suministro de energía puede promover positivamente la transformación energética de la industria y contribuir de manera eficiente a la reducción de las emisiones de carbono (Wang et al., 2020).

Según estudios se ha demostrado que se puede reducir la dependencia de la red eléctrica de una planta de tratamiento y al mismo tiempo bajar la carga monetaria en gran medida mediante el uso de ERNC tales como paneles solares, turbinas eólicas y centrales hidroeléctricas, aumentando así la autonomía del sistema. (Bukhary et al., 2017). Ejemplificando en los siguientes casos:

- García-Vaquero et al. (2014) evaluó una planta piloto de nano filtración la cual fue suministrada por energía eólica y solar para comparar su rendimiento con el agua potable y planta de tratamiento, Concluyó que la energía del sistema renovable era adecuada para tratar el agua potable de manera eficiente y sostenible proporcionando así agua de buena calidad a las poblaciones rurales. (p.8).

- Wang et al. (2020) descubrió que el uso de ERNC en plantas de tratamiento era económicamente factible para reducir los costos de electricidad a largo plazo. Del mismo modo, además sostiene que los sistemas híbridos de energía renovables conectados a la red eléctrica amparan a los habitantes de la zona al posible riesgo de alza de precio de la electricidad. (p.13).
- Kotulla et al. (2022) Producto del sistema renovable que tenía Países Bajos en su planta de tratamiento logró optar entre un 70 a un 96% de autonomía energética (p.6). En este mismo contexto, Wang et al. (2020) reafirma estos porcentajes e informa que los sistemas híbridos de eólico-fotovoltaico que se encuentran conectados a la red pueden llegar a alcanzar una autonomía del 95%. (p.1).

2. Pregunta de Investigación

¿Cuánta autonomía eléctrica puede alcanzar un sistema híbrido solar/eólico para abastecer el servicio sanitario rural de Villa Mercedes?

3. Objetivos

3.1. General

Evaluar la autonomía de un sistema híbrido eólico/solar para abastecer eléctricamente el SSR de Villa Mercedes

3.2. Específicos

- 3.2.1. Caracterizar consumo de energía eléctrica del SSR
- 3.2.2. Determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR
- 3.2.3. Seleccionar el sistema solar/eólico óptimo para abastecer el consumo de electricidad de SSR.

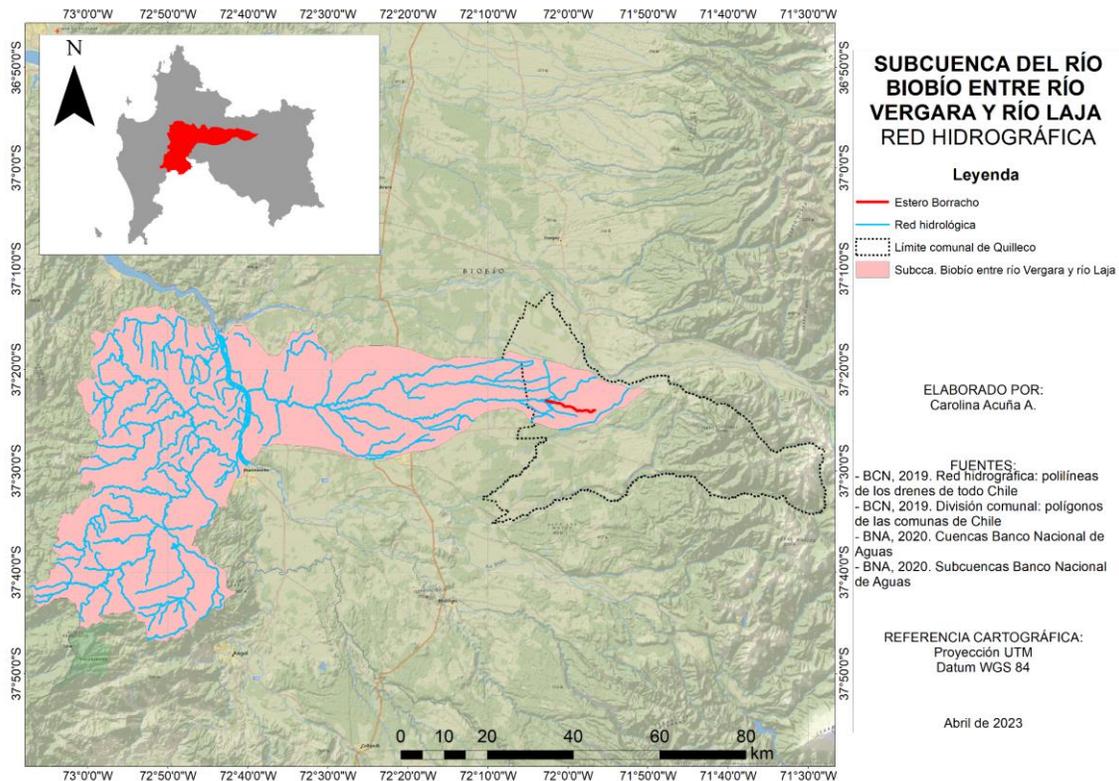
4. Metodología

4.1. Área de estudio

Para la comuna de Quilleco, de acuerdo con la clasificación de Köppen (Beck et al., 2018), predomina el clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea. También es posible encontrar en una reducida zona un clima templado cálido con lluvias invernales. La precipitación media anual es de 1.393 milímetros, con un período seco de 5 meses y una deficiencia hídrica de 693 milímetros por año. (Municipalidad de Quilleco, 2018). La temperatura varía entre un máximo de 28,7 °C en enero y un mínimo de 3,4 °C en julio. En este contexto, los vientos en la comuna a baja altura se encuentran en promedio a 2.5 m/s; en general es una comuna poco ventosa (Explorador eólico, noviembre 2022).

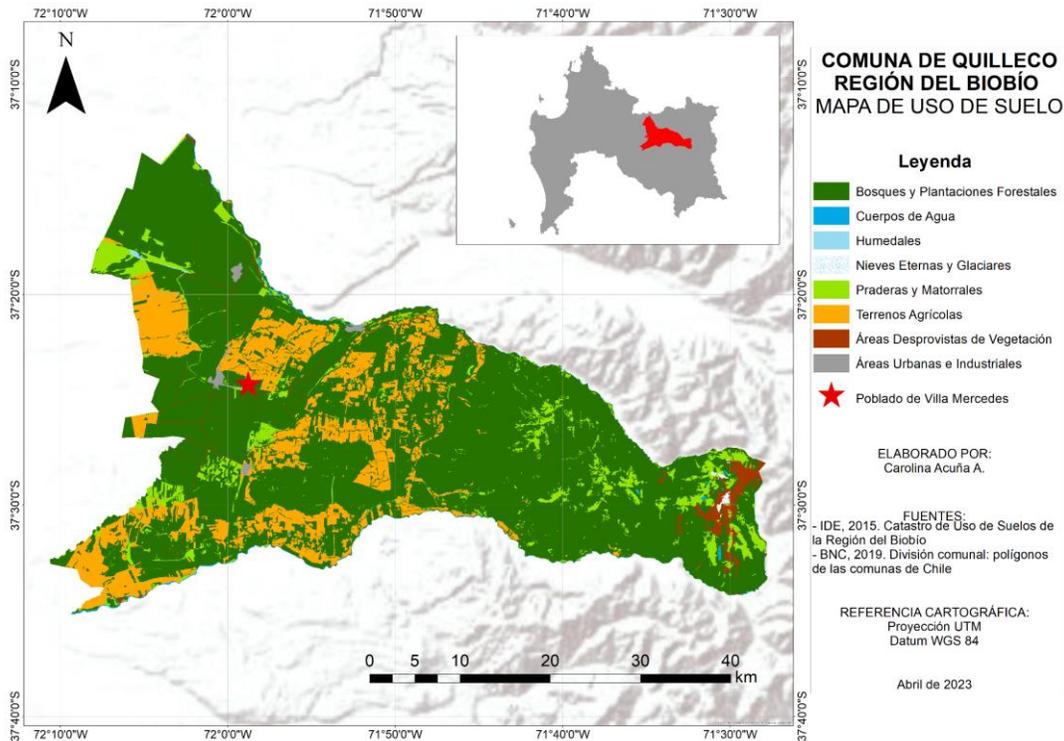
En cuanto a la red hidrográfica de la comuna, la subcuenca principal corresponde al río Biobío, curso de agua el cual integra toda la región del Biobío. En el paso por el valle longitudinal, al encontrarse con la cordillera de la costa el río cambia su curso y en la confluencia con el río Vergara vuelve a su curso normal. En la costa el río recibe al río Laja, su mayor afluente septentrional más importante con un caudal medio de 173 m³/seg el cual desemboca en el río Biobío. En la figura 10 se observa la red hidrográfica de la subcuenca del río Biobío entre río Vergara y río Laja.

Figura 10. Red hidrográfica subcuena del río Biobío entre río Vergara y río Laja



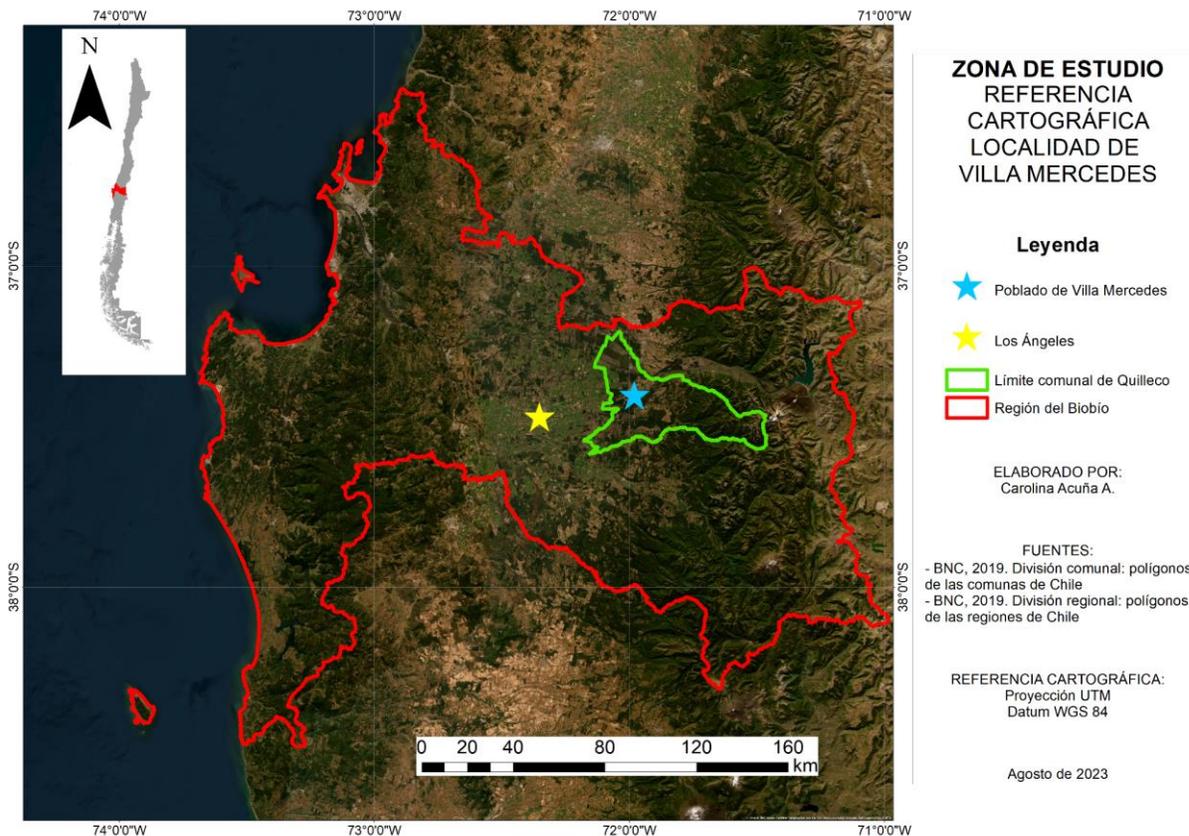
La principal actividad económica en la comuna corresponde al establecimiento de plantaciones forestales con especies exóticas, la mayoría siendo empresas grandes tales como CELCO y MININCO (Municipalidad de Quilleco, 2018). Esto se puede comprobar de mejor manera en la figura 11.

