



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE  
GEOTERMIA, ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR: ESTUDIO DE VIABILIDAD Y  
OPTIMIZACIÓN PARA UNA POSTA RURAL DEL SUR DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

**CAMILA ANDREA VERDUGO PARDO**

PROFESOR GUÍA:  
ALVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO RUBILAR PINO  
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA  
POR: CAMILA ANDREA VERDUGO PARDO  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: ALVARO VALENCIA MUSALEM

## **ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GEOTERMIA, ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR: ESTUDIO DE VIABILIDAD Y OPTIMIZACIÓN PARA UNA POSTA RURAL DEL SUR DE CHILE**

La presente memoria de título se enfoca en la Posta de Salud Rural (PSR) Alto Quilantahue, situada en Tirúa, Región del BíoBío, y tiene como objetivo principal estudiar técnica y económicamente un sistema hibridado de energías renovables que incluyen calefacción con geotermia, para la PSR Alto Quilantahue, agregando como variable la implementación de medidas de eficiencia energética (EE) y estableciendo los casos en que la propuesta sea viable económicamente. Además, se detecta que el edificio presenta problemas en su envolvente térmica y utiliza sistemas de calefacción a base de leña y gas licuado de petróleo (GLP), lo que tiene efectos perjudiciales en la salud de la comunidad.

Para abordar estas preocupaciones, se llevaron a cabo nueve escenarios de estudio diferentes. El caso base representa la situación actual de la envolvente térmica, mientras que los otros escenarios consideran medidas de eficiencia energética (EE) y combinaciones de sistemas geotérmicos, fotovoltaicos y eólicos. Se recopilaron datos meteorológicos y se realizó un ajuste de distribución de Weibull para determinar la velocidad del viento más probable, lo que constituye la base para calcular el recurso solar y eólico disponible.

Las cargas térmicas del edificio se calcularon tanto para el caso base como para los escenarios con EE, lo que resultó en un consumo eléctrico estimado de 42.678 kW y 24.863 kW, respectivamente. Con estos valores, se dimensionaron los sistemas geotérmicos, fotovoltaicos y eólicos en función de las necesidades del edificio.

El análisis económico revela que algunos de los escenarios propuestos no son económicamente viables, ya que los costos asociados a la calefacción geotérmica superan los ahorros en emisiones de carbono y los ingresos por la generación fotovoltaica o eólica. Sin embargo, otros escenarios, en particular los que involucran sistemas fotovoltaicos o eólicos junto con medidas de EE, son económicamente viables y pueden financiar la mejora de la envolvente térmica del edificio. Esto también acorta significativamente el período de retorno de la inversión, pasando de 13 a 9 años.

Se demuestra que la combinación de fuentes de energía renovable, como la generación fotovoltaica y eólica, junto con medidas de eficiencia energética, puede ser una solución y económicamente viable. Esto no solo tiene un impacto positivo en la salud de la comunidad, sino que también puede resultar en beneficios económicos a largo plazo y una reducción en las emisiones de carbono.

*"...tomar la palabra, proponer una acción para cambiar algún aspecto de la sociedad, emitir un juicio sobre alguna iniciativa exige una valentía"*

*La libertad según Hannah Arendt, Maite Larrauri Gómez.*

***A todas las personas valientes que sueñan y trabajan por un futuro mejor.***

# Agradecimientos

Cerrando este largo camino con la culminación de la presente memoria de título, me gustaría en primer lugar agradecer al Profesor Álvaro Valencia y a Pablo Rubilar, por su paciencia y gran generosidad al comprenderme y acompañarme en mi proceso de titulación, el cual no ha estado exento de dificultades. Quiero agradecer también a ambos y a la Agencia de Sostenibilidad Energética por permitirme desarrollar esta memoria de título, pudiendo estudiar y generar conocimiento relacionado con las áreas que más me apasionan, las energías renovables y el desarrollo local de proyectos. También quiero agradecer al Profesor Reynaldo Cabezas, debido a que su consejo sobre que mi objetivo de la memoria no es lo que escribo en la misma, sino que mi objetivo es titularme, me dio la calma y claridad para poder seguir adelante.

De forma más personal, quiero agradecer a mi pareja Cristian Ortega, quien me ha acompañado desde antes de comenzar este largo camino universitario, quien me ha dado la entereza y ayudado a encontrar la motivación para seguir adelante y no rendirme. Fueron muchos los momentos en que añoré este momento y aún no creo que haya podido lograr llegar hasta este punto, gracias por alentarme y estar ahí para mí cada vez que lo necesitaba. Te agradezco a ti Cristian y a toda tu familia por acogerme durante este tiempo, apoyándome no solo económicamente sino que emocionalmente. Gracias Ada, Cristian, Camila, Bastian y Nicolás, por abrirme las puertas de su hogar y tratarme como una más de la familia, mientras me enfrentaba a este proceso, con altos y bajos, de los últimos años del pregrado.

También quiero agradecer a mis amigas que conocí en la Universidad, con quienes compartimos todos esos momentos alegres y eufóricos, pero también situaciones y conversaciones difíciles; con las que compartí un movimiento muy lindo de mujeres, con una actuancia política que caló profundamente en mis principios y que redibujó lo que quiero en la vida. Gracias Gatu, Coté y Michelle, por su gran corazón, por apoyarme incondicionalmente y despojarme de miedos y prejuicios. Quiero agradecer a mi amigo Cristian, quien me ha acompañado desde el primer día que puse un pie como mechona en la Facultad, agradezco tu comprensión y gran apané. A mi amiga Leslie, que me motiva y ha sido un gran apoyo emocional durante este proceso. Además, agradecer a todas las personas quienes me han acompañado en mi paso por la Facultad, regalándome aprendizajes muy valiosos, tanto dentro como fuera del aula.

Por último quiero agradecer a mi mamá Sandra, a mi papá Jorge, a mis hermanas Constanze y Catalina, y a mis sobrinos Fabbianny y Mya, ya que ustedes son gran parte de lo que soy hoy, estoy muy orgullosa y contenta de poder cumplir este sueño que no es solo mío, sino que de toda nuestra familia.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto: Posta de Salud Rural Alto Quilantahue . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.4. Antecedentes de Estudio . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Posta Alto Quilantahue . . . . .	5
2.2. Variables meteorológicas . . . . .	6
2.2.1. TMY: fuente confiable para la Temperatura ambiente y la irradiación global horizontal (GHI) . . . . .	7
2.2.2. Modelamiento de la velocidad del viento a través de la distribución de Weibull . . . . .	7
2.2.2.1. Librería <i>Reliability</i> de Python . . . . .	8
2.3. Envoltente térmica . . . . .	8
2.4. Cargas térmica . . . . .	8
2.5. Demanda eléctrica . . . . .	10
2.6. Sistema de calefacción geotérmico . . . . .	10
2.6.1. Geotermia de baja entalpía . . . . .	10
2.6.2. Tipos de colectores geotérmicos . . . . .	11
2.6.2.1. Largo del colector geotérmico . . . . .	12
2.6.3. Sistema hidráulico para el sistema de calefacción geotérmico . . . . .	12
2.6.3.1. Sistema de distribución por fancoils . . . . .	13
2.6.3.2. Colector geotérmico . . . . .	14
2.7. Sistema de paneles fotovoltaicos . . . . .	14
2.7.1. Componentes . . . . .	14
2.7.2. Producción eléctrica de un sistema de paneles fotovoltaicos . . . . .	15
2.8. Aerogenerador . . . . .	16
2.9. Evaluación económica de proyectos de eficiencia energética y energías renovables	17
2.9.1. Indicadores relevantes . . . . .	17
2.9.2. Precio social del Carbono equivalente . . . . .	18
2.9.3. Ley 20,571 Netbilling . . . . .	18
<b>3. Metodología</b>	<b>19</b>
3.1. Casos de estudio . . . . .	20
3.2. Variables meteorológicas . . . . .	21
3.2.1. Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global (GHI) . . . . .	21

3.2.2.	Velocidad del viento a una altura determinada . . . . .	21
3.3.	Envolvente térmica y medidas de EE . . . . .	23
3.4.	Cargas térmica . . . . .	23
3.5.	Bomba de calor con colector horizontal cerrado . . . . .	24
3.6.	Sistema de distribución de calefacción . . . . .	25
3.7.	Sistema hidráulico para el sistema de calefacción geotérmico . . . . .	26
3.8.	Producción eléctrica de un sistema de paneles fotovoltaicos . . . . .	26
3.9.	Producción eléctrica de un aerogenerador . . . . .	27
3.10.	Evaluación económica . . . . .	27
<b>4.</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>29</b>
4.1.	Variables meteorológicas . . . . .	29
4.1.1.	Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global (GHI) . . . . .	29
4.1.2.	Velocidad del viento a una altura determinada . . . . .	30
4.2.	Envolvente térmica . . . . .	31
4.2.1.	Envolvente térmica caso BASE . . . . .	31
4.2.1.1.	Piso . . . . .	31
4.2.1.2.	Muros . . . . .	33
4.2.1.3.	Techo . . . . .	34
4.2.1.4.	Puertas . . . . .	35
4.2.1.5.	Ventanas . . . . .	35
4.2.1.6.	Resumen envolvente térmica caso BASE . . . . .	37
4.2.2.	Envolvente térmica caso con medidas de EE . . . . .	37
4.2.2.1.	Piso . . . . .	37
4.2.2.2.	Muros . . . . .	38
4.2.2.3.	Techo . . . . .	39
4.2.2.4.	Puertas . . . . .	40
4.2.2.5.	Ventanas . . . . .	41
4.2.2.6.	Resumen envolvente térmica caso con EE . . . . .	41
4.2.2.7.	Costos medidas de eficiencia energética (EE) . . . . .	41
4.2.3.	Comparativa caso BASE y con EE. . . . .	42
4.3.	Cargas térmica y demanda eléctrica de consumo base . . . . .	42
4.3.1.	Infiltraciones de aire . . . . .	42
4.3.2.	Cargas térmicas . . . . .	43
4.3.3.	Demanda eléctrica de consumo base . . . . .	44
4.4.	Sistema de calefacción geotérmica . . . . .	45
4.4.1.	Bomba de calor . . . . .	45
4.4.2.	Fluidos de trabajo y caudales . . . . .	47
4.4.3.	Colector geotérmico . . . . .	48
4.4.4.	Circuito de calefacción por Fancoils . . . . .	50
4.4.5.	Bombas hidráulicas y gasto eléctrico para el sistema de calefacción geotérmico . . . . .	51
4.4.6.	Costos sistema de calefacción geotérmica . . . . .	53
4.5.	Sistema fotovoltaico . . . . .	53
4.5.1.	Estudio preliminar con sistema de baterías . . . . .	54
4.5.2.	Costos sistema fotovoltaico . . . . .	57
4.6.	Aerogenerador . . . . .	57

4.6.1.	Estudio preliminar con sistema de baterías . . . . .	59
4.6.2.	Costos sistema eólico . . . . .	61
4.7.	Evaluación económica . . . . .	62
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
5.1.	Trabajo a futuro . . . . .	66
	<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos</b>	<b>70</b>
A.	Cálculo valor U ventanas caso BASE . . . . .	70
B.	Curvas aerogeneradores . . . . .	71
C.	Evaluación económica . . . . .	75
C.1.	Costos y Ahorros . . . . .	75
C.1.1.	Tasa de inflación . . . . .	75
C.1.2.	Variabilidad en la electricidad . . . . .	75
C.1.3.	Ahorro costo social Carbono equivalente . . . . .	75
C.1.4.	Cotización medidas de EE . . . . .	76
C.2.	Flujos de caja . . . . .	77
C.2.1.	Geotermia Caso BASE . . . . .	77
C.2.2.	Geotermia Caso con EE . . . . .	78
C.2.3.	Geotermia caso BASE con PV . . . . .	79
C.2.4.	Geotermia caso con EE con PV . . . . .	80
C.2.5.	Geotermia caso con EE con Eólica . . . . .	81
C.2.6.	Medidas EE . . . . .	82
C.2.7.	Medidas EE con PV . . . . .	83
C.2.8.	Medidas EE con Eólica . . . . .	84
C.2.9.	Análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV . . . . .	85
C.2.10.	Análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico . . . . .	86
C.2.11.	Análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV . . . . .	87
C.2.12.	Análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico . . . . .	88