Figura 11. Mapa de uso de suelo de la comuna de Quilleco



Villa Mercedes es un pequeño pueblo precordillerano ubicado en la región del Biobío, en la comuna de Quilleco. Se ubica a 35,6 km de Los Ángeles y a 12,7 km de la cabecera comunal, específicamente en las coordenadas -37.404434° , -71.979666° . Tiene una superficie de 116,2 km² (INE 2019). y la población cuenta con suministro de agua principalmente de SSR, el cual es gestionado por el Comité de Villa Mercedes.

Figura 12. Referencia cartográfica localidad de Villa Mercedes



En 2019, Villa Mercedes se encontraba en el distrito censal de la comuna de Quilleco, lo que representa el 44,9% de la población (INE, 2019). Según el censo de población y vivienda 2017, la comuna de Quilleco tiene una población total de 9.587 habitantes de los cuales 4.720 son hombres y 4.867 son mujeres. En particular, en la localidad de Villa Mercedes, hay una población total de 4.303 y 1.613 viviendas. La tabla 1 muestra la población urbana y rural en la comuna de Quilleco, información relevante para comprender la distribución de la población en el área de estudio.

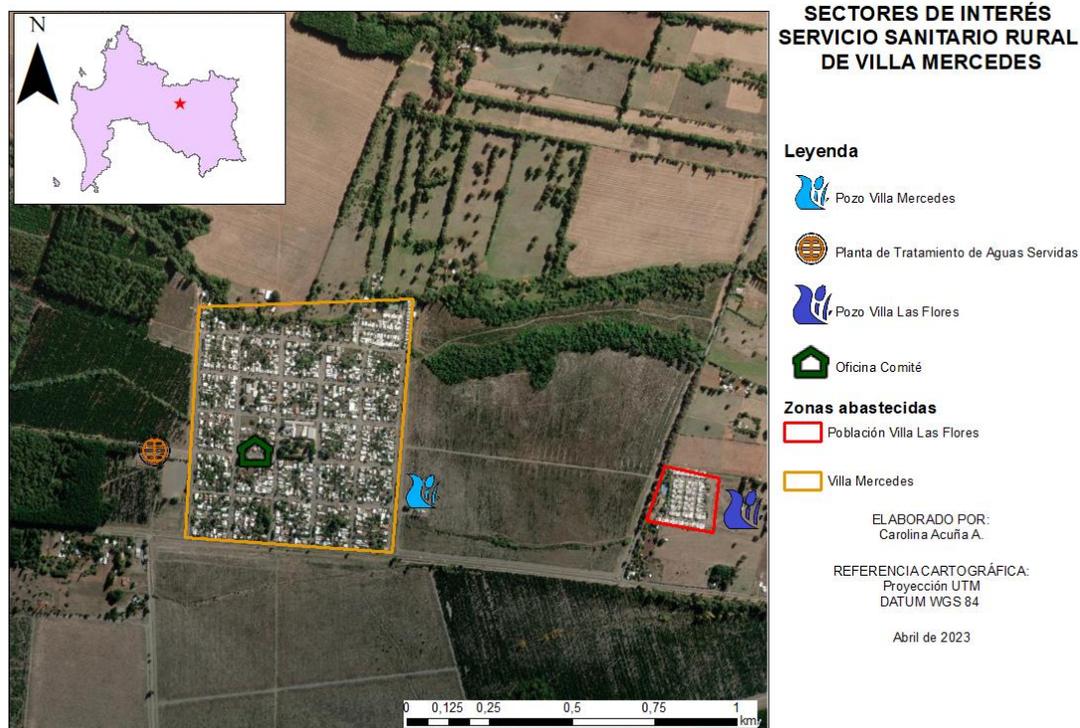
Tabla 1. Población urbana y rural villa mercedes censada 2017

Censo 2017	Urbana	Rural	Total
Población	3.517	786	4.303
Viviendas	1.290	323	1.613

Fuente: INE 2019

El servicio sanitario rural de Villa Mercedes está compuesto por 4 sectores: La oficina del comité de Villa Mercedes, la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS), la planta de agua potable de Villa las Flores y, finalmente, la planta de agua potable de Villa Mercedes (figura 13). Esta información es relevante para comprender la infraestructura de servicios en el área de estudio.

Figura 13. Mapa ubicación de sectores del SSR de Villa Mercedes



Fuente: Elaboración propia con datos de proyecto FONIS (2020)

El comité se fundó el 14 de mayo de 1979 y obtuvo personalidad jurídica el 27 de octubre de 1993. Hasta el año 2022, el Servicio Sanitario Rural (SSR) de Villa Mercedes tenía un total de 631 arranques y disponía de dos captaciones de agua subterránea. La planta de aguas residuales es de tipo lombrifiltro, mientras que el tratamiento de agua potable se realiza mediante cloración, Además, se realizan cortes de luz semanales de 5 a 10 minutos. Esta cifra aumenta en los meses de invierno. El SSR de Villa Mercedes abastece tanto a la población de Villa Mercedes como a población de Villa las Flores.

4.2. Caracterizar consumo de energía eléctrica del SSR

4.2.1. Estimación de consumo eléctrico horario mensual

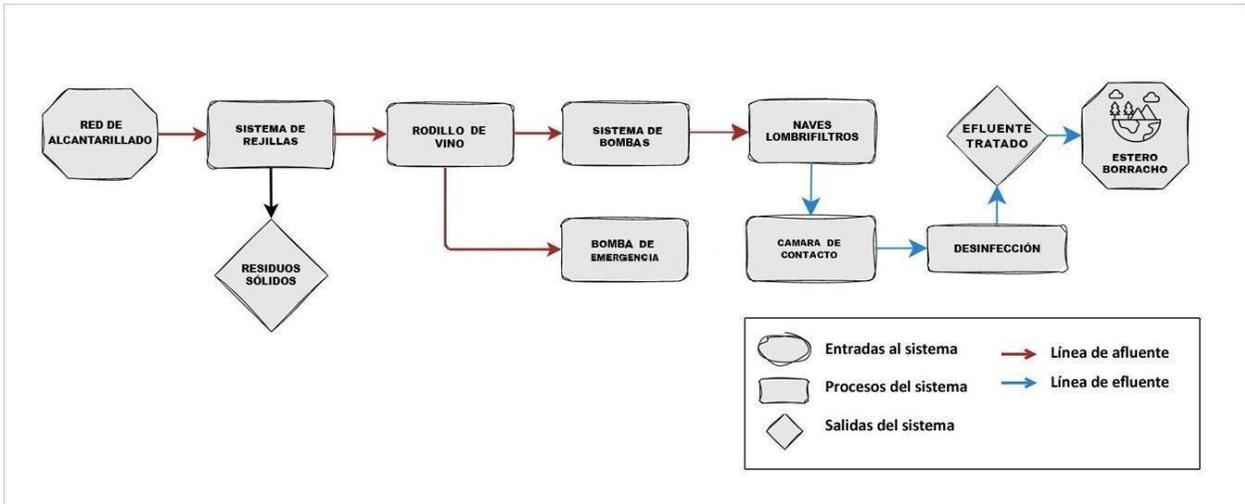
Con el fin de caracterizar el SSR de Villa Mercedes, se llevó a cabo una visita al terreno el día 16 de noviembre del año 2022, visitando 3 sectores, la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS), planta de agua potable de Villa Mercedes y la planta de agua potable de Villa las Flores. En cada sector, se consultó a los trabajadores acerca de los equipos que se disponen y sus horarios de uso.

En la PTAS, se registraron equipos como rodillo de viña, bombas, (3 en total, una en operación, una bomba de emergencia y una en desuso), ampolletas y luces led. En los sectores de planta AP Villa Mercedes y planta de AP Villa las flores, se registraron bombas para cada función, incluyendo bomba Villa Mercedes, bomba Villa las Flores, bomba de emergencia, bomba de cloración de Villa las Flores y bomba de cloración de Villa Mercedes y por último bomba de almacenamiento.

Debido a circunstancias externas, no fue posible asistir a la oficina del comité en persona. Por lo tanto, se realizó un inventario del consumo de la oficina del comité a través de una llamada telefónica, preguntando por cada aparato disponible en el sector y sus horas de uso aproximadas. Se identificaron equipos tales como una computadora, impresora, teléfono fijo, luces led de bajo consumo.

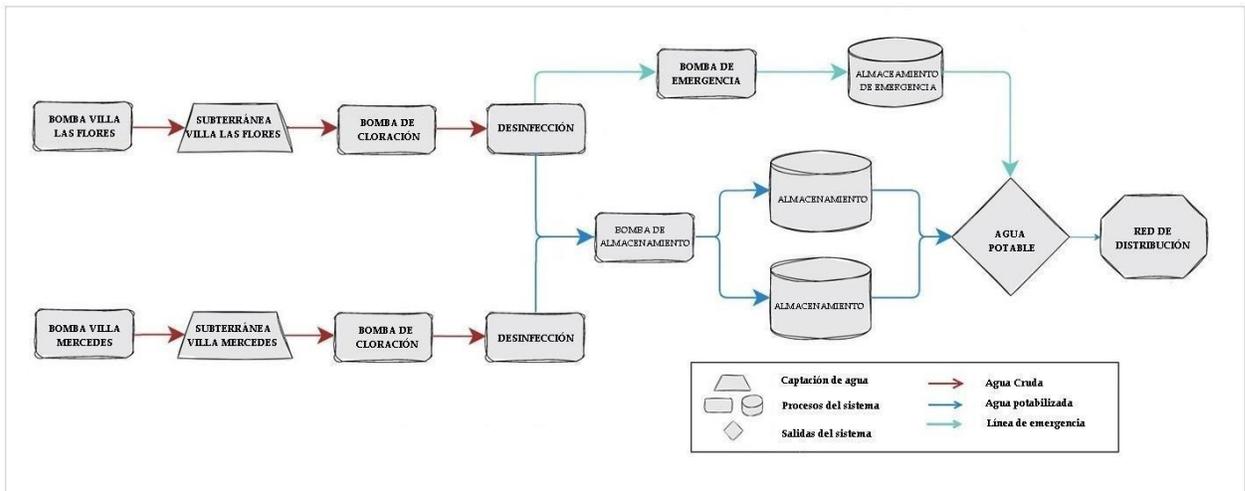
Uteriormente a esto, utilizando la información proporcionada por los trabajadores se elaboró una tabla de consumo de los equipos eléctricos del SSR, identificando los equipos, sus horas de uso y su potencia. Con esta información se realizó una estimación de consumo eléctrico horario mensual.

Figura 14. Diagrama de proceso de la planta de tratamiento de aguas servidas



Fuente: Elaboración propia basado en Proyecto FONIS (2020)

Figura 15. Diagrama de proceso de la planta de agua potable



Fuente: Elaboración propia basado en Proyecto FONIS (2020)

4.2.2. Validación de consumo eléctrico horario mensual

Con el objetivo de examinar la variabilidad de la potencia eléctrica a lo largo de los meses en los años establecidos y posteriormente validar el consumo eléctrico, se llevaron a cabo las siguientes acciones.

El jueves 12 de enero de 2023, se realizó un segundo viaje a Villa Mercedes con la finalidad de solicitar las boletas de luz del pueblo. En la localidad, se llevaron a cabo conversaciones con el personal a cargo para recopilar la información de las boletas de cada sector, obteniendo registro eléctrico de 2 compañías: Frontel (Oficina, planta de AP Villa las Flores, planta AP Villa Mercedes) y Copelan (PAPR). Se recopiló información de las boletas de Frontel desde el año 2018 hasta el año 2022, y de las boletas de Copelan desde el año 2018 hasta el año 2021. Estos datos fueron procesados utilizando el programa Excel, ordenándose periódicamente desde el año más antiguo al más reciente para los 4 sectores y fusionándose.

La estimación escala de color horario mensual de consumo eléctrico, fue validada mediante el box plot de consumo mensual del SSR. Esto permitió corroborar la precisión de la información entregada por los trabajadores.

4.3. Determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR

Para determinar el potencial renovable de cada recurso, se extrajeron datos de diferentes fuentes, incluyendo datos de radiación, temperatura, viento e hídrico. La información fue obtenida desde el explorador solar, explorador eólico, y BCN. Se utilizó esta información para calcular los ciclos horario-mensual y determinar el potencial renovable de cada recurso, esta información es la necesaria para que el HOMER pueda realizar una iteración óptima de la localidad.