# Índice de Tablas

1.1.	Datos geográficos PSR Alto Quilantahue. . . . .	1
2.1.	Gastos anuales PSR Alto Quilantahue. . . . .	5
2.2.	Valores experimentales obtenidos a través de la Nch 851. . . . .	9
2.3.	Escenarios posibles para la VAN y TIR con sus respectivos análisis. . . . .	18
3.1.	Formato base de datos velocidades a 10 m sobre el suelo de NASA 2013-2021 .	21
3.2.	Valores de U máximo para zona climática E. . . . .	23
3.3.	Panel fotovoltaico base. . . . .	27
3.4.	Índice de precios para sistemas de calefacción geotérmico horizontales cerrados.	28
3.5.	Precio proyectos fotovoltaicos llave en mano. . . . .	28
3.6.	Precio proyectos eólicos. . . . .	28
4.1.	Resultados KSTest. . . . .	30
4.2.	Valor de U para piso ventilado caso BASE. . . . .	33
4.3.	Valor de U para muros caso BASE. . . . .	34
4.4.	Valor de U para techo caso BASE. . . . .	35
4.5.	Valor de U para puertas caso BASE. . . . .	35
4.6.	Tipos de ventanas y sus medidas en metros . . . . .	35
4.7.	Áreas elementos ventanas según tipo en metros. . . . .	36
4.8.	Valor de U para ventanas caso BASE. . . . .	36
4.9.	Áreas correspondientes a la envolvente térmica . . . . .	37
4.10.	Áreas correspondientes a la envolvente térmica. Continuación. . . . .	37
4.11.	Valor UA caso BASE. . . . .	37
4.12.	Valor de U para piso ventilado caso con EE. . . . .	38
4.13.	Valor de U para muros caso con EE. . . . .	39
4.14.	Valor de U para techo caso con EE. . . . .	40
4.15.	Valor de U para puerta caso con EE. . . . .	41
4.16.	Valor U*A caso con EE. . . . .	41
4.17.	Costos asociados a las medidas de eficiencia energética. . . . .	42
4.18.	Comparativa valores U y U*A caso BASE y con EE. . . . .	42
4.19.	Reducción de infiltración caso con EE. . . . .	43
4.20.	Consumo eléctrico PSR Alto Quilantahue. . . . .	45
4.21.	Potencia de funcionamiento mínimo Bombas de calor (BC). . . . .	47
4.22.	Características físicas de los fluidos de trabajo. . . . .	47
4.23.	Diámetros escogidos para colector geotérmico para caso BASE y con EE. . . .	47
4.24.	Resultados para caudal, Reynolds y pérdida de carga por metro de tubería del colector geotérmico. . . . .	48
4.25.	Valores para determinar temperatura del suelo. . . . .	48
4.26.	Resultados para selección de bombas hidráulicas. . . . .	51
4.27.	Bombas marca Grundfos seleccionadas para la PSR Alto Quilantahue. . . . .	51

4.28.	Gasto eléctrico anual para cada caso en kWh. . . . .	52
4.29.	Costos asociados al sistema de calefacción geotérmico. . . . .	53
4.30.	Resultados dimensionamiento sistema fotovoltaico (PV). . . . .	53
4.31.	Sistema fotovoltaico con sistema de baterías de litio con 80 % de profundidad de descarga. . . . .	55
4.32.	Costos asociados al sistema fotovoltaico. . . . .	57
4.33.	Resultados dimensionamiento sistema eólico. . . . .	58
4.34.	Sistema eólico con sistema de baterías de litio con 80 % de profundidad de descarga. . . . .	59
4.35.	Costos asociados al sistema eólico. . . . .	61
4.36.	Gasto en calefacción: Caso actual versus Geotermia caso con EE. . . . .	62
4.37.	Ahorro en carbono equivalente caso EE. . . . .	62
4.38.	Resultados evaluación económica 8 casos. . . . .	63
4.39.	Análisis de sensibilidad sobre la variación del precio de venta de la energía sobrante. . . . .	64
A.1.	Dimensiones elementos ventanas. . . . .	70
A.2.	Largo elementos ventanas. . . . .	70
B.1.	Aerogenerador Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52]. . . . .	71
B.2.	Curva de potencia aerogenerador Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52] . . . . .	71
B.3.	Aerogenerador Ryse Energy modelo E-60 HAWT. [53] . . . . .	72
B.4.	Curva de potencia aerogenerador Ryse Energy modelo E-60 HAWT. . . . .	73
C.1.	Cálculo de la tasa de inflación anual al año 2021 . . . . .	75
C.2.	Cálculo de la tasa de inflación anual para el costo variable de electricidad . . . . .	75
C.3.	Equivalencia gasto actual PSR Alto Quilantahue . . . . .	76
C.4.	Cotización medidas de EE . . . . .	76
C.5.	Cotización medida de eficiencia energética: moldura de poliestireno. . . . .	76
C.6.	Flujo de caja: caso BASE con geotermia con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	77
C.7.	Flujo de caja: caso base con geotermia con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	77
C.8.	Indicadores económicos Geotermia caso BASE. . . . .	77
C.9.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	78
C.10.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación . . . . .	78
C.11.	Indicadores económicos Geotermia caso con EE. . . . .	78
C.12.	Flujo de caja: caso BASE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	79
C.13.	Flujo de caja: caso BASE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	79
C.14.	Indicadores económicos Geotermia caso BASE con PV. . . . .	79
C.15.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	80
C.16.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	80
C.17.	Indicadores económicos Geotermia caso con EE con PV. . . . .	80
C.18.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema de aerogenerador (Eólico) con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	81
C.19.	Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema de aerogenerador (Eólico) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación . . . . .	81
C.20.	Indicadores económicos Geotermia caso con EE con Eólico. . . . .	81

C.21. Flujo de caja: caso solo medidas de eficiencia energética (EE) con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	82
C.22. Flujo de caja: caso solo medidas de eficiencia energética (EE) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	82
C.23. Indicadores económicos medidas EE. . . . .	82
C.24. Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado PV con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	83
C.25. Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado PV con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	83
C.26. Indicadores económicos medidas EE con PV. . . . .	83
C.27. Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado Eólica con 10 % de tasa de interés por 30 años. . . . .	84
C.28. Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado Eólica con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación. . . . .	84
C.29. Indicadores económicos medidas EE con Eólica. . . . .	84
C.30. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV. . . . .	85
C.31. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV. Continuación . . . . .	85
C.32. Indicadores económicos sensibilidad Netbilling 20 % PV. . . . .	85
C.33. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico . . . . .	86
C.34. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico. Continuación. . . . .	86
C.35. Indicadores económicos sensibilidad 20 % Eólico. . . . .	86
C.36. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV. . . . .	87
C.37. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV. Continuación. . . . .	87
C.38. Indicadores económicos sensibilidad 50 % PV. . . . .	87
C.39. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico. . . . .	88
C.40. Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico.Continuación. . . . .	88
C.41. Indicadores económicos sensibilidad 50 % Eólico. . . . .	88

# Índice de Ilustraciones

1.1.	PSR Alto Quilantahue vista 3D desde Google Earth. . . . .	1
1.2.	PSR Alto Quilantahue, fotografías de Esteban Nelson. . . . .	2
1.3.	Sistema estudiado en [4] . . . . .	4
2.1.	Elementos presentes en el terreno de la PSR Alto Quilantahue. . . . .	5
2.2.	Distribución espacial PSR Alto Quilantahue . . . . .	6
2.3.	Modelamiento de un set de velocidades del viento a través de una función de distribución Weibull $f(u)$ de parámetros $C$ (escala) y $k$ (forma). Modificado a partir de [6]. . . . .	7
2.4.	Sistema de calefacción geotérmico. . . . .	10
2.5.	Tipos de colectores geotérmicos [17]. . . . .	11
2.6.	Sistema fotovoltaico conectado directamente a las cargas eléctricas. . . . .	14
2.7.	Sistema de aerogenerador [22]. . . . .	17
3.1.	Metodología a utilizar en la presente memoria de título. . . . .	20
3.2.	Casos de estudio en la presente memoria de título. . . . .	20
3.3.	Distribución de fancoils en PSR Alto Quilantahue. . . . .	26
4.1.	Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global TMY. . . . .	29
4.2.	Visualización del modelamiento de la distribución de Weibull. . . . .	30
4.3.	Comparativa bases de datos $V_{mp}$ . . . . .	31
4.4.	Piso ventilado con apoyos de cemento. A partir de [37] . . . . .	31
4.5.	Áreas piso ventilado. . . . .	32
4.6.	Entramado muros de madera PSR Alto Quilantahue. . . . .	33
4.7.	Estructura básica de un techo con cerchas [39]. . . . .	34
4.8.	Solución constructiva PDA piso ventilado [40] . . . . .	38
4.9.	Solución constructiva PDA muro [40] . . . . .	39
4.10.	Solución constructiva PDA techo [40] . . . . .	40
4.11.	Carga térmica total para caso BASE y caso con EE. . . . .	43
4.12.	Aporte a las cargas térmicas totales: Infiltración vs Envolverte térmica. . . . .	44
4.13.	Bomba de calor ECOFOREST [42] . . . . .	45
4.14.	Curva gasto eléctrico de la Bomba de calor (BC) para caso BASE.[42] . . . . .	46
4.15.	Curva gasto eléctrico de la Bomba de calor (BC) para caso con EE.[43] . . . . .	46
4.16.	Circuito de colector geotérmico para caso BASE. . . . .	49
4.17.	Circuito de colector geotérmico para caso con EE. . . . .	50
4.18.	Fancoil escogido para la PSR Alto Quilantahue [45]. . . . .	50
4.19.	Imágenes referenciales sobre bombas escogidas para la PSR Alto Quilantahue. . . . .	51
4.20.	Comparativa gasto eléctrico sistema de calefacción geotérmico. . . . .	52
4.21.	Aporte de gasto eléctrico según bomba de calor (BC), bomba hidráulica (BH) y consumo base (CB). . . . .	52
4.22.	Gasto y generación acumulado consumo base (CB). . . . .	54

4.23.	Gasto y generación acumulada sistema fotovoltaico. . . . .	54
4.24.	Sistema fotovoltaico Consumo base con sistema de baterías 10 kWh. . . . .	55
4.25.	Sistema fotovoltaico Geotermia caso BASE con sistema de baterías 335 kWh. .	56
4.26.	Sistema fotovoltaico Geotermia caso con EE con sistema de baterías 165 kWh.	57
4.27.	Gasto y generación acumulado consumo base (CB) sist. eólico. . . . .	58
4.28.	Gasto y generación acumulado Geotermia caso con EE sist. eólico. . . . .	58
4.29.	Sistema eólico Consumo base con sistema de baterías 10 kWh. . . . .	60
4.30.	Sistema eólico Geotermia caso con EE con sistema de baterías 165 kWh. . . .	61
B.1.	Curva de potencia Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52] . . . . .	72
B.2.	Curva de potencia Ryse Energy modelo E-60 HAWT [53] . . . . .	74

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto: Posta de Salud Rural Alto Quilantahue

La Posta de Salud Rural (PSR) Alto Quilantahue se encuentra en la comuna de Tirúa, correspondiente a la Provincia de Arauco, Región del BíoBío.

Tabla 1.1: Datos geográficos PSR Alto Quilantahue.

Lugar exacto PSR Alto Quilantahue	
Latitud	-38.4510404379331 <sup>o</sup>
Longitud	-73.47593078867685 <sup>o</sup>
Metros sobre el nivel del mar.	488



Figura 1.1: PSR Alto Quilantahue vista 3D desde Google Earth.

La comuna de Tirúa tiene una población de 11,088 habitantes, en donde el 70,4% de su población pertenece a pueblos originarios. Además, la comuna presenta 61,5% de ruralidad, por lo que los servicios de salud rurales como lo es la PSR Alto Quilantahue cumplen un rol fundamental para la comuna [1] Su temperatura media anual bordea los 13°C y los 15°C, mientras que las precipitaciones varían por sobre los 700 milímetros, como promedio anual, aumentando hacia el Sur [2].



Figura 1.2: PSR Alto Quilantahue, fotografías de Esteban Nelson.

La PSR Alto Quilantahue, cuenta con calefacción a leña y gas licuado, el cual se mantiene encendido durante las 08:00 a 17:00 horas de lunes a viernes, pero el funcionamiento de esta es de 24 horas debido a que atienden emergencias. Su materialidad es ligera, compuesta por madera y zincaluminio, comprendiendo un área aproximada de  $148.36 m^2$ .

Por otro lado, presenta una intermitencia en el servicio de electricidad considerable, por tanto, presenta inconvenientes ante diferentes servicios a la comunidad. En esa misma línea, la comunidad del sector, a través de la Estrategia Energética Local realizada el año 2018, en donde expresan la intención de energizar las Postas de Salud Rural con energías renovables, en específico la PSR Alto Quilantahue [2].

## 1.2. Motivación

Debido a lo expuesto anteriormente, se tiene como motivación el poder estudiar la aplicación de energías renovables en la Posta de Salud Rural (PSR) Alto Quilantahue, evitando el uso de leña y asegurando un sistema que pueda proveer energía eléctrica limpia y estable. Esto realizando un trabajo que considere medidas de eficiencia energética tales como el mejoramiento de la envolvente térmica, agregando como arista la viabilidad económica del proyecto, dando la importancia a la realización de proyectos sostenibles en el tiempo.

### 1.3. Objetivos

La presente memoria de título tiene como objetivo general el estudiar técnica y económicamente un sistema hibridado de energías renovables que incluyen calefacción con geotermia, para la PSR Alto Quilantahue ubicada en el Sur de Chile, agregando como variable la implementación de medidas de eficiencia energética (EE) y estableciendo los casos en que la propuesta sea viable económicamente.

Como objetivos específicos de la memoria se tienen:

- Calcular la carga térmica de calefacción de la PSR Alto Quilantahue.
- Estudiar medidas de eficiencia energética para el inmueble.
- Proponer diferentes casos de hibridación.
- Diseñar y seleccionar sistema de calefacción geotérmica.
- Diseñar y seleccionar sistema de paneles fotovoltaicos.
- Diseñar y seleccionar sistema aerogenerador.
- Evaluar económicamente el proyecto.

### 1.4. Antecedentes de Estudio

Recientemente, el estudio de la hibridación de las energías renovables tiene cada vez más relevancia dado el contexto de crisis climática, buscando alternativas y tecnologías que apunten a la carbononeutralidad. Es posible encontrar estudios en donde se investiga la hibridación de diferentes bombas de calor (aerotermia o geotermia) hibridados con aerogeneradores y paneles solares fotovoltaicos. A continuación se describirán dos estudios con sus conclusiones.

El primero de ellos es el estudio *Investigation of a Small Scale Wind Turbine-Heat Pump Hybrid System for a Detached House* de Levent Bilir y Nurdan Yildirim de la Universidad de Yasar, Turquía [3]. Se estudia una casa de un piso independiente con un área de  $100\text{ m}^2$ , ubicada en Bornova, Turquía, en donde se utiliza una bomba de calor geotérmica con un Coeficiente de rendimiento (COP) de 4 para calefacción y 3 para refrigeración. Se obtienen las cargas térmicas durante todo el año a partir del programa EnergyPlus. Un pequeño aerogenerador de 3,6 kW es instalado para satisfacer la demanda eléctrica de la bomba de calor geotérmica. Para el cálculo de la generación eléctrica por parte del aerogenerador se utiliza una función de distribución mensual de Weibull.

Se obtuvo que la demanda total anual de la casa para calefacción y refrigeración fue de 4.541,67 kWh, mientras que el aerogenerador produjo de forma anual 3.128,75 kWh, supliendo un 68.9%.

En segundo lugar, se tiene el estudio de Li et al titulado *Feasibility study about using a stand-alone wind power driven heat pump for space heating* [4], el cual investiga el rendimiento

dinámico de un sistema de bomba de calor (aeroterminia) impulsado por una turbina eólica mediante simulaciones dinámicas; se modela para una casa independiente de dos pisos en Estocolmo, Suecia, a través del programa TRNSYS, con esto se determina que la bomba de calor tendrá una potencia eléctrica de 6 kW con un COP de 3 aproximadamente. Además, se tiene considerado un banco de baterías en que se configura para diferentes capacidades (10, 20, 30, 40, y 50 kWh). Para el aerogenerador se consideran tres modelos con diferentes potencias (8 kW Viryd, 10 kW Tozzigreen y 15 kW Eolicar)

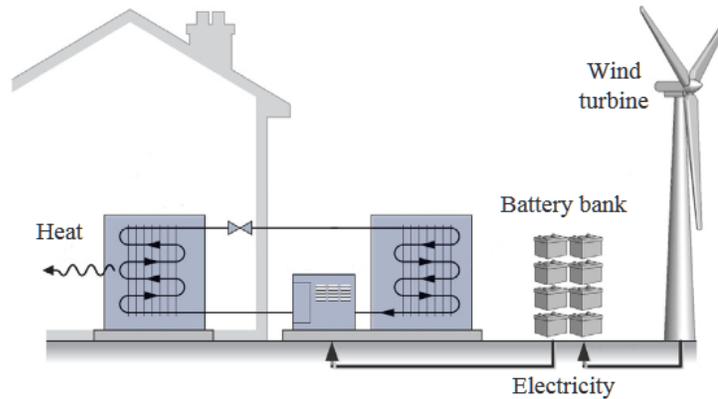


Figura 1.3: Sistema estudiado en [4]

Finalmente, el estudio concluye que dada la intermitencia del viento, el aerogenerador no puede satisfacer por sí solo la demanda eléctrica de la bomba de calor (aeroterminia). Por otro lado, el incrementar la potencia del aerogenerador no conduce necesariamente a una mayor producción de energía eléctrica debido a la relación entre las velocidades del viento y la curva de potencia de este. En la ubicación estudiada y a la altura de la turbina seleccionada, el aerogenerador de 10 kW convierte más energía que el de 15 kW. Al aumentar la capacidad del aerogenerador, se produjo una mayor probabilidad de pérdida de carga y una mayor probabilidad de pérdida de confort térmico.

Es importante señalar que la factibilidad de satisfacer la demanda eléctrica de una bomba de calor geotérmica, depende en gran parte de la carga térmica del inmueble y el recurso eólico disponible en el lugar, y en el contexto de la presente memoria, de una posta rural en el sur de Chile. Otros estudios sobre hibridación sugieren la utilización conjunta de la energía eólica con la energía solar, comprometiendo los costos de inversión inicial.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Posta Alto Quilantahue

La PSR Alto Quilantahue se encuentra en la zona climática E según la clasificación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) [5]. Esto repercute en el gasto que realiza el establecimiento, teniendo así los siguientes gastos anuales.

Tabla 2.1: Gastos anuales PSR Alto Quilantahue.

Año	Leña	Gas	Electricidad
2021	\$ 528,991	\$ 377,850	\$ 790,200

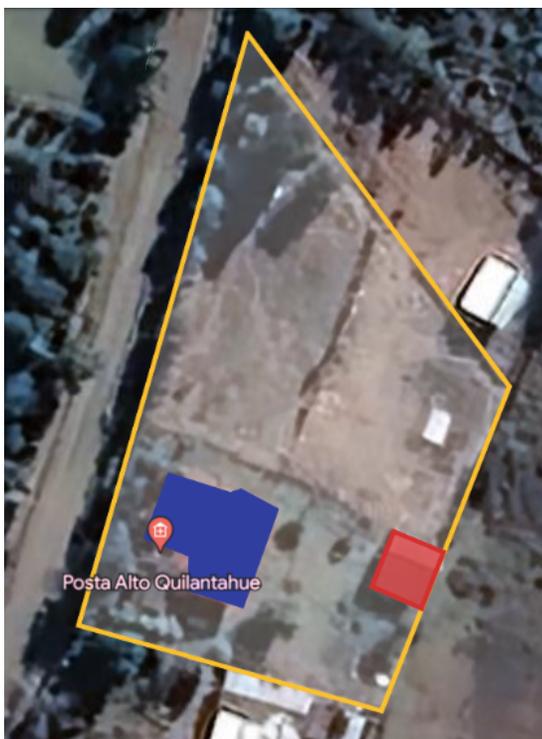


Figura 2.1: Elementos presentes en el terreno de la PSR Alto Quilantahue.

Además, se tiene que la distribución de la PSR Alto Quilantahue contiene varios Boxes de atención al público y un sector en donde funcionarios pueden habitar mientras están de turno ante urgencias, como se muestra en la Figura 2.2.

Por otro lado, el terreno que comprende el establecimiento tiene un área disponible para instalar de energías renovables de  $1,989.4 \text{ m}^2$  aproximadamente. En la Figura 2.1 se observa en azul la PSR Alto Quilantahue y en rojo una bodega donde se guarda leña, en conjunto al terreno disponible para la instalación de proyectos de energías renovables demarcado por la línea amarilla.



Figura 2.2: Distribución espacial PSR Alto Quilantahue

## 2.2. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas son determinantes en el cálculo tanto de las cargas térmicas como para la generación de energía a través de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, es por esto que se necesita definir estas variables con base en métodos y modelos históricos

confiables.

### 2.2.1. TMY: fuente confiable para la Temperatura ambiente y la irradiación global horizontal (GHI)

TMY equivale a Typical Meteorological Year, que en español se traduce como Año Meteorológico Típico, el cual consiste en la caracterización horaria de un lugar en específico durante un año (8760 horas), conteniendo diferentes parámetros como la irradiación global horizontal (GHI), temperatura a 2 metros sobre el suelo, humedad relativa, entre otros.

La metodología más común para definir un TMY es la propuesta en 1978 por Hall et al, en donde utilizan el método estadístico Filkenstein-Schafer (FS). El algoritmo, explicado de forma simple, se aplica sobre una data histórica extensa (mayor a 10 años) con la siguiente secuencia: Se recopilan y se seleccionan y agrupan los datos más representativos, luego se calculan funciones de distribuciones acumulativas (CDF) y se calcula el factor FS, para luego realizar cálculos de distribución de peso de los datos o una especie de promedio de los datos y finalmente filtrar y definir los datos mayormente representativos [6].

Las fuentes donde se puede extraer los TMY son variados, desde fuentes gratuitas como el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos [7], Photovoltaic Geographical Information System [8] de la Unión Europea, entre otros.

### 2.2.2. Modelamiento de la velocidad del viento a través de la distribución de Weibull

Es posible determinar la velocidad más probable con base en los datos a través de la modelación de una distribución de probabilidad, en particular, se ha demostrado que la distribución de Weibull definida por dos parámetros puede aplicarse a toda la gama de datos de velocidad del viento. [9]

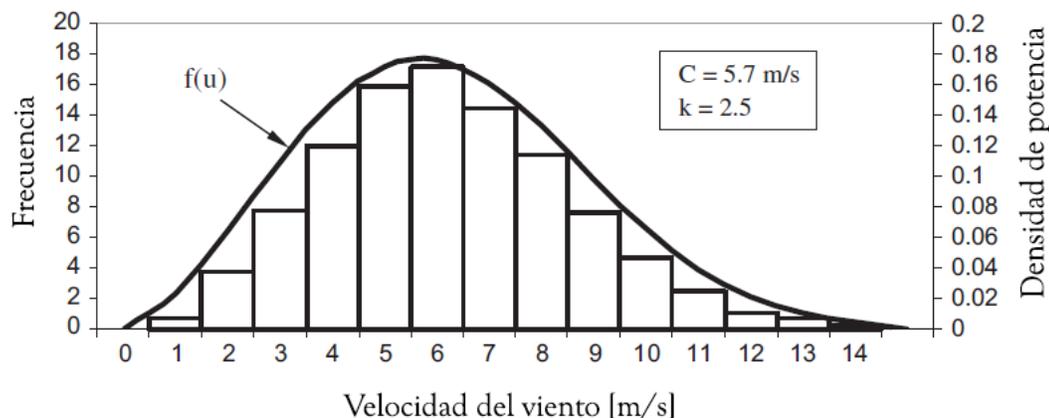


Figura 2.3: Modelamiento de un set de velocidades del viento a través de una función de distribución Weibull  $f(u)$  de parámetros  $C$  (escala) y  $k$  (forma). Modificado a partir de [6].