4.3.1. Potencial Solar

Para determinar el potencial solar se descargaron datos de la página web “Explorador solar” del ministerio de energía, herramienta de análisis pública que detalla el recurso solar de Chile. Se ingresó al explorador solar y se ubicó Villa Mercedes. Se descargaron archivos de “Datos horarios 2004-2016” que contienen registros de radiación global horizontal mensual (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$) del sector. Estos datos fueron procesados desde el programa Excel y transcritos a un block de notas. Finalmente se adjuntan al HOMER. Desde el explorador se obtuvieron los gráficos de radiación global horizontal mensual y de temperatura mensual horaria de Villa Mercedes ($^{\circ}C$).

4.3.2. Potencial Eólico

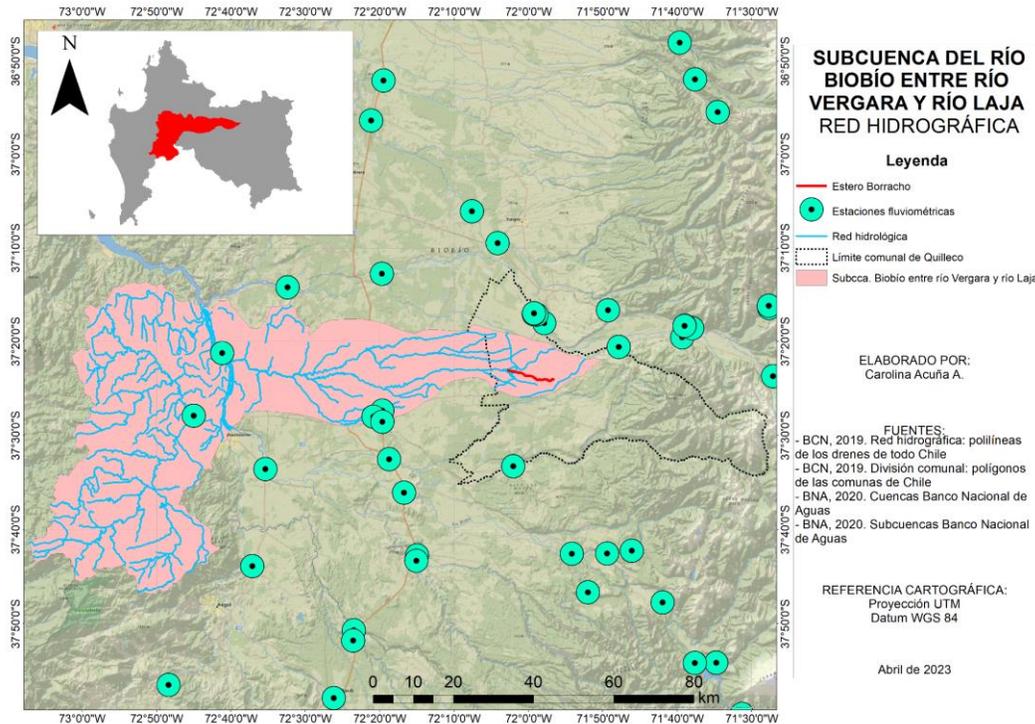
Por otro lado, para el potencial eólico se descargaron datos de la página web “Explorador eólico” al igual que el explorador solar, corresponde a una herramienta del ministerio de energía el cual entrega información del recurso eólico disponible en cada territorio de Chile. Es así como se dirigió a la página, se ubicó en la localidad de Villa Mercedes, se descargó la “Serie horaria de viento reconstruido” a 30 metros de altura. Se procesaron los datos desde el programa Excel y se transcribió a un block de notas, finalmente se adjuntó al software. Se obtuvo el gráfico horario mensual de velocidad de viento a 30 metros.

4.3.3. Potencial Hidroeléctrico

La evaluación del potencial hidroeléctrico de Villa Mercedes se ha visto dificultada por la ausencia de estaciones fluviométricas que proporcionen datos concernientes al cauce del estero borracho (figura 16). El análisis preciso y confiable de la viabilidad del potencial hidroeléctrico se sustenta en una serie continua de

mediciones hidrológicas, las cuales permiten comprender la dinámica del flujo de agua en una ubicación específica.

Figura 16. Mapa estaciones pluviométrica de la red hidrográfica subcuenca río Vergara



Considerando que el estero borracho en el presente escenario no cuenta con registro sistemático de la velocidad del agua, ya que no existen estaciones habilitadas para la captura de esta información. Como consecuencia directa de esta carencia, resulta imposible llevar a cabo una determinación precisa y confiable del potencial hidroeléctrico. Optando por la exclusión de este recurso hidroeléctrico en la evaluación, fundamentándose en la incapacidad de obtener datos que respaldan la viabilidad de su aprovechamiento para la generación de energía hidroeléctrica.

4.4. Seleccionar el sistema solar/eólico óptimo para abastecer el consumo del SSR

4.4.1. Supuestos realizados

Los costos asociados a los generadores renovables no incluyen los gastos relacionados con su instalación ni transporte. Además, en el análisis efectuado no se tienen en cuenta aspectos como la utilización de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías ni la posibilidad de vender el exceso de energía generada. Asimismo, no se contempla la adquisición de terrenos en este contexto.

4.4.2. HOMER Pro

HOMER Pro, también conocido como *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*, es un software de simulación utilizado a nivel mundial para el diseño y análisis de sistemas de energía renovable y almacenamiento de energía. Fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos y ha sido empleado en numerosos proyectos en diferentes países.

El software HOMER Pro es una herramienta eficiente para el diseño y la planificación de sistemas híbridos de energía renovable. Se basa en un análisis tecnoeconómico para identificar el sistema óptimo en el estudio seleccionado.

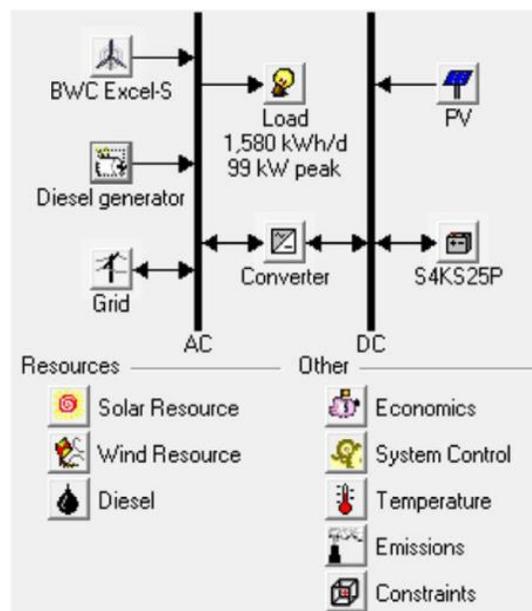
HOMER utiliza un enfoque de optimización para determinar el diseño y la configuración óptimos de sistemas de energía renovable, considerando aspectos como la demanda energética, la disponibilidad de recursos renovables y el costo de los sistemas. Además, el software puede tener en cuenta la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía para mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema (Bahramara et al., 2016).

HOMER permite modelar recursos como paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, energía hidroeléctrica de pequeña escala e hidrógeno verde, entre otros. Este software es una poderosa herramienta para el diseño y planificación de sistemas de energía renovable híbridos (HRES). Determina el tamaño óptimo de los

componentes mediante el análisis tecnoeconómico. También considera sistemas HRE en modos autónomos y conectados a la red, La figura 17 muestra una configuración típica de HRES diseñada en HOMER. En esta sección se describen los datos de entrada requeridos para la simulación con HOMER, así como un marco integral para mostrar cómo se determinan los tamaños óptimos de los equipos de HRE.

Esta herramienta es altamente flexible y se puede utilizar para diseñar sistemas de energía renovable en una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas solares para hogares y pequeñas empresas, hasta parques eólicos y redes eléctricas a gran escala (HOMER Pro, febrero 2023).

Figura 17. Esquema típico de sistemas híbridos de energía renovable en Homer



Fuente: Bahramara et al (2016)

4.4.3. Catálogo de paneles solares y turbinas eólicas

- Paneles solares:

Tabla 2. Información técnica paneles solares

Equipo	Tipo de panel	Potencia máxima. (kW)	Eficiencia (%)	Precio (\$CLP)	Dimensiones (m)
Candian solar CS6U-340	Monocristalino	0,34	17.49	290\$M	2108 x 1048 x 35 mm
Ja Jam 60-270	Monocristalino	0,27	16,51	350\$M	1650 x 991 x 40 mm

- Turbinas eólicas:

Tabla 3. Información técnica turbinas eólicas

Equipo	Velocidad de arranque (m/s)	Velocidad promedio del viento (m/s)	Potencia máx. (kW)	Altura min. requerida (m)	Precio (\$CLP)	Diámetro del rotor (m)
Eocycle EO10	2.75	6	10	30	17 \$MM	15,8
Eocycle EO20	2.75	9	20	36	35 \$MM	15,8
Eocycle EOX S-16	4	7.5	20-30	48	50 \$MM	15,8

El software posee una biblioteca de modelos tanto de paneles solares como turbinas eólicas. En base al potencial renovable se realizó una búsqueda detallada para

encontrar los modelos óptimos para el SSR en el software. Estas energías renovables fueron las ingresadas al software para iterar con ellas.

4.4.4. Optimización de HOMER con información recopilada

Con el fin de lograr una optimización precisa del software HOMER, se procedió a su configuración mediante la incorporación de información relevante y detallada. Para ello, se incluyeron datos fundamentales relacionados con el proyecto, como la ubicación, así como datos económicos de gran importancia, tales como la tasa de descuento (%), tasa de inflación (%) moneda a utilizar y la duración prevista del proyecto en años.

Adicionalmente, se incorporó información esencial sobre la red eléctrica, considerando el tipo de boleta correspondiente. Cabe destacar que, debido a las limitaciones del software HOMER, fue necesario realizar un supuesto, ya que este solo permite agregar un único tipo de boleta, mientras que en el caso particular de villa mercedes se cuenta con dos compañías eléctricas.

Asimismo, se incluyeron elementos cruciales relacionados con el consumo eléctrico, como los precios de tarifa (\$/kWh), de venta (\$/kWh) y demanda (\$/kW/mes).

Para evaluar la viabilidad de fuentes renovables, se analizó en detalle el potencial renovable del pueblo, considerando parámetros como la radiación global horizontal, la temperatura y velocidad de viento. Además, se agregó el catálogo de generadores renovables anteriormente mencionados.

Finalmente, se llevó a cabo la recopilación y archivo del consumo eléctrico mensual del SSR ya validado. Este paso es crucial para obtener una visión integral y realista del comportamiento eléctrico del sistema.

4.4.5. Criterio de selección para sistema óptimo Solar/fotovoltaico

Se consideraron principalmente 2 criterios de selección: Maximizar autonomía del sistema y minimizar costo unitario de producción de energía eléctrica \$/kWh.

El primer criterio es la maximización de la autonomía del sistema, que busca garantizar un suministro eléctrico estable y confiable para el SSR. Esta autonomía es crucial para asegurar el funcionamiento ininterrumpido de los servicios sanitarios, evitando interrupciones que podrían afectar la calidad de vida y la salud de la comunidad local. Al enfocarse en la autonomía, se busca dimensionar adecuadamente las capacidades de generación de energía, considerando la variabilidad de la oferta energética proveniente de fuentes como la energía solar y eólica.

Por otro lado, el segundo criterio de selección es minimizar el costo unitario de producción de energía eléctrica (\$/kWh). Este enfoque tiene como objetivo primordial lograr la eficiencia económica y financiera del sistema, lo que se traduce en tarifas eléctricas más accesibles para los usuarios del servicio sanitario rural. Al reducir el costo unitario de producción de energía, se busca optimizar los recursos disponibles y asegurar una operación sostenible y económicamente viable a largo plazo.

4.4.6. Investigar alternativas de subsidio de financiamiento para el sistema de autoabastecimiento

Dentro de las alternativas tentativas se encontraban FIC Biobío, CORFO, programa de Infraestructura Rural para el Desarrollo Territorial (PIRDT) y Fondo nacional del desarrollo rural (FNDR). En contexto:

FIC Biobío corresponde a un proyecto administrado por el gobierno donde sus siglas significan Fondo de Innovación para la Competitividad. Su objetivo consta de

impulsar la competitividad de las industrias, fomentar el crecimiento económico a nivel regional y ampliar las posibilidades para su progreso (SEGPRES, s. f).