La velocidad más probable corresponde al valor máximo que alcanza la función de densidad de probabilidad (PDF) y está dada por [10]

$$V_{mp} = \alpha \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^\beta \quad (2.1)$$

Donde:

- $\alpha$  es el parámetro de escala de Weibull.
- $\beta$  es el parámetro de forma de Weibull.

### 2.2.2.1. Librería *Reliability* de Python

Una herramienta poderosa y disponible de manera gratuita y abierta es la librería *Reliability* de Python, en donde es posible, con una programación básica, ajustar distribuciones de Weibull a un set de datos, obteniendo sus parámetros característicos y realizando pruebas para saber la robustez del ajuste, como la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que a diferencia de la prueba de chi-cuadrado, no depende de los intervalos de un histograma [11].

## 2.3. Envoltente térmica

La envoltente térmica está constituida por todos aquellos elementos que separan del espacio interior con el exterior en las edificaciones, ya sean: piso, muros, techo, ventanas, puertas, etc. [5]. Su rol en la transferencia de calor entre el interior y el exterior de un inmueble es de gran importancia, debido a que es allí donde se producen los fenómenos de conducción y convección de calor con el exterior. Es por esto que es necesario determinar la envoltente térmica y sus características de transferencia de calor para poder calcular una carga térmica precisa.

## 2.4. Cargas térmica

Las cargas térmicas o demandas de calefacción o refrigeración de un inmueble son la cantidad de energía requerida para mantener el espacio interior a una temperatura de confort establecida. Para calefacción se debe considerar el peor de los casos, en ese sentido, solo se deben considerar pérdidas a partir de la conducción y convección de la envoltente térmica y las pérdidas de calor por las infiltraciones de aire [12]. Por lo general, para la envoltente térmica, se mide en unidades de kWh, calculando este valor a través de diferentes métodos, pero el más utilizado en Chile es a través del método establecido en la NCh 853 [13], determinando el valor de la transmitancia térmica o valor U [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] y multiplicando luego por al área de la envoltente térmica, en condiciones de estado estacionario, basadas en la ley de Fourier y pruebas de laboratorio.

Por lo tanto, se tiene que para elementos compuesto por un número de  $i$  capas homogéneas

de diferentes materiales, el valor U se calcula como

$$\frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad (2.2)$$

Donde:

- $U$ : Transmitancia térmica del elemento  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ .
- $R_{si}$ : Resistencia térmica de superficie al interior  $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$ .
- $e_i$ : Espesor de la capa de material i[m].
- $\lambda_i$ : Conductividad térmica del material i  $\left[\frac{mK}{W}\right]$ .
- $R_{se}$ : Resistencia térmica de superficie al exterior  $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$ .

Tabla 2.2: Valores experimentales obtenidos a través de la Nch 851.

	Rsi	Rse	Rsi + Rse
Flujo Horizontal	0.12	0.05	0.17
Flujo ascendente	0.09	0.05	0.14
Flujo descendente	0.17	0.05	0.22

Para materiales no homogéneos, como una ventana compuesta por un porcentaje de vidrio y otro de marco de aluminio, se debe calcular el valor U promedio

$$\bar{U} = \frac{\sum U_i A_i}{\sum A_i} \quad (2.3)$$

Donde:

- $\bar{U}$ : Transmitancia térmica promedio del elemento  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ .
- $U_i$ : Transmitancia térmica del material i  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ .
- $A_i$ : Área del material i[m<sup>2</sup>].

Para las infiltraciones de aire se deben calcular como [14]

$$Q_{inf} = V_{aire} \cdot \frac{N}{3600} \cdot \rho_{aire} \cdot C_p \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.4)$$

Donde:

- $Q_{vent}$ : Carga térmica asociada a infiltraciones de aire[W].
- $V_{aire}$ : Volumen de aire del inmueble [m<sup>3</sup>].
- $N$ : Renovaciones de aire por hora  $\left[\frac{1}{h}\right]$ .
- $\rho_{aire}$ : Densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

- $C_p$ : Calor específico del aire  $\left[\frac{J}{kg^{\circ}C}\right]$ .
- $T_{ext}$ : Temperatura exterior  $[^{\circ}C]$ .
- $T_{int}$ : Temperatura interior  $[^{\circ}C]$ .

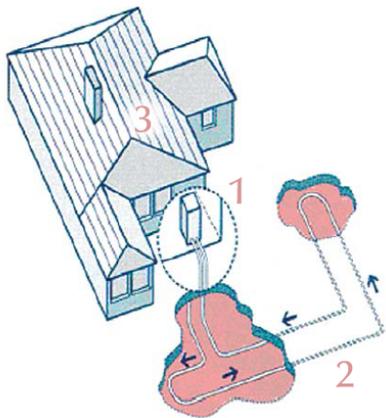
## 2.5. Demanda eléctrica

La demanda eléctrica de consumo base se puede calcular a través de un listado de aparatos electrónicos que se utilizan de forma cotidiana, en donde se especifican la potencia y las horas en que se utilizan, para así estimar un total de consumo base y en lo posible una curva de consumo, considerando su potencia [kW] y consumo máximo [kWh].

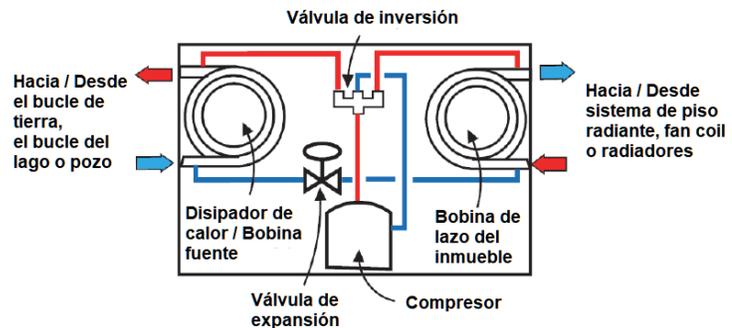
## 2.6. Sistema de calefacción geotérmico

### 2.6.1. Geotermia de baja entalpía

La temperatura de la Tierra se mantiene constante durante todo el año, mientras que la temperatura del aire a la que nos vemos expuestos cambia drásticamente entre el día y la noche, el invierno y el verano. El sistema de calefacción geotérmico, el cual recolecta y utiliza esta energía para climatizar espacios, consiste en tres elementos principales [15]:



(a) Componentes sistema calefacción geotérmico [16].



(b) Bomba de calor geotérmica [15].

Figura 2.4: Sistema de calefacción geotérmico.

1. Colector geotérmico: Es el sistema, si este es de un tipo cerrado, de tuberías enterradas bajo tierra, que a la profundidad adecuada, permite que el líquido que circula a través de ellas aumente su temperatura. Este líquido es empujado gracias a una bomba hidráulica conectada a la red eléctrica para que pueda recorrer todo el circuito y cumpla su objetivo.
2. Bomba de calor: Es el elemento eléctrico de muy alta eficiencia que efectúa el intercambio de temperatura del fluido que llega desde el colector geotérmico con el fluido del sistema de distribución de calor.

3. Sistema de distribución de calor: Este sistema se encarga de alcanzar la temperatura deseada en el inmueble, ya sea mediante conductos de aire o fan-coils, circuitos de agua y radiadores o mediante paredes, techos o suelos radiantes en los cuales circula un fluido con una temperatura de distribución que depende del tipo de sistema de distribución de calor escogido.

## 2.6.2. Tipos de colectores geotérmicos

Los colectores geotérmicos pueden ser de tipo abierto, o cerrado: cuando es abierto, puede utilizar el agua subterránea o el agua superficial como fluido calotransportador, y cuando es cerrado utiliza un fluido anticongelante (generalmente una mezcla de agua con glicol) que pasa a través de tuberías enterradas, ya sea en el subsuelo, en un lago o en un río. En la Figura 2.5 se muestra los diferentes tipos de configuraciones

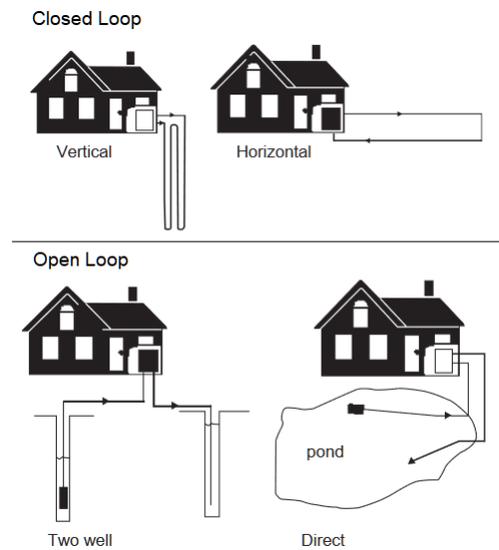


Figura 2.5: Tipos de colectores geotérmicos [17].

Debido a que el sistema abierto hace uso de las aguas subterráneas, para poder utilizar este tipo de sistema, requieren de una asesoría legal y de estudios geológicos para poder materializar el proyecto. En cambio, el sistema cerrado no utiliza las aguas superficiales o subterráneas, por lo que se logra un ahorro de tiempo y dinero en este aspecto.

Por otro lado, el sistema vertical necesita de la realización de pozos profundos, con un costo asociado mucho mayor al sistema horizontal, el cual solo necesita de una retroexcavadora para hacer zanjas de 2 a 3 metros de profundidad, ahorrando considerablemente en los costos asociados al proyecto.

Es importante mencionar que al utilizar un sistema horizontal cerrado se ahorran recursos de permisos legales, de estudios geológicos y perforaciones profundas, pero tiene un rendimiento menor al sistema vertical cerrado. Aun así, se puede afirmar que a pesar de este menor

rendimiento, es posible que cumpla los requerimientos para calefaccionar un inmueble a un costo menor que los otros sistemas.

### 2.6.2.1. Largo del colector geotérmico

Por otro lado, se puede determinar el largo del colector geotérmico horizontal  $L_{col}$  como [18]

$$L_{col} = \frac{P_{cal} \cdot \frac{COP_{cal}-1}{COP_{cal}} (R_p + R_s \cdot F_{cal})}{T_{minsuelo} - T_c} \quad (2.5)$$

Donde:

- $P_{cal}$ : Potencia de calefacción de diseño  $[W]$ .
- $L_{col}$ : Largo del colector geotérmico horizontal  $[m]$ .
- $R_p$ : Resistencia térmica de los tubos del colector  $\left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$ .
- $R_s$ : Resistencia térmica del suelo a una determinada profundidad  $\left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$ .
- $F_{cal}$ : Factor de operación de calefacción.
- $T_{minsuelo}$ : Temperatura mínima del suelo a una determinada profundidad  $[^{\circ}C]$ .
- $T_c$ : Temperatura del colector  $[^{\circ}C]$ .

### 2.6.3. Sistema hidráulico para el sistema de calefacción geotérmico

Para poder dimensionar sistemas hidráulicos y su gasto energético asociado, es necesario calcular su caudal, pérdidas de carga y número de Reynolds, para así poder elegir el diámetro de tubería y su respectiva bomba. Con estos valores obtenidos, es posible establecer a través de las curvas de potencia de las bombas su potencia usadas horariamente y, por lo tanto, calcular su gasto eléctrico.

Para que un sistema de transferencia de calor sea eficiente, se debe asegurar un flujo turbulento a través de mantener un número de Reynolds mayor a 2,300 [15]. En esa misma línea, sobre las pérdidas de carga, se recomienda tener hasta 3 m.c.a. por cada 100 metros de tubería.

Para los sistemas hidráulicos existen variados métodos para calcular las pérdidas de carga, pero existe uno que es sencillo, este es el método de Fair-Whipple-Hsiao [19], lo cual se tiene para agua fría y agua caliente respectivamente

$$h = 676.745 \cdot \frac{q^{1.751}}{D^{4.753}} \quad (2.6)$$

Donde:

- $h$ : Pérdidas de carga para agua fría  $\left[\frac{m.c.a.}{m}\right]$ .