CORFO: La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) es una agencia del Gobierno de Chile, dependiente del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, que tiene como objetivo principal el fomento de la inversión, la innovación y el emprendimiento, así como el fortalecimiento del capital humano y las capacidades tecnológicas del país. Dentro de los proyectos que posee la CORFO se encuentra el Programa de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) la cual busca fomentar el desarrollo de proyectos de energías renovables no convencionales, como la energía solar, eólica, geotérmica, entre otras (CORFO, s. f.).

PIRDT: Es un instrumento de inversión de carácter regional que tiene por objetivo potenciar el desarrollo productivo y social en forma sostenible en comunidades rurales de ingresos bajos, con una media a baja concentración poblacional y con déficit en infraestructura. El PIRDT financia proyectos principalmente de: agua potable y saneamiento, caminos, puentes y pasarelas, como también pequeñas obras portuarias (Subdere, s. f.-b).

FNDR: El Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) tiene como objetivo fortalecer la capacidad de gestión de los Gobiernos Regionales en materias de inversión pública regional, administrar, controlar y efectuar seguimiento sobre la ejecución financiera de los presupuestos de inversión regional y elaborar y sistematizar información relevante para la toma de decisiones de la autoridad (Subdere, s. f.-a).

Para corroborar esta información se consultó con la superintendencia de SSR vía correo y posteriormente asistiendo presencialmente a la oficina de la superintendencia de SSR de Ñuble, donde prontamente fue derivada al gobierno regional del Biobío.

5. Resultados y Discusión

5.1. Caracterizar consumo de energía eléctrica del SSR

5.1.1. Estimación de consumo eléctrico horario mensual.

Figura 18. Estimación escala de color horario mensual de consumo eléctrico (kwh)

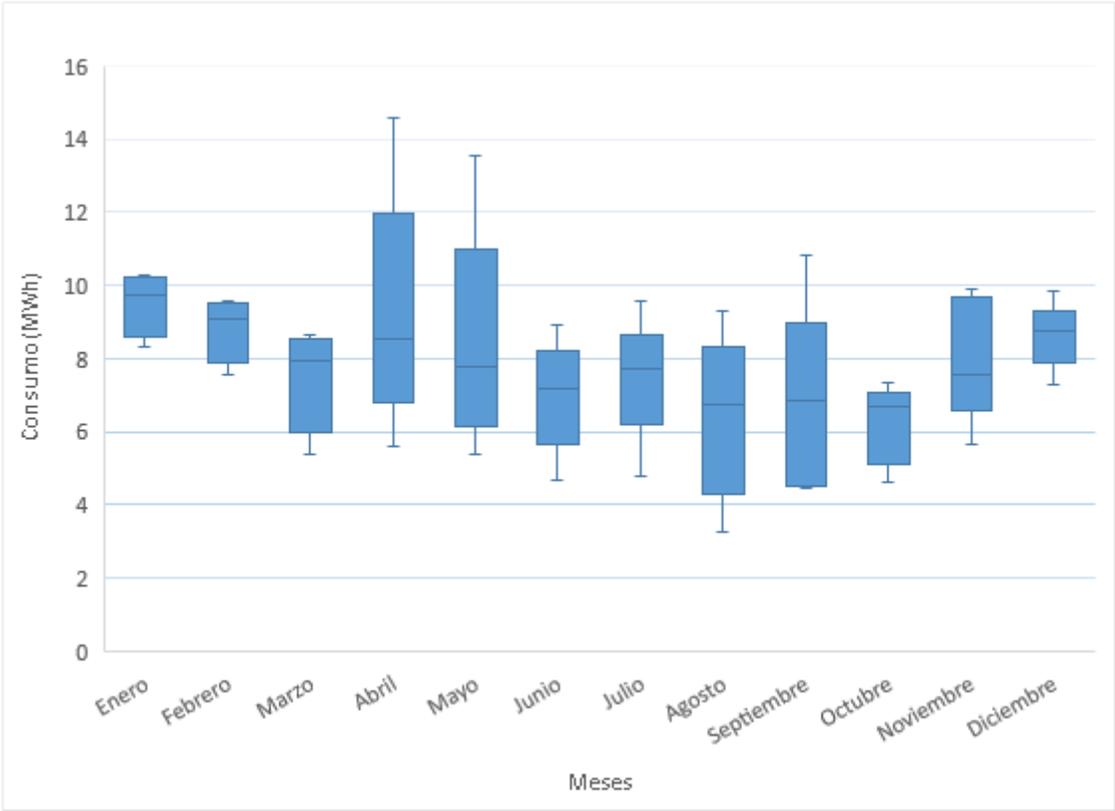
23:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
22:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
21:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
20:00	397	381	307	410	342	276	292	252	262	255	334	366
19:00	398	382	307	412	344	280	298	258	267	259	335	367
18:00	490	468	399	501	437	369	390	351	356	351	425	459
17:00	485	463	394	496	431	363	384	345	351	345	419	453
16:00	485	463	394	496	431	363	384	345	351	345	419	453
15:00	572	544	481	580	518	447	471	432	435	432	503	540
14:00	562	535	471	571	508	438	462	422	426	423	494	531
13:00	519	497	455	551	483	445	486	416	454	372	434	521
12:00	519	497	455	551	483	445	486	416	454	372	434	521
11:00	519	497	455	551	483	445	486	416	454	372	434	521
10:00	520	499	457	552	485	446	487	418	456	374	436	522
9:00	519	497	455	551	483	445	486	416	454	372	434	521
8:00	513	492	450	545	478	439	480	411	449	367	429	515
7:00	470	449	379	481	416	349	369	330	336	330	405	438
6:00	384	368	294	397	329	263	278	238	249	241	320	352
5:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
4:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
3:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
2:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
1:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
0:00	291	282	201	307	236	174	186	146	160	149	231	260
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

En la figura 18 se presenta la estimación de consumo eléctrico horario mensual, donde se observa una distinción de colores en distintas franjas horarias, indicativos de los niveles de consumo de energía eléctrica. La tonalidad roja refleja un mayor consumo, mientras que el verde denota un consumo menor. Se destaca el periodo entre las 8:00 horas y las 15:00 horas como aquel de mayor demanda eléctrica a lo

largo del día. Además, se identifica el mes de abril como aquel de consumo más elevado, en contraste con octubre que exhibe el menor consumo mensual.

5.1.2. Validación de consumo eléctrico horario mensual

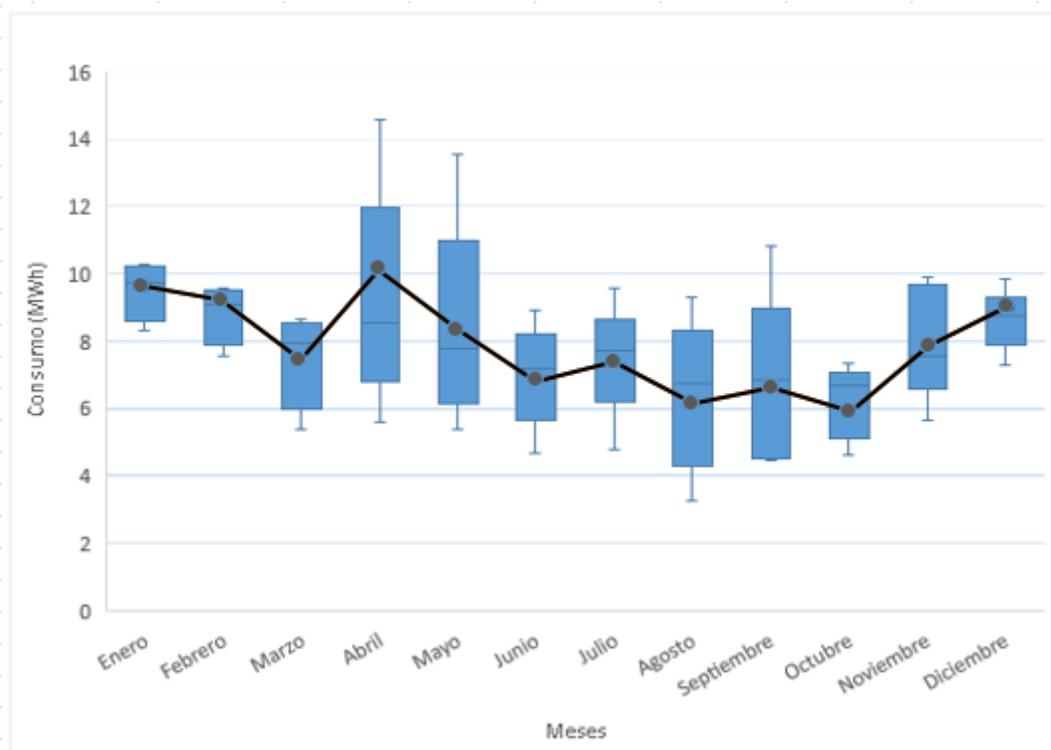
Figura 19. Box plot de consumo mensual del SSR



Realizando un análisis de la información correspondiente a la figura 19 en el box plot, se puede evidenciar la variabilidad presente en el consumo eléctrico mensual. Este análisis se basó en los registros de las facturas de electricidad. En el gráfico, las líneas representan los valores máximos y mínimos de consumo, mientras que las cajas muestran la dispersión general de los datos.

Se observa que los meses de abril y mayo presentan la mayor variabilidad en el consumo eléctrico, indicando una mayor oscilación en estos periodos. Al investigar más a fondo, se identificó que esta variabilidad puede ser atribuida a situaciones generales como específicas. En primer punto según la información entregada por los trabajadores del sector, se experimentaron en dos ocasiones en las que una de las bombas presentó fallas durante el mes de abril. Esto llevó a la necesidad de operar la bomba restante a una potencia más elevada para compensar la situación. En segundo lugar y mediante un análisis detallado de los datos, se pudo determinar que el límite máximo de consumo ocurrió en el mes de abril del año 2020, coincidiendo con el inicio de la pandemia por COVID-19. Este fenómeno puede estar relacionado con el aumento significativo en los consumos debido a las restricciones y modificaciones en el estilo de vida durante ese periodo.

Figura 20. Validación consumo mensual del SSR

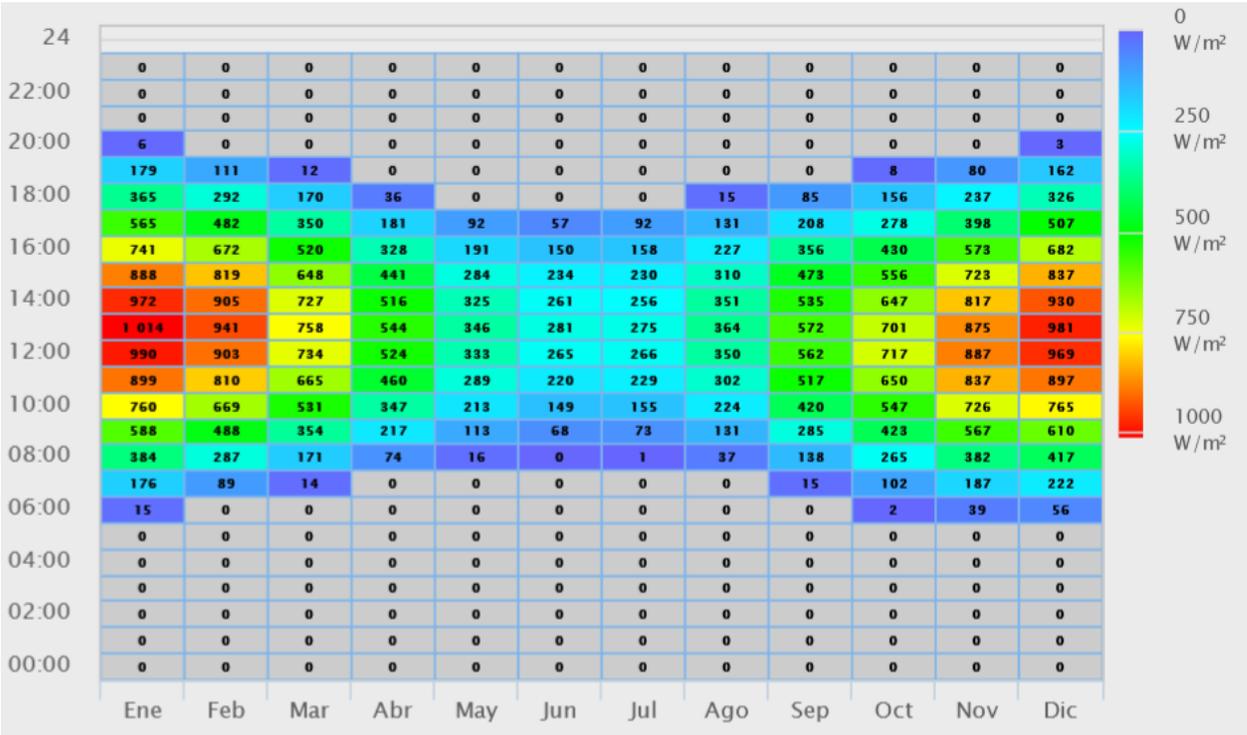


En conjunto con el box plot, se presenta un gráfico de líneas que corresponde al resumen de la estimación del consumo eléctrico. Se puede observar que, en todos los casos, la estimación realizada se encuentra dentro de la variabilidad. Es por esto que se puede afirmar que la estimación realizada es correcta, validando así el consumo escala de color horario mensual de consumo eléctrico.

5.2. Determinar el potencial del recurso renovable disponible en el SSR

5.2.1. Potencial Solar

Figura 21. Gráfico horario mensual de la radiación global horizontal (W/m²)



Fuente: Explorador Solar

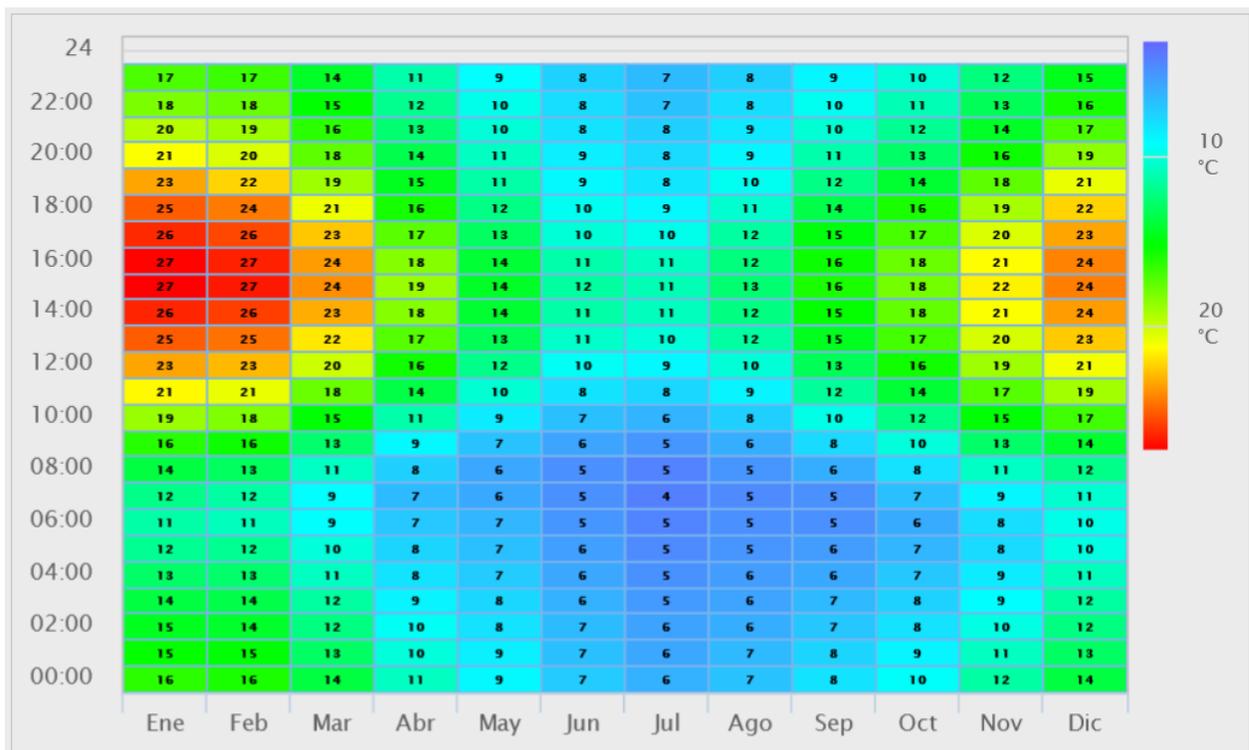
La representación gráfica de los resultados obtenidos mediante el análisis de la radiación global horizontal, revela notorias variaciones que se manifiestan a través de la escala de color. En dicho gráfico, la tonalidad roja denota niveles elevados de

radiación global horizontal, en contraposición, el matiz azul refleja una radiación de menor intensidad.

El eje horizontal abarca desde el mes de enero hasta diciembre, mientras que en el eje vertical se encuentra el horario desde las 0 horas a 23 horas.

Los meses que se erigen con un perfil de radiación más destacado son diciembre y enero, caracterizados por un valor promedio de 564 [W/m²]. En contraste, los meses de invierno especialmente mayo, junio, julio, exhiben los valores promedios más bajos de radiación global horizontal.

Figura 22. Gráfico horario mensual temperatura (°C)



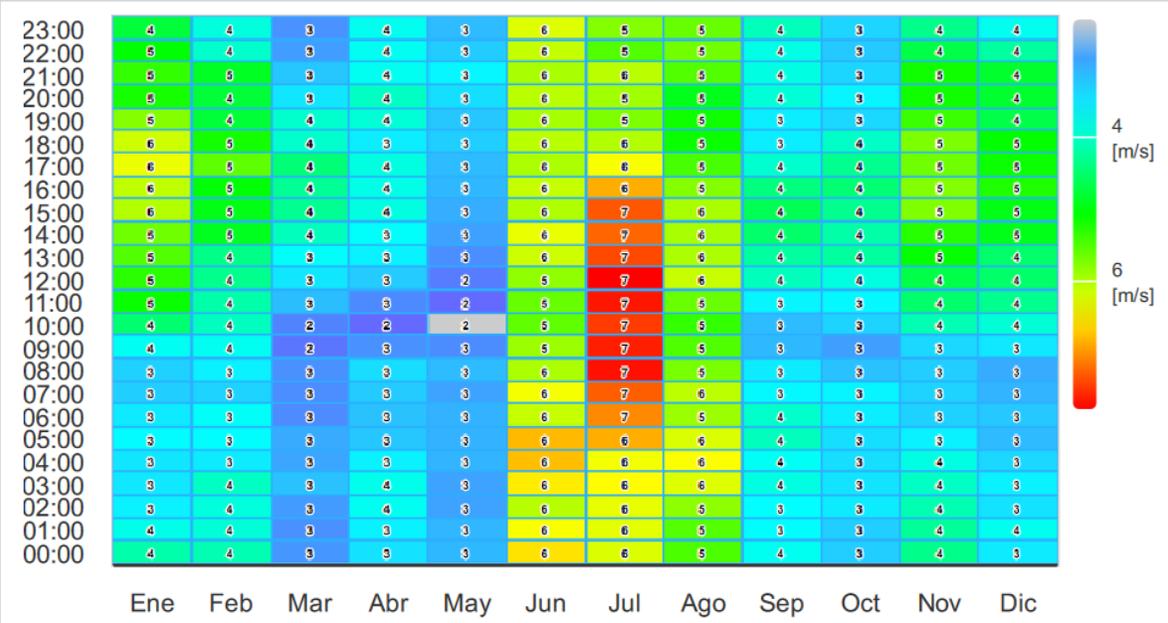
Fuente: Explorador Solar

El análisis de los resultados de temperatura en el gráfico revela distinciones notables representadas mediante variaciones en la matriz. La matriz roja denota condiciones de temperatura más elevada, en contraste con el tono azul que alude a valores térmicos más bajos.

Se puede deducir que los meses de diciembre, enero y febrero exhiben las temperaturas más elevadas en la serie temporal, Estos meses resaltan por alcanzar un promedio térmico de 19°C. Por otro lado, los meses caracterizados por sus temperaturas más gélidas se concentran principalmente en la estación invernal, siendo junio, julio los más representativos, logrando una temperatura promedio de 8°C, lo que sugiere un marcado descenso en las condiciones climáticas.

5.2.2. Potencial Eólico

Figura 23. Gráfico horario mensual velocidad de viento a 30 metros de altura



Fuente: Explorador eólico

En la figura 23, objeto de minuciosa observación, desvela una tendencia discernible en las velocidades del viento en función del tiempo y de los meses. Es evidente que los periodos de junio, julio y agosto se destacan como los trimestres caracterizados por una intensidad más notable de vientos. En este tramo temporal las mediciones exhiben un promedio de velocidades de viento cifrado en 5,8 m/s. Esta configuración queda contrastada con la constatación de que el mes menos afectado por vientos

vigorosos corresponde a mayo, presentando una menor magnitud de viento en términos promedios.

5.3. Seleccionar el sistema óptimo para abastecer el consumo de electricidad del SSR

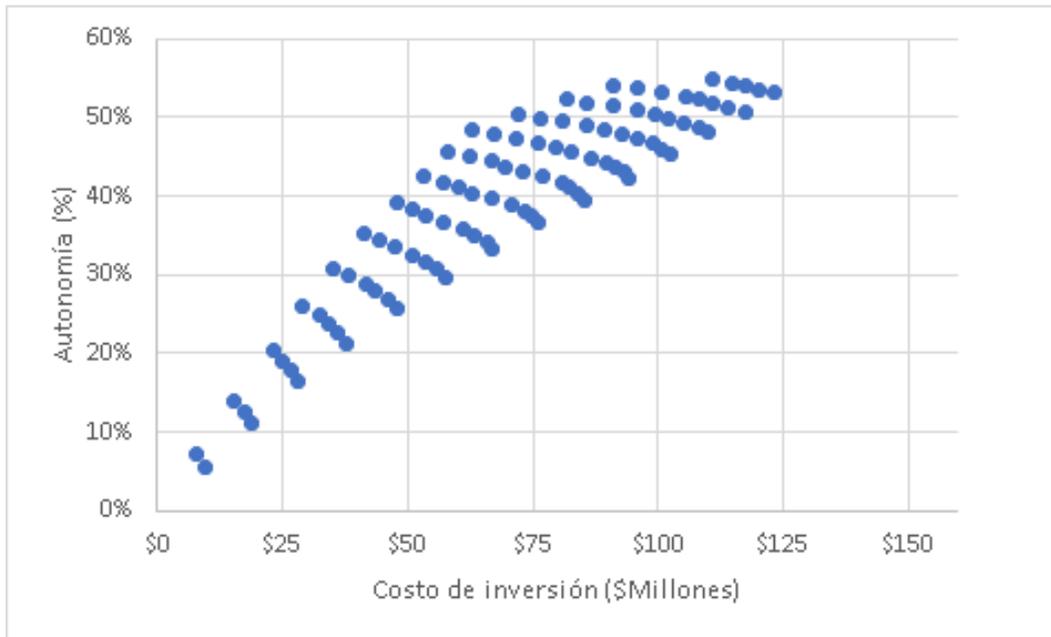
5.3.1. Optimización de HOMER con información recopilada

Tabla 4. Información económica agregada al HOMER

Datos económicos	Ingresado
Tasa de descuento (%)	6
Tasa de Inflación (%)	8,7 (Hasta Mayo 2023)
Moneda	Pesos Chilenos
Años del proyecto	20 años
Datos de la red	Ingresado
Precio de tarifa (\$/kWh)	86,1150
Precio de venta (\$/kWh)	62,838
Demanda (\$/kW/mes)	17.400,28