- $q$ : Caudal  $\left[\frac{L}{min}\right]$ .
- $\mathbb{D}$ : Diámetro de la tubería  $[mm]$ .

$$h = 545.045 \cdot \frac{q^{1.751}}{D^{4.753}} \quad (2.7)$$

Donde:

- $h$ : Pérdidas de carga para agua caliente  $\left[\frac{mca}{m}\right]$ .
- $q$ : Caudal  $\left[\frac{L}{min}\right]$ .
- $\mathbb{D}$ : Diámetro de la tubería  $[mm]$ .

### 2.6.3.1. Sistema de distribución por fancoils

Para un sistema por distribución por fancoils se debe saber el caudal necesario para satisfacer la demanda térmica, por lo general los equipos de fancoils para calefacción ocupan agua caliente, para esto se debe calcular de la siguiente manera [16]

$$q_{FC} = \frac{COP}{COP - 1} \cdot \frac{P_{cal}}{\rho_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T_{FC}} \quad (2.8)$$

Donde:

- $q_{FC}$ : Caudal del sistema de fancoils  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .
- $P_{cal}$ : Potencia de calefacción de diseño  $[W]$ .
- $\rho_{agua}$ : Densidad del agua a la temperatura de ingreso al fancoil  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
- $C_p$ : Calor específico del agua a la temperatura de ingreso al fancoil  $\left[\frac{J}{kg^\circ C}\right]$ .
- $\Delta T_{FC}$ : Salto térmico del fancoil  $[^\circ C]$ .

Es posible calcular el salto térmico de un fan coil con una potencia máxima en particular, de forma que [16]

$$\Delta T_{FC} = \frac{P_{FC}}{q_{nomFC} \cdot \rho_{agua} \cdot C_p} \quad (2.9)$$

Donde:

- $\Delta T_{FC}$ : Salto térmico del fancoil  $[^\circ C]$ .
- $P_{FC}$ : Potencia máxima de calefacción de fancoil seleccionado  $[W]$ .
- $q_{nomFC}$ : Caudal nominal del fancoil  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .
- $\rho_{agua}$ : Densidad del agua a la temperatura de ingreso al fancoil  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
- $C_p$ : Calor específico del agua a la temperatura de ingreso al fancoil  $\left[\frac{J}{kg^\circ C}\right]$ .

### 2.6.3.2. Colector geotérmico

Para el colector geotérmico es necesario saber el caudal que satisface la demanda térmica, por lo que se debe calcular de la siguiente manera [16]

$$q_{col} = \frac{COP - 1}{COP} \cdot \frac{P_{cal}}{\rho_{fg} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out})} \quad (2.10)$$

Donde:

- $q_{col}$ : Caudal del sistema colector geotérmico  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .
- $P_{cal}$ : Potencia de calefacción de diseño  $[W]$ .
- $\rho_{fg}$ : Densidad del fluido geotérmico  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
- $C_p$ : Calor específico del fluido geotérmico  $\left[\frac{J}{kg^\circ C}\right]$ .
- $T_{in}$ : Temperatura de entrada  $[^\circ C]$ .
- $T_{out}$ : Temperatura de salida  $[^\circ C]$ .

Para la temperatura de entrada se puede estimar un valor y se debe elegir entre  $7.2^\circ C$  y la temperatura ambiente promedio anual, restando 2.8 grados. Luego la temperatura de salida se puede estimar como: [16]

$$T_{out} = \frac{COP - 1}{COP} \cdot \Delta T_{FC} + T_{in} + \Delta T_a \quad (2.11)$$

Donde:

- $T_{out}$ : Temperatura de salida  $[^\circ C]$ .
- $\Delta T_{FC}$ : Salto térmico del fancoil  $[^\circ C]$ .
- $T_{in}$ : Temperatura de entrada  $[^\circ C]$ .
- $\Delta T_a$ : Salto térmico referencial igual a 2.8  $[^\circ C]$ .

## 2.7. Sistema de paneles fotovoltaicos

### 2.7.1. Componentes

El arreglo de un sistema fotovoltaico se compone de los paneles fotovoltaicos puestos en paralelo o en serie y conectados a un inversor, el cual cumple el rol de transformar la corriente DC a AC. El caso más simple es el arreglo fotovoltaico conectado directamente a la demanda eléctrica, sin baterías.

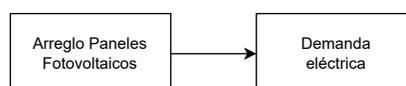


Figura 2.6: Sistema fotovoltaico conectado directamente a las cargas eléctricas.

## 2.7.2. Producción eléctrica de un sistema de paneles fotovoltaicos

Si se tiene un panel fotovoltaico sobre una superficie horizontal, basta con obtener la irradiancia horizontal global (GHI), pero si se tiene una superficie inclinada y manteniendo la orientación hacia el norte, la irradiancia se calculará como [6]

$$G_{si} = GHI \cos(\theta) \quad (2.12)$$

Donde:

- $G_{si}$ : Irradiancia sobre superficie inclinado a azimut = 0  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .
- $GHI$ : Irradiancia global horizontal  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .
- $\theta$ : Ángulo de inclinación [*radianes*].

Para el cálculo de la generación eléctrica en potencia en corriente continua (DC) del panel fotovoltaico, existen varias metodologías y una de ellas es la forma simple, la cual se calcula de la siguiente forma [20].

$$P_{DC0} = P_{mp} \cdot N \quad (2.13)$$

Donde:

- $P_{DC0}$ : Capacidad del sistema [*kW*].
- $P_{mp}$ : Capacidad máxima del panel fotovoltaico [*kW*].
- $N$ : Número de paneles.

$$P_{DC} \begin{cases} \frac{I_{poa}}{I_o} P_{DC0} (1 + \gamma(T_C - T_o)) & I_{poa} \geq 125 \frac{W}{m^2} \\ \frac{0.008 I_{poa}^2}{I_o} P_{DC0} (1 + \gamma(T_C - T_o)) & I_{poa} < 125 \frac{W}{m^2} \end{cases} \quad (2.14)$$

Donde:

- $P_{DC}$ : Potencia en corriente continua generada por el sistema [*kW*].
- $I_{poa}$ : Irradiancia global horizontal sobre la superficie a utilizar  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .
- $I_o$ : Irradiancia referencial igual a 1000  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .
- $P_{DC0}$ : Capacidad del sistema [*kW*].
- $\gamma$ : coeficiente de temperatura de la celda para su potencia máxima  $\left[\frac{kW}{^\circ C}\right]$ .
- $T_C$ : Temperatura ambiente [ $^\circ C$ ].
- $T_o$ : Temperatura referencial igual a 25 [ $^\circ C$ ].

Por otro lado, se deben considerar las pérdidas de eficiencia del inversor, que por lo general es de 4 % de forma nominal, el cableado y otros factores, estimado por un 14 % de pérdida para calcular la potencia en corriente alterna real [20]. Para calcular la potencia generada en corriente alterna se debe proseguir de la forma

$$\eta = \frac{\eta_{nom}}{0.9637} \left( -0.012 \frac{P_{DC}}{P_{DC0}} - 0.0059 \frac{P_{DC0}}{P_{DC}} + 0.9858 \right) \quad (2.15)$$

Donde:

- $\eta$ : Eficiencia del inversor.
- $P_{DC}$ : Potencia generada en corriente continua por el sistema [kW].
- $P_{DC0}$ : Capacidad del sistema [kW].

$$P_{AC} \begin{cases} \eta P_{DC} (1 - P_T) & \text{si } P_{DC} < P_{DC0} \\ \eta_{nom} P_{DC0} (1 - P_T) & \text{si } P_{DC} \geq P_{DC0} \end{cases} \quad (2.16)$$

Donde:

- $P_{AC}$ : Potencia generada en corriente alterna por el sistema [kW].
- $\eta$ : Eficiencia del inversor.
- $P_{DC}$ : Potencia generada en corriente continua por el sistema [kW].
- $\eta_{nom}$ : Eficiencia nominal del inversor.
- $P_{DC0}$ : Capacidad del sistema [kW].
- $P_T$ : Pérdidas totales del sistema iguales a 14 %.

## 2.8. Aerogenerador

La Comisión Internacional Electrotécnica (en inglés, *International Electrotechnical Commission, IEC*) define como aerogeneradores pequeños aquellos que tienen una potencia nominal menor a 50 kW [21]. En el contexto de una posta rural, se espera que el requerimiento de un aerogenerador pequeño compatibilice con la demanda eléctrica del establecimiento y del sistema de calefacción geotérmica.

En primer lugar, la potencia extraída del viento se puede notar como [21]

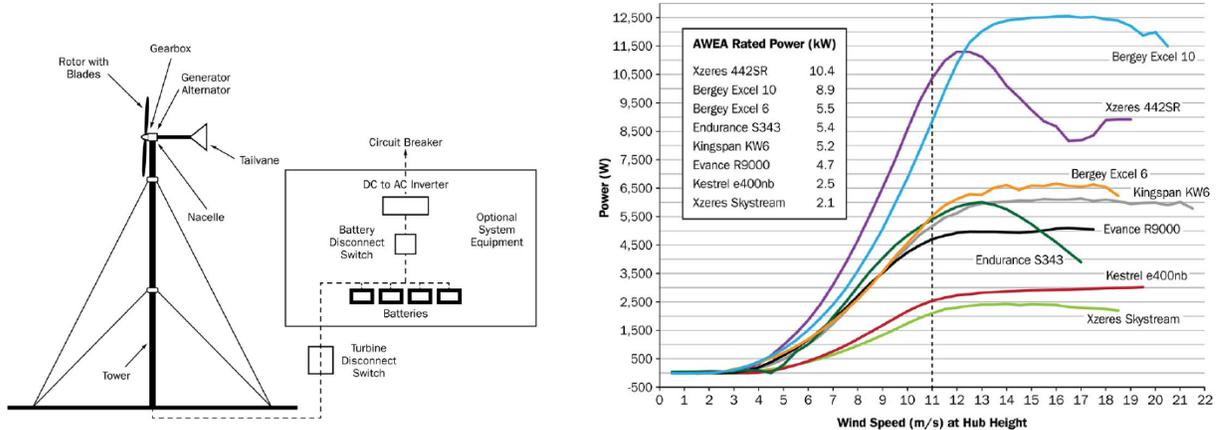
$$P = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \quad (2.17)$$

Donde:

- $P$ : Potencia extraída del viento [W].
- $\rho$ : Densidad del aire  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ .

- $A$ : Área transversal al viento, la que se considera como  $A = \pi R^2$  con  $R$  como el radio de la pala [ $m^2$ ].
- $U_0$ : Velocidad del viento [ $\frac{m}{s}$ ].

Con esto es posible obtener la curva de potencia para cada modelo en el mercado según la velocidad del viento.



(a) Componentes aerogenerador de eje horizontal.

(b) Curvas de potencia para diferentes modelos en el mercado según la velocidad del viento.

Figura 2.7: Sistema de aerogenerador [22].

## 2.9. Evaluación económica de proyectos de eficiencia energética y energías renovables

Dado el contexto actual de crisis climática y el respectivo auge de posibles alternativas que logren ser sostenibles en el tiempo, nace la necesidad de desarrollar proyectos que den soluciones a los desafíos climático-energético actuales. Es por lo anterior que a la hora de destinar recursos a posibles proyectos orientados a abordar las temáticas mencionadas se debe tener en consideración la evaluación económica para garantizar que se tomen decisiones informadas, se asignen recursos de manera eficiente y se maximicen los beneficios económicos y medioambientales de dichos proyectos.

### 2.9.1. Indicadores relevantes

El VAN o Valor Actual Neto, calcula la ganancia después de obtener la rentabilidad deseada y recuperar la inversión inicial. A través de Excel es posible calcular este valor mediante la función VAN, ingresando la tasa de descuento y los flujos de cajas, finalmente se le resta la inversión inicial en el año 0 [23].

La tasa de descuento que se utiliza usualmente en proyectos tanto de eficiencia energética como energías renovables es del 10% [24].

La TIR o Tasa Interno de Retorno corresponde a la tasa de descuento que logra que el proyecto recupere su inversión (VAN=0). A través de Excel es posible calcular este valor

mediante la función TIR, ingresando todos los flujos de caja (desde el año 0 hasta su término) [23].

El VAN y la TIR en conjunto pueden darnos ciertos análisis cuando tienen los siguientes valores [23].