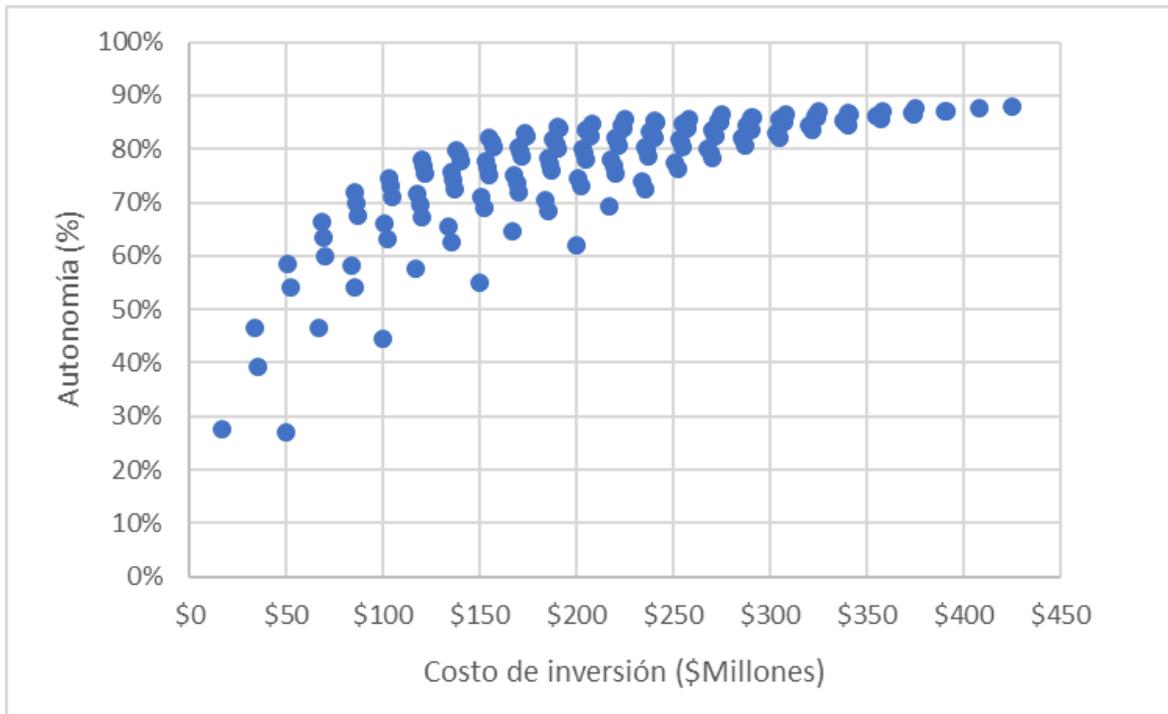
5.3.2. Sistemas óptimos Solar/fotovoltaico obtenidos

Figura 24. Gráfico dispersión relación entre Autonomía del Sistema y Costo de Inversión con paneles solares



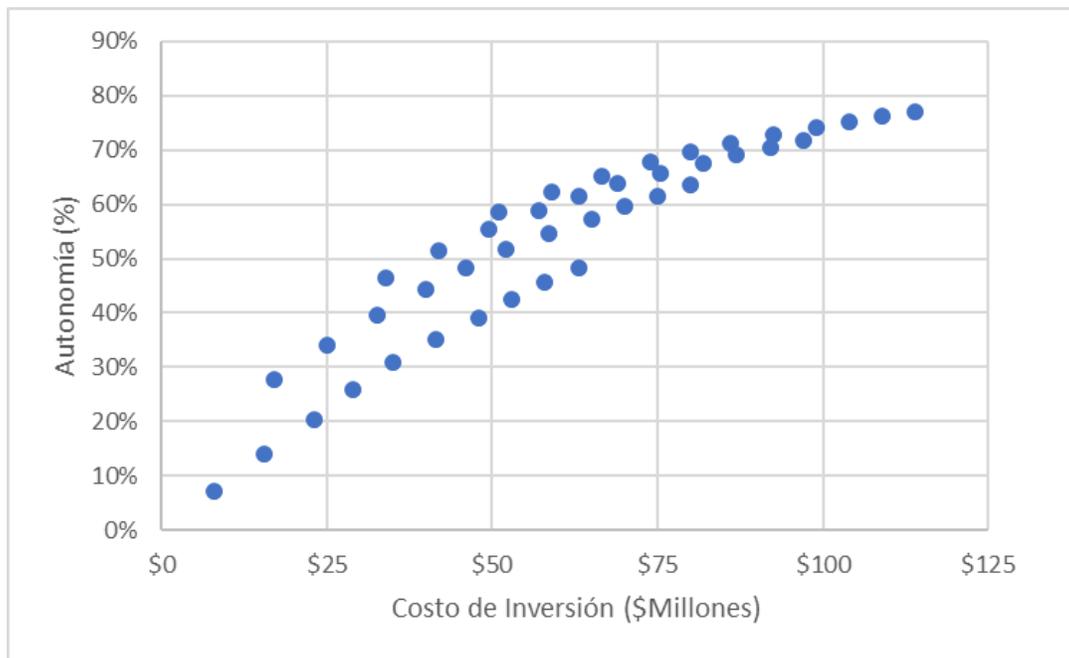
Dentro de los resultados realizados con el software primeramente se encuentra la figura 23, la cual fue elaborada utilizando solo generadores renovables solares, específicamente Canadian solar CS6U-340, considerando una potencia instalada máxima de 92,5 kW, así como el panel solar Ja Jam 60-270, con una potencia máxima de 75,6 kW. La determinación del umbral de potencia conectada se fundamentó en la consideración de previos intentos de incrementar la capacidad de potencial, resultaron en un aumento en los costos de inversión, sin concomitante mejora en la autonomía del sistema. Esto se le atribuye exclusivamente al recurso solar disponible, sin la integración de sistemas de almacenamiento de energía, se genera energía durante las franjas horarias en las que la radiación solar está presente, con una duración aproximada de 17 horas durante el periodo estival y de 7 horas durante la estación invernal. Se evaluaron 56 sistemas renovables posibles, y tras un análisis más profundo se identificó una clara preferencia por los paneles Canadian solar CS6U-340. Los resultados muestran que es posible alcanzar una autonomía máxima de 54,8%.

Figura 25. Gráfico dispersión relación entre Autonomía del Sistema y Costo de Inversión con turbinas eólicas



Por otro lado, contrarrestando con los paneles solares, se encuentra la implementación de un sistema conformado solo por turbinas eólicas donde, la figura 25 fue elaborada utilizando generadores renovables de energía eólica. Se utilizaron 5 unidades del modelo Eocycle EO10, 4 unidades del modelo Eocycle EO20 y 4 unidades Eocycle EOX S-16. La altura de las turbinas eólicas se determinó en base a la velocidad promedio del viento, así como las restricciones impuestas por el tamaño. En total, se evaluaron 298 combinaciones posibles del sistema renovable utilizado por el software Homer. Tras un análisis más profundo, se encontró que las turbinas eólicas del tipo Eocycle EO10 eran las más adecuadas. Los resultados muestran que es posible alcanzar una autonomía máxima de 90,8%. Sin embargo, aunque el sistema basado en energía eólica es más estable a largo plazo, es importante tener en cuenta que un sistema de este tipo es significativamente mayor el costo de implementación.

Figura 26. Gráfico dispersión relación entre Autonomía y Costo de Inversión con sistema híbrido



En consideración de maximizar la eficiencia energética y aprovechar de mejor modo las condiciones climáticas y geográficas de Villa Mercedes, considerando por un lado que un sistema basado únicamente en energía solar no asegura un suministro eléctrico favorable debido a las limitaciones de disponibilidad de sol, y por otro lado, un sistema explosivamente eólico incrementa de manera significativa los costos de inversión, es que se propone la implementación de un sistema híbrido en Energías Renovables No Convencionales que combine turbinas eólicas y paneles solares.

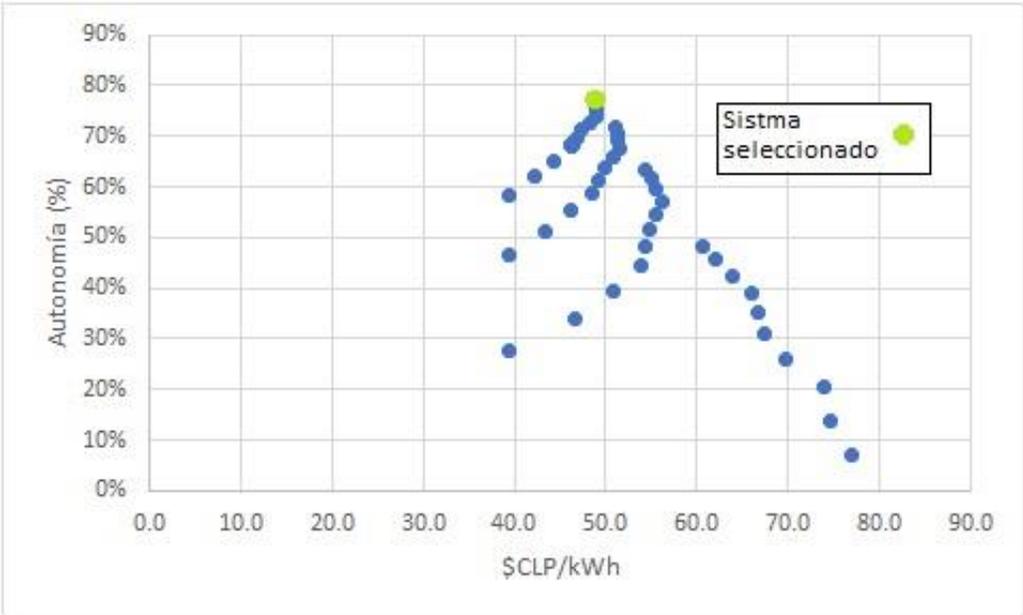
En la figura 26 se muestra el diseño del sistema híbrido de ERNC, utilizando modelos como Eocycle EO 10 y Canadian solar CS6U-340. Se establece un límite máximo de 3 unidades de turbinas eólicas y una potencia máxima instalada de 92,5 kW en paneles solares.

A través de un sistema híbrido se logran obtener 86 opciones de sistemas, con una autonomía alcanzada hasta casi del 80%. Esto significa que el sistema es capaz de satisfacer casi el 80% de las necesidades energéticas del sector de Villa Mercedes.

Esta combinación de turbinas eólicas y paneles solares permite aprovechar de manera eficiente las condiciones climáticas y geográficas de la zona, maximizando la generación de energía renovable y reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovable.

Para seleccionar el sistema óptimo y considerando los criterios de maximizar la autonomía y minimizar costo unitario de producción de energía eléctrica. Se realizó el gráfico correspondiente a la figura 27

Figura 27. Indicador Costo capital (CLP)/Energía(kWh) vs Autonomía del sistema híbrido



Considerado el criterio de selección donde se busca maximizar la autonomía y minimizar el costo unitario de producción eléctrica es que se seleccionó el sistema óptimo. En la figura se observa por un lado en el eje horizontal el precio por cada kWh considerando que el costo unitario de producción de energía eléctrica se estima en 48,9 pesos y teniendo en cuenta que hasta diciembre del año 2022 el costo unitario de la energía eléctrica en Chile se evalúa en 144 pesos, el sistema

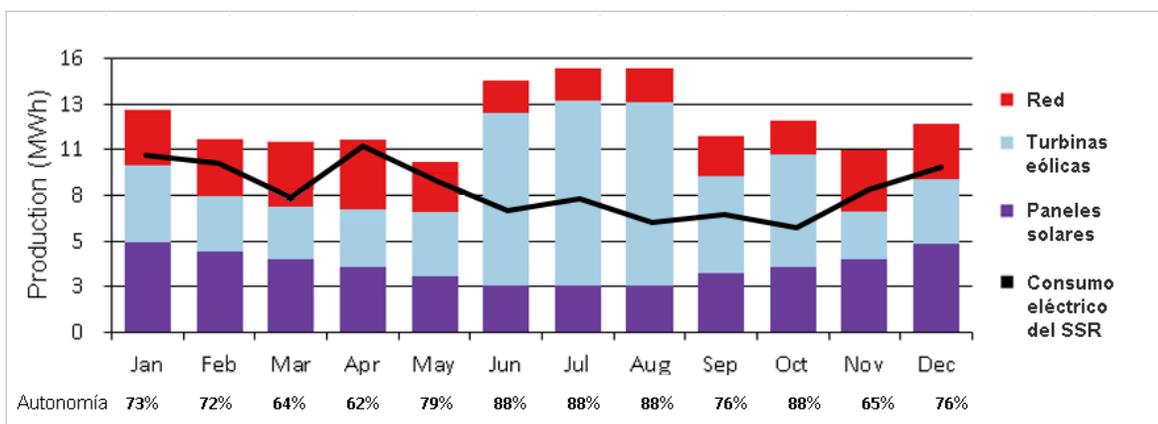
logra un costo casi 3 veces más barato. Por otro lado, en el eje vertical se denota la autonomía del sistema entregando hasta casi un 80% de autonomía.

Tabla 5. Información de sistema seleccionado

Sistema seleccionado	Potencia conectada de paneles solares (KW)	Cant. Turbinas eólicas	Costo de Inversión (CLP)	Costo unitario de energía eléctrica (CLP) / (kWh)	Autonomía (%)	PayBack
	92,5	3	114 \$MM	48,9	77,1%	10 yr

En mayor detalle el sistema seleccionado logra una autonomía 77,1% a un costo de 114 Millones de pesos. Este sistema se distingue por su óptimo desempeño al enfocarse en la maximización completa de la autonomía. Está elaborado con una potencia máxima instalada de 92,5 kW en paneles solares respaldada por tres turbinas eólicas. Logra un periodo de retorno de 10 años el cual se sustenta en el ahorro proporcionado por los usuarios.

Figura 28. Producción de electricidad del sistema óptimo



En la figura 28 se puede observar la generación de electricidad a partir del sistema óptimo elegido. En el eje horizontal se encuentran los meses, mientras que en el eje vertical se representa la producción de electricidad en megavatios-hora (MWh). Los colores presentes en las barras indican las diferentes fuentes de generación, en el tono celeste representa las turbinas eólicas, el morado simboliza los paneles solares y el rojo identifica la red eléctrica convencional. Además, en la figura se traza una línea de color negro la cual representa el consumo eléctrico del servicio sanitario rural. Se puede apreciar que en los meses de junio, julio y agosto destacan por ser los periodos con mayor producción eléctrica mediante el sistema híbrido. Por el contrario, la generación eléctrica es menor en los meses de abril y noviembre. También es relevante señalar que en los mismos meses de alta producción eléctrica (junio, julio y agosto), se evidencian excedentes de energía (por encima de la línea de consumo eléctrico) los cuales suman un total de 20 MWh en el transcurso de los tres meses. Al analizar la imagen se aprecia que a incluso en los meses de mayor autonomía (88%) y bajo consumo eléctrico, aun así, existe consumo de la red. Esto es debido a la variabilidad del recurso solar y eólico los cuales jamás son constantes.

5.3.3. Investigar alternativas de subsidio de financiamiento para el sistema de autoabastecimiento

Realizando la investigación pertinente se encontró que los servicios sanitarios rurales pueden optar a financiamiento del Gobierno regional que lo compongan, en el caso de Villa Mercedes le corresponde el Gobierno Regional del Biobío. Aquí se encontró con la posibilidad de postular a dos fondos, Fic BioBío (fondo de innovación para la competitividad) y FNDR (fondo nacional de desarrollo regional) donde se tiene que, para el Fic debe postular una institución acreditada y reconocida por el estado y se otorga un monto máximo de 150 millones. Por otro lado, para el FNDR el postulante puede ser el mismo comité de Villa Mercedes, aquí se le concede un monto máximo de 180 millones.

5.3.4. Terrenos tentativos para implementación de sistema óptimo Solar/fotovoltaico

Figura 29. Terrenos tentativos para implementación de ERNC

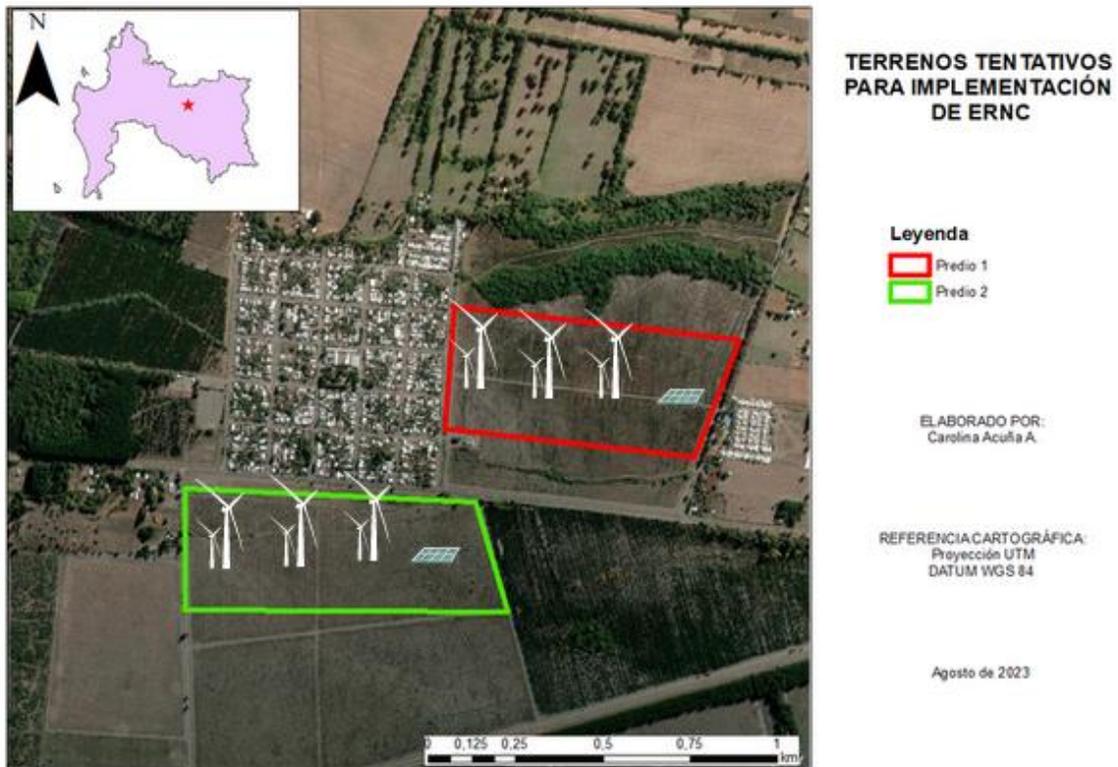


Tabla 6. Área de cada zona tentativa (m²)

Zona	Hectáreas
Predio 1	27
Predio 2	29

Dentro de las áreas preliminares destinadas a la posible implementación del sistema híbrido, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva. En lo que respecta a las turbinas

eólicas, se contempló una extensión de 200m para cada turbina, y la separación entre ellas se determinó como equivalente a 5 veces el diámetro del rotor. Dado que el diámetro del rotor de la turbina EO10 es de 15,8 metros, la distancia entre turbinas quedó establecida en 79 metros.

Por otra parte, en relación a los paneles solares, se determinó que, por cada 1 kW de potencia instalada en paneles solares, se requería una superficie de 15 metros cuadrados. Considerando que el sistema mayor envergadura abarca 92,5 kW, se estima que se precisa aproximadamente 1390 metros cuadrados para su instalación.

Se procedió a la instalación de dos sistemas disponibles: EL primer terreno, representado de color rojo en la figura, posee un área de 270000 metros cuadrados, mientras que el segundo terreno, de color verde, abarca una extensión de 290000 metros cuadrados. La figura 29 muestra una simulación de cómo se llevaría a cabo la incorporación de ERNC en los mencionados predios.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Se logró estimar el consumo del SSR de villa mercedes donde su consumo máximo es 14,57 MW/mes en el mes de abril y el mínimo 3,24 MW/mes en el mes de octubre.

Se logró estimar el potencial de energía renovable donde, en el caso del recurso solar, se halló que la radiación es mayor en los meses de diciembre y enero con un valor promedio de 564 (W/m²). Para el caso del potencial eólico sus meses más ventosos corresponden a los meses de junio, julio y agosto con un promedio de viento de 5,8 m/s

3.- Se seleccionó el sistema óptimo el cual corresponde al sistema seleccionado donde se tiene 77,1% de autonomía y un costo unitario de energía eléctrica de 48,9\$/kWh

Dentro de las recomendaciones para futuros estudios se tiene:

Estudio con uso de baterías de almacenamiento: Las baterías de almacenamiento son una parte esencial de los sistemas de energía renovable, especialmente para sistemas híbridos. Se recomienda realizar un estudio específico enfocado en la integración de baterías de almacenamiento en el sistema híbrido de ERNC en Villa Mercedes. Este estudio deberá analizar aspectos como la capacidad óptima de almacenamiento, el tipo de tecnología de baterías adecuada, los ciclos de carga y descarga, la vida útil de las baterías y el impacto económico de su implementación.

Investigación con potencial hidroeléctrico: La hidroeléctrica es una fuente de energía renovable muy potente y confiable. Dado que la localidad de Villa Mercedes se encuentra cerca del estero borracho, es recomendable realizar una investigación exhaustiva sobre el potencial hidroeléctrico de la comuna. Realizando estudios de caudales y niveles de agua en el estero, viabilidad técnica y ambiental de la construcción de una pequeña central o microcentral hidroeléctrica, para posteriormente realizar un análisis económico con el fin de evaluar su rentabilidad.

Pesquisa de venta de energía eléctrica: Es importante explorar la posibilidad de vender el excedente de energía eléctrica generada por el sistema híbrido de ERNC en Villa Mercedes. Esto implica identificar potenciales compradores de energía eléctrica en la región, como empresas, industrias o incluso el sistema eléctrico nacional. Se deben evaluar los aspectos legales y regulatorios relacionados con la venta de energía, así como el impacto económico y los beneficios que presentaría para la comunidad local.

7. Referencias Bibliográfica

- ACERA. (2023, enero). Estadística sector de generación de energía eléctrica renovable. 7
- Banco Mundial, D. de M. A. y D. (2011). *Chile—Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. 88
- Baeza, E., & Torres, R. (2020). *Situación de la demanda de recursos hídricos en Chile por parte de los principales usuarios* (p. 9) [Text]. Asesorías Parlamentarias BCN.
- Bahramara, S., Moghaddam, M. P., & Haghifam, M. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609–620. doi:10.1016/j.rser.2016.05.039

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). *Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. *Scientific Data*, 5(1). doi:10.1038/sdata.2018.214
- Bukhary, S., Batista, J., & Ahmad, S. (2017, May). Evaluating the feasibility of photovoltaic-based plant for potable water treatment. In *World Environmental and Water Resources Congress 2017* (pp. 256-263).
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2021). *Reportes Estadísticos 2021 de Quilleco*. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* [Page]. bcn.cl; BCN. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=8309
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (s. f.). *SIIT: Hidrografía Región del Bío Bío* [Page]. Bcn.Cl. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/hidrografia.htm> 10 de enero 2023
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2020, octubre). Decreto 50 Reglamento de la ley n° 20.998, que regula los Servicios sanitarios rurales [Page]. Bcn.Cl. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1150724>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2016). *Ley 20998, Regula los servicios sanitarios rurales* [Page]. Recuperado de <https://nuevo.leychile.cl/navegar?idNorma=1100197>
- CORFO. (s. f.). *Corporación de Fomento de la Producción*. Recuperado 20 de enero de 2023, de <https://www.corfo.cl/sites/cpp/movil/sobrecorfo>
- Chacón Zenteno. (2021). Análisis del funcionamiento del programa de agua potable rural (APR) ante problemas de abastecimiento y ausencia de saneamiento en la zona sur de Chile: Caso del APR Bahía mansa. Universidad de Chile.
- Donoso, G., Blanco, E., Foster, W., Franco, G., & Lira, J. (2012). Seguridad Hídrica y Alimentaria en América Latina y España: El Caso de Chile. *Pontificia Universidad Católica de Chile*, 464.
- Donoso, G., Calderón, C., & Silva, M. (2015). *Informe Final De Evaluación Programa De Agua Potable Rural*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas- Dirección de Obras Hidráulicas. Documentación (p. 152)

- Donoso, G. (Ed.). (2018). *Water Policy in Chile* (Vol. 21). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4>
- Duflo, E. (2012). Women Empowerment and Economic Development. *Journal of Economic Literature*, 50(4), 1051-1079. <https://doi.org/10.1257/jel.50.4.1051>
- Explorador Eólico. (s. f.). *Explorar recurso eólico* [Page] Recuperado de <https://eolico.minenergia.cl/exploracion> 14 de noviembre 2022
- EULA-Chile (2020)
- Fuster, R., Escobar, C., Astorga, K., Silva, K., & Aldunce, P. (2017). *Estudio de Seguridad Hídrica en Chile en un contexto de Cambio Climático para elaboración del Plan de Adaptación de los recursos hídricos al Cambio Climático*. 129.
- García-Vaquero, N., Lee, E., Jiménez Castañeda, R., Cho, J., & López-Ramírez, J. A. (2014). Comparison of drinking water pollutant removal using a nanofiltration pilot plant powered by renewable energy and a conventional treatment facility. *Desalination*, 347, 94–102. doi:10.1016/j.desal.2014.05.036
- *Generación eléctrica en Chile*. (2021). [Page] Generadoras de Chile. <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). *The role of renewable energy in the global energy transformation*. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. doi:10.1016/j.esr.2019.01.006
- Gómez Hernández, M. (2015). *Diseño de la red de suministro de agua a una población de 20.000 habitantes y alta variación estacional* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Grupo Medioambiental del Sistema de las Naciones Unidas (SNU). (2021). *Escasez Hídrica en Chile: Desafíos Pendientes* (p. 8). Naciones Unidas en Chile.
- Herrera Jenó, R. (2011). *Indicadores de gestión para Energías Renovables No Convencionales en Chile* [Tesis postgrado]. Universidad de Chile.
- HOMER Pro. *Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids*. Recuperado 13 de febrero de 2023, de <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- Instituto Libertad. (2018). *Las energías renovables no convencionales en Chile*. 8.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2019, enero). *División político administrativa y censal región del BioBío*. 9.