Tabla 2.3: Escenarios posibles para la VAN y TIR con sus respectivos análisis.

VAN>0 y TIR>0	La rentabilidad es superior a la exigida después de recuperar toda la inversión.
VAN=0 y TIR>0	La rentabilidad es igual a la exigida después de recuperar toda la inversión.
VAN<0 y TIR>0	La rentabilidad es inferior a la exigida después de recuperar toda la inversión.
VAN<0 y TIR=0	La rentabilidad es 0, pero se recupera toda la inversión.
VAN<0 y TIR<0	La rentabilidad es 0 y no se recupera toda o parte de la inversión.

El año de retorno se establece cuando el flujo de caja absoluto es mayor a 0, recuperándose la inversión inicial.

### 2.9.2. Precio social del Carbono equivalente

Las externalidades, como lo es el  $CO_2$  equivalente emitido a la atmósfera debido a diferentes actividades, pueden cuantificarse en dinero para entender su impacto en la sociedad [25]. Este año 2023, en Chile, se fijó un valor de  $28,887 \frac{\$CLP}{tonCO_2eq}$  [26].

### 2.9.3. Ley 20,571 Netbilling

El 2012 se promulga la ley 20,571, con el objetivo de fomentar la generación sustentable de energía eléctrica, en donde se establece que para las personas que son clientes y que tienen instalados hasta 100 kW de potencia de energías renovables, pueden inyectar a la red energía, esto con el fin de lograr el autoconsumo o Netbilling. El precio estimado por vender energía a la red es cercano el 60% del valor de la energía comprada [27].

# Capítulo 3

## Metodología

En la presente memoria de título se utilizará la siguiente metodología de forma general:

- Establecer caso base: Estudiar la PSR Alto Quilantahue con el objetivo de definir su carga térmica.
- Proponer medidas de eficiencia energética (EE) y calcular nueva carga térmica: Se investigará sobre medidas de eficiencia energética que puedan aplicarse a la posta rural, teniendo como referencia experiencias obtenidas por la Agencia de Sostenibilidad Energética y el MINVU. Con las medidas de EE se podrá calcular una nueva carga térmica.
- Diseñar y calcular sistema de calefacción geotérmico: A partir de las cargas térmicas y el sistema de distribución de calor (fancoil) se seleccionará una bomba de calor con su respectivo sistema hidráulico, para luego determinar el largo del colector horizontal cerrado.
- Calcular y seleccionar aerogenerador y fotovoltaico: Con los datos del consumo eléctrico por parte de la bomba de calor y el funcionamiento de la posta rural, se podrá seleccionar un aerogenerador que logre suplir la demanda eléctrica anual. En esta etapa se debe modelar el funcionamiento de varios modelos de aerogeneradores para poder estudiar la factibilidad de estos a través de su curva de potencia y los datos de la velocidad del viento. Bajo esa misma línea para los paneles fotovoltaicos, se seleccionará un panel base y se determinará la cantidad de paneles necesarios para suplir la demanda eléctrica anual.
- Evaluación económica: En esta etapa se evaluarán económicamente los diferentes casos de hibridación, realizando un flujo de caja, con el objetivo de obtener indicadores como el VAN, la TIR y los años de retorno, realizando finalmente un análisis de sensibilidad en caso de ser necesario.

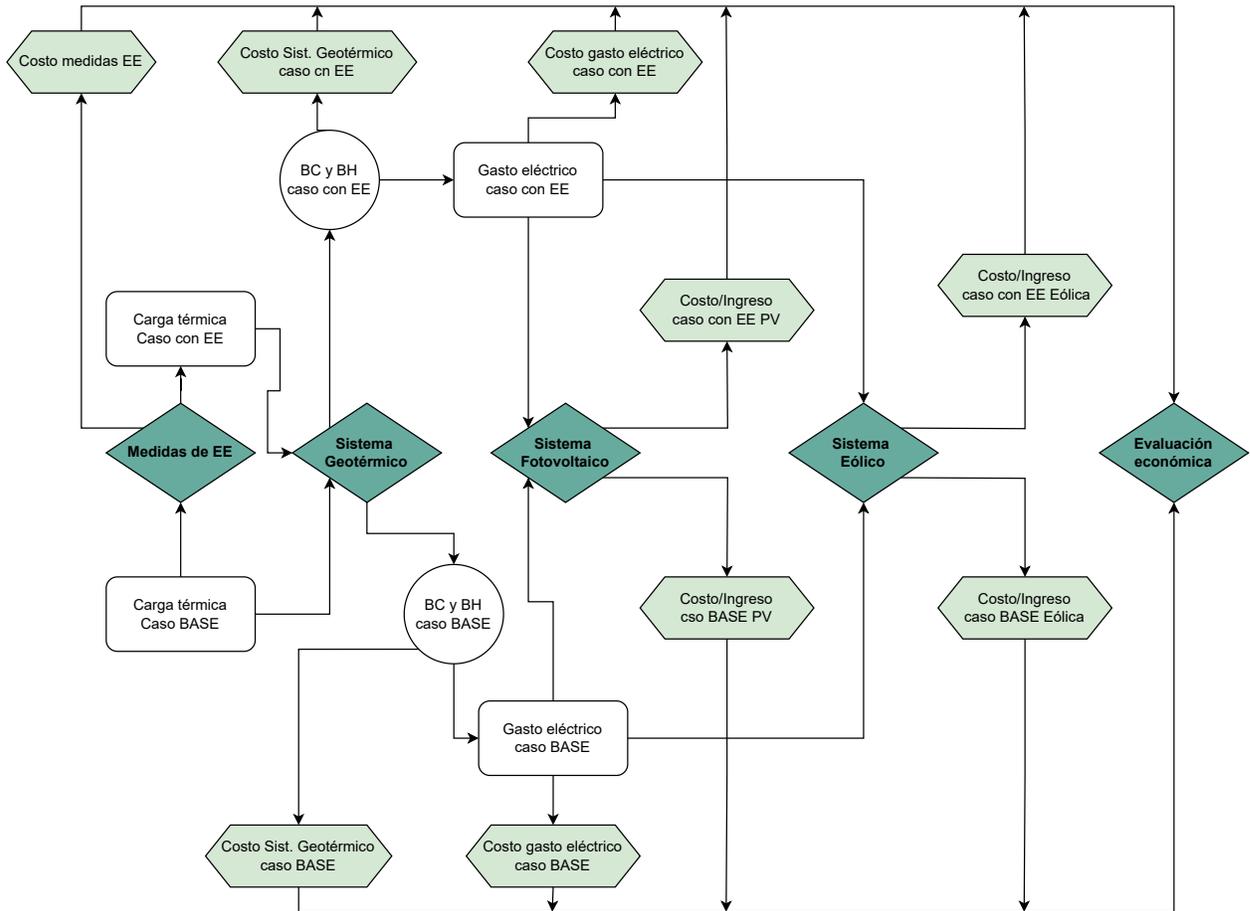


Figura 3.1: Metodología a utilizar en la presente memoria de título.

### 3.1. Casos de estudio

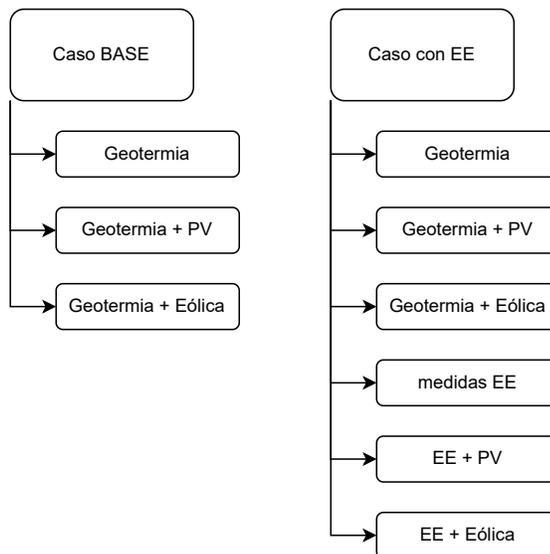


Figura 3.2: Casos de estudio en la presente memoria de título.

Se han definido nueve casos de estudio en los que se combinarán el caso base con medidas de eficiencia energética. Estas medidas incluirán tanto la calefacción geotérmica en conjunción con las energías fotovoltaicas y eólicas, como también las medidas de eficiencia energética junto con la generación fotovoltaica y eólica.

## 3.2. Variables meteorológicas

### 3.2.1. Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global (GHI)

Se utilizarán los datos TMY de PVSol, descargados a través de la página del Explorador Solar [28] los que comprenden temperatura ambiente e irradiación global horizontal de forma horaria (8760 datos).

### 3.2.2. Velocidad del viento a una altura determinada

En primera instancia se tienen dos bases de datos disponibles, los datos del Explorador Eólico [29] y los datos de la NASA POWER Data Acces Viewer [30] para la ubicación exacta de la Tabla 1.1. Para ambas bases de datos se calculará la velocidad más probable y en base a los resultados se analizará y seleccionará una.

Para poder determinar la velocidad más probable de forma horaria se seguirán los siguientes pasos:

1. Determinar base de datos: los datos se extraen desde las bases de datos correspondientes, los datos de velocidad del viento en m/s para 10 y 50 metros sobre el nivel del suelo. Estos se ordenan de forma en que se presentan las 8760 horas en un año no bisiesto (se eliminan los datos en que se presenta el día extra en febrero). A modo de ejemplo, se ilustra el formato con los datos de la NASA, del año 2013 al 2021:

Tabla 3.1: Formato base de datos velocidades a 10 m sobre el suelo de NASA 2013-2021

TAG HORA	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	8.73	3.26	7.49	5.61	1.74	9.22	6.96	8.03	8.49
2	9.2	3.22	7.86	5.43	1.45	8.37	6.81	8.21	8.22
3	8.99	3.44	8.07	5.19	1.4	7.41	6.53	7.88	8.21
4	8.65	3.75	8	4.78	1.44	7.28	6.42	7.35	8.72
5	8.18	4.03	7.69	4.29	1.63	6.94	6.49	7.06	9.09
...									
8760	3.6	7.2	5.78	2.23	9.35	6.65	7.83	8.83	5.43

2. Ajustar un modelo de distribución Weibull de probabilidad a cada fila de la matriz anterior y realizar test de KS para verificar que el ajuste es óptimo.
3. Determinar el valor más probable de cada hora, con la ecuación 2.1.

Para esto, se utilizará el siguiente código

Código 3.1: Código a utilizar para el modelamiento de la distr. de Weibull a las velocidades del viento.

```
1 import pandas as pd
2 from reliability.Fitters import Fit_Weibull_2P
3 from reliability.Reliability_testing import KStest
4 dataNASA = pd.read_csv('data nasa 10m.csv', delimiter=';', usecols=['2013', '2014', '2015', '
    ↪ 2016', '2017', '2018', '2019', '2020', '2021'])
5 AdataNASA = dataNASA.loc[:,:].to_numpy()
6 alphaAdataNASA = []
7 betaAdataNASA = []
8 KStestAdataNASA = []
9 velprob = []
10
11 for i in range(len(AdataNASA)):
12     data = AdataNASA[i,:]
13     weibull_fit = Fit_Weibull_2P(failures=data,show_probability_plot=False,print_results=
    ↪ False)
14     alpha_horario = weibull_fit.alpha
15     beta_horario = weibull_fit.beta
16     KStest_horario =KStest(distribution=weibull_fit.distribution, data=data, print_results=
    ↪ False, show_plot=False)
17     KShipotesis_horario = KStest_horario.hypothesis
18     alphaAdataNASA.append(alpha_horario)
19     betaAdataNASA.append(beta_horario)
20     KStest_horario =KStest(distribution=weibull_fit.distribution, data=data, print_results=
    ↪ False, show_plot=False)
21     KShipotesis_horario = KStest_horario.hypothesis
22     KStestAdataNASA.append(KShipotesis_horario)
23
24 porcACCEPT = round(100*KStestAdataNASA.count('ACCEPT')/(len(AdataNASA)),3)
25 print('Porcentaje ACCEPT por KStest es de '+str(porcACCEPT)+'%')
```

Luego de determinar la base de datos a utilizar se debe calcular la constante de Hellman la cual permitirá obtener la velocidad del viento a cualquier altura [6].

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^a \quad (3.1)$$

Donde:

- $V_1$ : Velocidad a altura  $z_1$   $\left[\frac{m}{s}\right]$ .
- $V_2$ : Velocidad a altura  $z_2$   $\left[\frac{m}{s}\right]$ .
- $a$ : Exponente de Hellman.

$$a = 0.096 \ln z_0 + 0.016(\ln z_0)^2 + 0.24 \quad (3.2)$$

Donde:

- $a$ : Exponente de Hellman.

- $z_0$ : Longitud de la rugosidad superficial igual a 0.103 para zonas con hierba alta y cultivos bajos.

### 3.3. Envoltente térmica y medidas de EE

Para el cálculo de la envoltente térmica en su caso base, se utilizará la normativa chilena nCh 853 [13], utilizando la ecuación 3.6 para muros, techos y puertas. El techo se considerará como un techo totalmente ventilado, esto es debido a su mal estado, por lo que solo la parte inferior que limita la vivienda, será considerada en la envoltente térmica (quedan fuera las costaneras, tejado, parte superior de la cercha, entre otros).

Para las ventanas se utilizará la ecuación 2.3 debido a su característica de no homogeneidad al estar compuesta por un marco de aluminio y vidrio. Al ser los marcos un elemento complejo de calcular a través de la nCh 853, se utilizará el valor de U para el marco calculado en [31] considerando la ventana más económica de marco de aluminio (Categoría 1) utilizando un valor de U para el marco según su sección, considerando el caso más pesimista, se tiene el valor de  $11.060 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$ . para todas las secciones de la ventana, con excepción del traslapo que es de  $12.960 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$ .

Con base en este caso, se establecerá como meta para las medidas de eficiencia energética a implementar, los valores de U para la envoltente térmica de la “Propuesta de ANTEPROYECTO DE NORMA NTM 011/ 2014 de la actualización de la OGUC del Ministerio de Vivienda y Urbanismo” facilitado por la Agencia de Sostenibilidad Energética, en donde se tienen las metas según zona climática. Como se mencionó en Antecedentes, la PSR Alto Quilantahue pertenece a la zona climática E.

Tabla 3.2: Valores de U máximo para zona climática E.

Valor U máximo				$\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	
Piso	Muro	Techo	Puerta		Ventanas
0.6	0.5	0.33	1		3

### 3.4. Cargas térmica

En la presente memoria se calcularán las cargas térmicas de calefacción de forma estacionaria y horaria, estimando un funcionamiento de la calefacción durante las 24 horas de ser necesario. Se consideran las cargas térmicas asociadas a conducción y convección por la siguiente ecuación [12].

$$Q = U \cdot A \cdot (T_c - T_a) \quad (3.3)$$

Donde:

- $U$ : Transmitancia térmica del elemento  $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$ .
- $A$ : Área del elemento de la envoltente  $[m^2]$ .

- $T_c$ : Temperatura de confort[°C].
- $T_a$ : Temperatura ambiente[°C].

Para la ecuación 3.3 se utilizará como temperatura de confort  $T_c$  de 21°C y se establecen 6 renovaciones por hora de aire como óptimas [32].

Para el cálculo de las infiltraciones por aire, se utilizará la ecuación 2.4 considerando las renovaciones de aire igual a 9.2 [33]. Es importante mencionar que el estudio en que se analizó la hermeticidad de diferentes edificaciones a nivel nacional, para los inmuebles de materialidad ligera y de madera, como lo es la PSR Alto Quilantahue, se obtuvo un promedio de 9.2 renovaciones de aire por hora, sin embargo, los datos obtenidos presentan mucha dispersión y se tuvo como máximo 50 renovaciones de aire por hora en algunos casos.

Con esto se puede mencionar que el mejoramiento de las infiltraciones de aire en este tipo de inmuebles son fundamentales para bajar la carga térmica. Es por lo anterior que dentro de las medidas de eficiencia energética se deben integrar medidas orientadas a mejorar la hermeticidad de la PSR Alto Quilantahue.

### 3.5. Bomba de calor con colector horizontal cerrado

Se utilizará como sistema de calefacción geotérmico una bomba de calor con un sistema de colector horizontal cerrado, dado que el costo asociado y los trámites regulatorios correspondientes, son menores en comparación a un sistema vertical. La bomba de calor se dimensionará en función de la carga térmica máxima para cada caso, usando así el COP para los siguientes cálculos.

El sistema se estimará en base a una profundidad de 1.5 metros y una distancia entre tuberías de 0.6 metros de material HDPE [16].

La temperatura del suelo diaria y a una profundidad establecida, se calculará utilizando la ecuación formulada por Kusuda [18].

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot (\exp\left\{-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right\} \cdot \cos\frac{2\pi}{365}\left(t - t_o - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)) \quad (3.4)$$

Donde:

- $T(z, t)$ : Temperatura del suelo a una profundidad  $z$  día  $t$  [°C].
- $T_m$ : Temperatura promedio anual [°C].
- $A_s$ : Oscilación de la temperatura superficial, el cual es el promedio entre la temperatura ambiente mínima y la máxima del año [°C].
- $\alpha$ : Difusividad térmica del suelo  $\left[\frac{m^2}{dia}\right]$ .
- $t_o$ : desfase igual a 35 días [dias].

$$\alpha = \frac{k_g}{C_g} \quad (3.5)$$

Donde:

- $\alpha$ : Difusividad térmica del suelo  $\left[\frac{m^2}{dia}\right]$ .
- $k_g$ : Conductividad térmica  $\left[\frac{W}{mK}\right]$ .
- $C_g$ : Capacidad térmica volumétrica  $\left[\frac{MJ}{m^3K}\right]$ .

Luego, se deben considerar ciertos parámetros antes del cálculo del largo del colector con la ecuación 2.5. A continuación se definen las fórmulas y constantes a considerar.

Para la temperatura del colector  $T_{col}$  se estima como el valor máximo entre  $-7^\circ C$  y  $T_{geomín} - 8$ . [18]

Para la el factor de operación de calefacción  $F_{cal}$  se debe definir el gasto mensual del mes más frío del año en [KWh] y dividirlo en el gasto mensual máximo de la bomba de calor en [kWh] (La potencia nominal de la bomba de calor multiplicado por las horas que existen en el mes más frío).

$$R_s = \frac{1}{k_g} \quad (3.6)$$

Donde:

- $R_s$ : Resistencia térmica del suelo  $\left[\frac{mK}{W}\right]$ .
- $k_g$ : Conductividad térmica suelo  $\left[\frac{W}{mK}\right]$ .

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_{col}} \ln \frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}} \quad (3.7)$$

Donde:

- $R_s$ : Resistencia térmica de los tubos del colector  $\left[\frac{mK}{W}\right]$ .
- $k_{col}$ : Conductividad térmica tubería HDPE igual a  $0.4 \left[\frac{W}{mK}\right]$ .
- $\phi_{ext}$ : Diámetro externo tubería [m].
- $\phi_{int}$ : Diámetro interno tubería [m].

Lugo de calcular el largo del colector se analizará la factibilidad del área disponible versus el área que debe ocupar el colector.

### 3.6. Sistema de distribución de calefacción

Debido a las dimensiones y costos de los equipos de fancoils, corresponden al sistema de distribución que se utilizará. Se realizará un sistema simple donde se instalarán 5 fancoils distribuidos en: Sala de espera, Box Matrona, Farmacia, Comedor y Dormitorio.

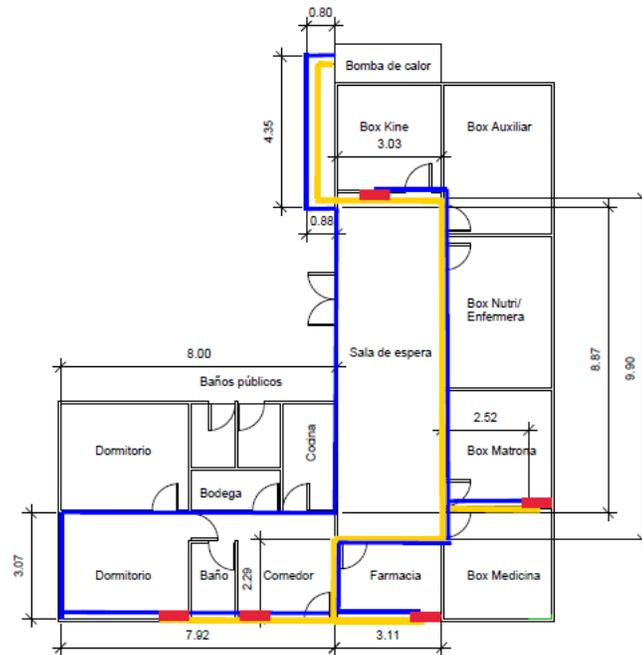


Figura 3.3: Distribución de fancoils en PSR Alto Quilantahue.

Por lo tanto, se tiene un largo de tubería aproximado de 86.4 metros. Esta tubería, al contener agua caliente, será de material CPVC.

### 3.7. Sistema hidráulico para el sistema de calefacción geotérmico

Se determinará, de forma simplificada, un sistema hidráulico para el colector y el sistema de distribución de calefacción por fancoils, que permita seleccionar bombas hidráulicas para cada uno y así calcular el gasto eléctrico asociado.

### 3.8. Producción eléctrica de un sistema de paneles fotovoltaicos

Se utilizará el método simplificado descrito en secciones anteriores, sin baterías y conectado directamente a la demanda eléctrica. Esto se realizará con base en paneles en serie de 0.5 kW de potencia, Marca Yangtze Solar. Se determinará la producción de energía AC y el área que utilizarán los paneles fotovoltaicos.

La cantidad de paneles fotovoltaicos se definirá en base al objetivo de cubrir la demanda eléctrica anual para cada caso. Además, los paneles fotovoltaicos no serán instalados en el techo de la PSR Alto Quilantahue debido a que no está en buen estado la infraestructura, por lo que serán instaladas sobre una estructura apartada de la PSR. La inclinación óptima se nota a continuación para longitudes menores a  $65^\circ$  [6]

$$\beta = 0.764L + 2.14^\circ \quad (3.8)$$

Donde:

- $\beta$ : grado de inclinación [*grados*].
- $L$ : Latitud [*grados*].

Tabla 3.3: Panel fotovoltaico base.

Modelo	YS500M-96
Marca	Yangtze solar
Eficiencia [%]	0.195
Dimensiones [mm]	1956 x 1310 x45
Potencia max [kW]	0.5
Peso [kg]	26.5
Número de celdas por panel	96
Vmp	48.8
Imp	10.33
Voc	58.08
Coef temp V [%/°C]	-0.29
Coef temp V [mV/°C]	-168.431
Isc	10.54
Coef temp I [%/°C]	0.04
Coef temp I [mA/°C]	4.216
Coef temp P [kW/°C]	-0.02

### 3.9. Producción eléctrica de un aerogenerador

Se seleccionarán aerogeneradores para cada caso y se calculará su generación de energía sobre la base de la curva de potencia de cada marca y modelo. La selección será exitosa si es que la producción anual del aerogenerador cubre la demanda eléctrica anual para cada caso. Finalmente, se calculará el espacio que ocupa dentro del terreno de a PSR Alto Quilantahue.

### 3.10. Evaluación económica

Para la evaluación económica se determinarán los precios de inversión y mantención. Para el caso de las medidas de EE se realizará, dentro de lo posible, una cotización de al menos tres proveedores para establecer un precio promedio. Para las energías renovables se establecen los siguientes precios.

Para los sistemas geotérmicos [34]

Tabla 3.4: Índice de precios para sistemas de calefacción geotérmico horizontales cerrados.

Ítem	Valores promedio	Descripción
G1 [\$/kWt] para BC entre 20 y 100 kWt	\$ 314,947	G1 costo bomba
G7 [% Costo total]	33%	G7 costo instalación bomba
G8 [\$/m <sup>2</sup> ] para circuitos mayores a 300 m <sup>2</sup>	\$ 24,543	G8 costo crear colector
G10 [\$/kWt] para BC entre 20 y 100 kWt	\$ 10,650	G10 costo mantenimiento bomba
E3 [\$/kWt] para FC mayores a 20 kWt	\$ 161,905	E3 costo instalación circuito fancoil

Para el sistema fotovoltaico [35]

Tabla 3.5: Precio proyectos fotovoltaicos llave en mano.