- Kotulla M, Goño M, Goño R, Vrzala M, Leonowicz Z, Kłosok-Bazan I, Boguniewicz-Zabłocka J. Renewable Energy Sources as Backup for a Water Treatment Plant. *Energies*. 2022; 15(17):6288. <https://doi.org/10.3390/en15176288>
- Marzolf, N., & Macias, A. (2022, 8 julio). Chile: Líder regional en el avance de una transición energética limpia, sostenible y justa, con compromiso social. *Energía para el Futuro*.
- Ministerio de Obras públicas (MOP). *Ley n° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales Servicio Sanitarios Rurales*. Recuperado 26 de mayo de 2023, de <https://doh.mop.gob.cl/SSR/index.html>
- Morales, D., Vicuña, S., & Cid, F. (2019). *Pobres de Agua: Radiografía del agua rural en Chile*. Fundación Amulén
- Ministerio de Energía Gobierno de Chile. (2021). *Informe Balance Nacional de Energía 2019*. 65.
- Ministerio de energía. (2021, 30 agosto). *Informe Preliminar Planificación energética a largo plazo*. 192
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile (SEGPRES). (s. f.). *Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R)*. Portal Único de Fondos Concursables. Recuperado 21 de enero de 2023, de <http://fondos.gob.cl/ficha/goremagallanes/fic/>
- Morales, D., Vicuña, S., & Cid, F. (2019). *Pobres de Agua: Radiografía del agua rural en Chile*.
- Morales, V. (s. f.). *Payback o Plazo de Recuperación*. Economipedia. Recuperado 21 de enero de 2023, de <https://economipedia.com/definiciones/payback.html>
- Municipalidad de Quilleco. (2018). Plan de desarrollo Comunal de Quilleco. 2018-2023. 225.
- Prüss-Ustün, A., Bartram, J., Clasen, T., Colford, J. M., Cumming, O., Curtis, V., Bonjour, S., Dangour, A. D., De France, J., Fewtrell, L., Freeman, M. C., Gordon, B., Hunter, P. R., Johnston, R. B., Mathers, C., Mäusezahl, D., Medlicott, K., Neira, M., Stocks, M., ... Cairncross, S. (2014). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low- and middle-income settings: A retrospective analysis of data from 145 countries. *Tropical Medicine & International Health*, 19(8), 894-905. <https://doi.org/10.1111/tmi.12329>

- Proyecto FONIS (2020). Evaluar la implementación del enfoque PSA y PSS en las comunidades rurales de la Región del Biobío, para la prevención de enfermedades relacionadas con el agua
- Rojas Hernández, J. y Barra Ríos, R. (eds.) (2020). *Seguridad Hídrica. Derechos de agua, escasez, impactos y percepciones ciudadanas en tiempos de cambio climático*. Santiago de Chile: RIL Editores. 344 pp.
- Roberto, J, Ibáñez, J., I. Litter, M., & Pizarro, R. (2001). *Desinfección de agua* (Vols. 305–316).
- Saavedra, A., Galvis, N., Castaneda, M., Zapata, S., Mesa, F., & Aristizábal, A. (2021). Feasibility of using photovoltaic solar energy for water. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11,(No. 3), 1962-1968. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i3.pp1962-1968>
- Salinas, J. A. F. (2018). *Análisis de índices (SAIDI, SAIFI) de confiabilidad en la zona sur de Bogotá y su desempeño en los últimos 2 años*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Subdere. (s. f.-b). *Programa de Infraestructura Rural para el Desarrollo Territorial (PIRDT)*. Recuperado 21 de Enero de 2023, de <https://www.subdere.gov.cl/programas/divisi%C3%B3n-desarrollo-regional/programa-de-infraestructura-rural-para-el-desarrollo-territorial>
- Subdere. (s. f.-a). *Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR)*. Recuperado 21 de enero de 2023, de <https://www.subdere.gov.cl/programas/divisi%C3%B3n-desarrollo-regional/fondo-nacional-de-desarrollo-regional-fndr>
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Wang, F., Xu, J., Liu, L., Yin, G., Wang, J., & Yan, J. (2020). Optimal design and operation of hybrid renewable energy system for drinking water treatment. *Energy*, 119673. doi:10.1016/j.energy.2020.119673

8. Anexos

<u>Base de cálculo para consumo horario Oficinas</u>								
Hora	Computadora 1	Impresora	Teléfono fijo	Luz baño	Luz sala de conferencias	Luz oficina	Luz Cocina	Total
0:00								0
1:00								0
2:00								0
3:00								0
4:00								0
5:00								0
6:00								0
7:00				0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
8:00			0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,041
9:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
10:00	0,18	0,05	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,271
11:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
12:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221

13:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
14:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
15:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
16:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
17:00	0,18		0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,221
18:00	0,18	0,05	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,271
19:00				0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
20:00									0
21:00									0
22:00									0
23:00									0

Base de cálculo para consumo horario PTAS											
Hora	Rodillo de Viña	Bomba 1	Ampolleta 1	Ampolleta 2	Ampolleta 3	Ampolleta 4 Triturador	Ampolleta 5 Triturador	Luces led 1	Luces led 2	Luces led 3	Luces led 4
0:00	1,98										
1:00	1,98										

2:00	1,98										
3:00	1,98										
4:00	1,98										
5:00	1,98										
6:00	1,98										
7:00	1,98										
8:00	1,98	1,39									
9:00	1,98	1,39									
10:00	1,98	1,39									
11:00	1,98	1,39									
12:00	1,98	1,39									
13:00	1,98	1,39									
14:00	1,98										
15:00	1,98										
16:00	1,98										
17:00	1,98										
18:00	1,98		0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
19:00	1,98		0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015

20:00	1,98		0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
21:00	1,98										
22:00	1,98										
23:00	1,98										

Base de cálculo para consumo horario APR VF y VM										
Hora	Bomb a villa merce des	Bomb a villa las flores	Bomb a de emerg encia	Bomb a de cloraci ón VM	Bomb a de cloraci ón VF	Bomba de Almace namient o	Ampol leta 1	Ampol leta 2	Ampol leta 3	Ampol leta 4
0:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
1:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
2:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
3:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
4:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
5:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
6:00		2,98		0.30	0.30	2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
7:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				

8:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
9:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
10:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
11:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
12:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
13:00	2,98	2,98		0.30	0.30	2,5				
14:00	2,98	2,98	2,8	0.30	0.30	2,5				
15:00	2,98	2,98	2,8	0.30	0,3	2,5				
16:00	2,98	2,98		0.31	0,3	2,5				
17:00	2,98	2,98		0.32	0,3	2,5				
18:00	2,98	2,98		0.33	0,3	2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
19:00		2,98		0.34	0,3	2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
20:00		2,98		0.35	0,3	2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
21:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
22:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06
23:00						2,5	0,06	0,06	0,06	0,06

Consumo semanal del SSR (kW)

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
1:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
2:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
3:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
4:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
5:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
6:00	8,78	9,19	7,03	8,82	7,86	6,43	6,08	5,71	5,82	5,52	7,83	7,69
7:00	10,77	11,23	9,07	10,73	9,97	8,56	8,13	7,95	7,89	7,59	9,91	9,59
8:00	11,76	12,30	10,77	12,15	11,45	10,77	10,55	9,88	10,51	8,43	10,50	11,27
9:00	11,94	12,48	10,95	12,33	11,63	10,95	10,73	10,06	10,69	8,61	10,68	11,45
10:00	11,99	12,53	11,00	12,38	11,68	11,00	10,78	10,11	10,74	8,66	10,73	11,50
11:00	11,94	12,48	10,95	12,33	11,63	10,95	10,73	10,06	10,69	8,61	10,68	11,45
12:00	11,94	12,48	10,95	12,33	11,63	10,95	10,73	10,06	10,69	8,61	10,68	11,45
13:00	11,94	12,48	10,95	12,33	11,63	10,95	10,73	10,06	10,69	8,61	10,68	11,45
14:00	12,94	13,43	11,33	12,77	12,23	10,79	10,21	10,21	10,03	9,76	12,14	11,66

15:00	13,15	13,65	11,55	12,97	12,46	11,01	10,41	10,43	10,24	9,97	12,36	11,87
16:00	11,16	11,62	9,47	11,11	10,38	8,96	8,51	8,35	8,28	7,99	10,31	9,97
17:00	11,16	11,62	9,47	11,11	10,38	8,96	8,51	8,35	8,28	7,99	10,31	9,97
18:00	11,31	11,77	9,62	11,25	10,53	9,11	8,65	8,50	8,42	8,13	10,46	10,11
19:00	9,13	9,56	7,36	9,19	8,26	6,87	6,57	6,24	6,28	5,96	8,22	8,03
20:00	9,09	9,51	7,35	9,11	8,18	6,75	6,38	6,03	6,12	5,83	8,15	7,99
21:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
22:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67
23:00	6,66	7,04	4,82	6,83	5,65	4,24	4,06	3,50	3,73	3,41	5,65	5,67

Consumo fin de semana del SSR (kW)												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
1:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
2:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
3:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70

4:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
5:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
6:00	3,59	3,50	2,44	4,41	2,73	2,34	2,90	1,99	2,49	2,26	2,85	3,66
7:00	4,39	4,26	3,15	5,32	3,44	3,07	3,78	2,69	3,32	3,06	3,58	4,55
8:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
9:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
10:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
11:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
12:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
13:00	4,79	4,67	3,74	6,03	3,96	3,87	4,94	3,36	4,44	3,40	3,79	5,35
14:00	5,20	5,03	3,87	6,25	4,16	3,82	4,68	3,41	4,16	3,87	4,33	5,45
15:00	5,29	5,11	3,95	6,35	4,24	3,90	4,78	3,49	4,25	3,96	4,41	5,55
16:00	4,47	4,34	3,23	5,42	3,52	3,15	3,88	2,77	3,41	3,14	3,66	4,64
17:00	4,47	4,34	3,23	5,42	3,52	3,15	3,88	2,77	3,41	3,14	3,66	4,64
18:00	4,51	4,38	3,26	5,47	3,55	3,18	3,92	2,80	3,45	3,18	3,70	4,69
19:00	3,72	3,62	2,56	4,55	2,85	2,45	3,04	2,10	2,62	2,39	2,96	3,80

20:00	3,72	3,62	2,56	4,55	2,85	2,45	3,04	2,10	2,62	2,39	2,96	3,80
21:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
22:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70
23:00	2,73	2,68	1,68	3,41	1,97	1,54	1,94	1,22	1,60	1,39	2,05	2,70

Inventario de equipos consumidores de energía del SSR

Inventario oficinas		
Equipos consumidores de energía	Potencia (kW)	Horas (hrs)
Computadora	0,18	10
Impresora	0,3	2
Teléfono fijo	0,001	11
Luz baño	0,01	13
Luz sala de conferencias	0,01	13
Luz oficina	0,01	13
Luz Cocina	0,01	13
Inventario PTAS		
Equipos consumidores de energía	Potencia (kW)	Horas (hrs)
Rodillo de Viña	1,98	24

Bomba 1	1,39	6
Ampolleta 1	0,015	3
Ampolleta 2	0,015	3
Ampolleta 3	0,015	3
Ampolleta 4	0,015	3
Ampolleta 5	0,015	3
Luces led 1	0,015	3
Luces led 2	0,015	3
Luces led 3	0,015	3
Luces led 4	0,015	3
Inventario bombas VM y VF		
Equipos consumidores de energía	Potencia (kW)	Horas (hrs)
Bomba villa mercedes	2,98	12
Bomba villa las flores	2,98	15
Bomba de emergencia	2,8	2
Bomba de cloración VM	0.30	15
Bomba de cloración VF	0.30	15
Bomba de Almacenamiento	2,5	24
Ampolleta 1	0,06	13
Ampolleta 2	0,06	13

Ampolleta 3	0,06	13
Ampolleta 4	0,06	13