Rango de potencia [kWp]	Promedio
1 a 5	\$ 1,279,367
5 a 10	\$ 1,151,102
10 a 30	\$ 1,025,700
30 a 100	\$ 943,347
100 a 300	\$ 790,319

Para proyectos de energía eólica [36]

Tabla 3.6: Precio proyectos eólicos.

Costo inversión fija [US\$/kWp]	\$ 1,266.00
Mantenimiento anual (2%) [US\$/kWp]	\$ 25.32
Precio dólar 1 abril 2023	\$ 790.91
Costo inversión fija [CLP\$/kWp]	\$ 1,021,318
Mantenimiento anual (2%) [CLP\$/kWp]	\$ 20,026

Para los costos se considera una tasa de inflación del 6% calculada en base al IPC del año 2021, considerando un IPC en enero de 107.49 y en diciembre de 114.39.

Con el flujo de caja de cada caso, se calculará el VAN, la TIR y los años de retorno para realizar un análisis económico y fundamentar la viabilidad del proyecto, realizando finalmente un análisis de sensibilidad sobre el ingreso por generación fotovoltaica sobrante, en donde se variará el precio disminuyéndolo un 20% y 50%.

# Capítulo 4

## Resultados y análisis

### 4.1. Variables meteorológicas

#### 4.1.1. Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global (GHI)

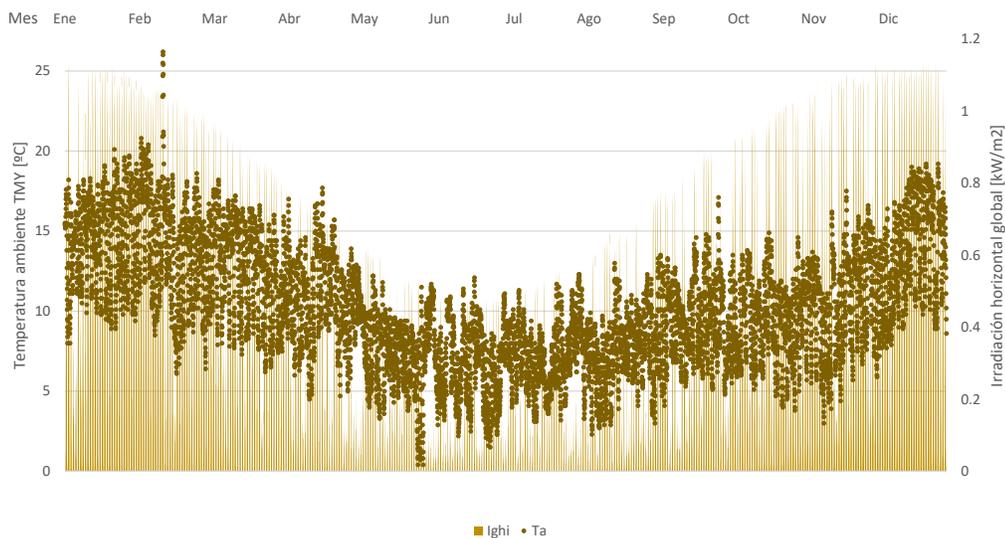


Figura 4.1: Temperatura ambiente e Irradiación horizontal global TMY.

Se observa en los datos obtenidos que durante todo el año pocas veces la PSR Alto Quilantahue llega o sobrepasa los  $21^{\circ}\text{C}$ , por lo que se debe considerar que la PSR Alto Quilantahue debe calefaccionarse la mayor parte del año. Su mínima es de  $0.4$  y su máxima es de  $26.2$  grados Celsius. Para la irradiación se observa que se concentra el recurso solar en los meses de octubre, septiembre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo (7 meses de 12). Lo que implica que los meses anteriormente podrán producir la mayor cantidad de energía a través de paneles fotovoltaicos, mientras que los meses restantes el recurso solar disminuye bastante.

### 4.1.2. Velocidad del viento a una altura determinada

Se realiza el modelamiento de la distribución de cada fila, de cada base de datos: Explorador eólico (1981-2017) y NASA (2013-2021) y se realiza el KStest para cada fila, obteniendo como resultado lo siguiente

Tabla 4.1: Resultados KStest.

Fuente	Altura	Porcentaje ACEEPT por KStest	Cantidad de rechazados
Explorador eólico	10m	99.989%	(1 REJECT)
	50m	99.909%	(8 REJECT)
NASA	10m	100%	(0 REJECT)
	50m	100%	(0 REJECT)

Para los datos de la NASA, se tiene que para los datos calculados anteriormente, se presenta una diferencia entre el promedio de los datos que va desde un 0% de diferencia a un 96% con respecto a la velocidad más probable calculada, confirmando la hipótesis de que el utilizar el promedio es muy poco representativo. En el caso en donde dista un 96% de la velocidad más probable y el promedio de los datos, se hace una prueba adicional para observar cuán bien modelada está la función de distribución de Weibull. Los resultados se muestran a continuación.

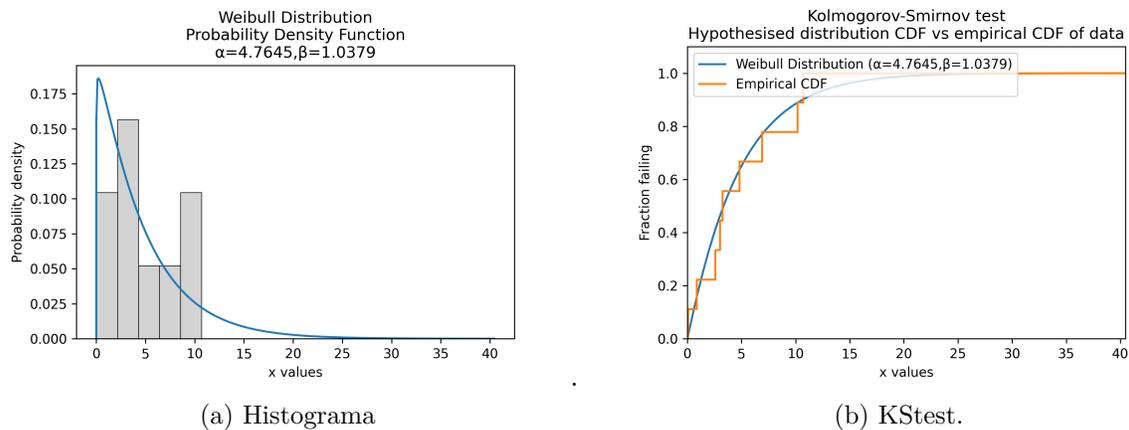


Figura 4.2: Visualización del modelamiento de la distribución de Weibull.

Se puede observar que, para los datos de la NASA, si realizamos una curva de tendencia polinómica de grado 6 para los 10 y 50 metros, se tiene que las velocidades están concentradas alrededor de los 5 y 8 [m/s]. Por otro lado, para los datos del explorador eólico, si realizamos el mismo procedimiento, se tiene que las velocidades están concentradas alrededor de los 3 y 7 [m/s].

Debido a que se tiene una mayor cantidad de datos (37 años vs 9 años) y se sitúa en un rango más conservador, se elige el set de datos del explorador eólico para 10m y 50m de altura sobre el suelo.

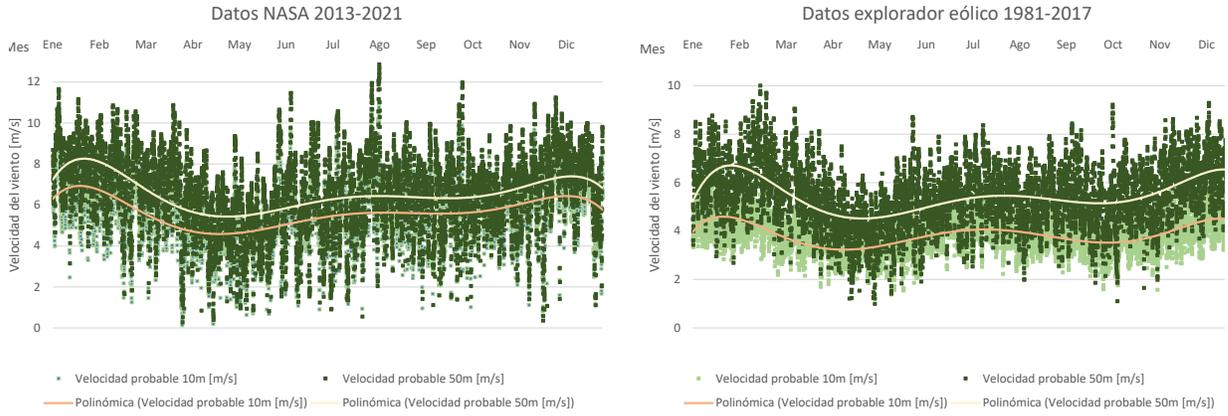


Figura 4.3: Comparativa bases de datos  $V_{mp}$ .

## 4.2. Envoltente térmica

### 4.2.1. Envoltente térmica caso BASE

#### 4.2.1.1. Piso

El piso es del tipo ventilado, por lo que se debe calcular según la nCh 853 [13] de la siguiente manera

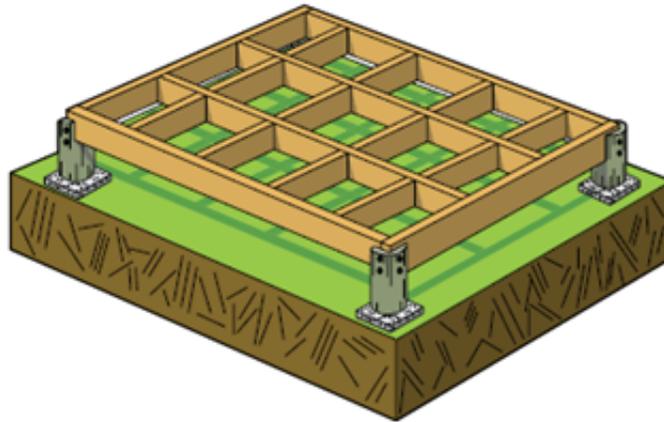


Figura 4.4: Piso ventilado con apoyos de cemento. A partir de [37]

$$\frac{1}{U_{pv}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{\alpha + 3 \cdot \frac{P}{A}} \quad (4.1)$$

Donde:

- $U_{pv}$ : Transmitancia térmica de piso ventilado  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ .
- $U$ : Transmitancia térmica de piso  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ .
- $P$ : Perímetro  $[m]$ .
- $A$ : Área en planta  $[m^2]$ .
- $\alpha$ : Coeficiente igual a 1.6 para pisos ventilados.

Siguiendo las indicaciones de [38], el piso estará compuesto por vigas estructurales con apoyos de cemento y una plancha de OSB de 20 mm. Se establece como la separación entre apoyos de cemento y cadenetras de hasta 60 cm, si se utilizan vigas de 2x6 pulgadas, se tiene la siguiente distribución

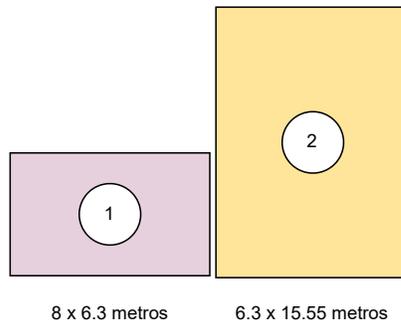


Figura 4.5: Áreas piso ventilado.

1. Para el sector uno, se tiene un espaciamiento de 0.557 m en el largo, utilizando 13 vigas estructurales, para el ancho se tiene un espaciamiento de 0.587, utilizando 10 vigas. Esto da un área total de  $14.768 m^2$  en que se tiene presencia de estas vigas.
2. Para el sector dos se tiene un espaciamiento de 0.598 m en el largo, utilizando 10 vigas estructurales, para el ancho se tiene un espaciamiento de 0.516, utilizando 26 vigas. Esto da un total en donde un área de  $29.807 m^2$  en que se tiene presencia de estas vigas.

Finalmente, se tiene un área total de  $44.575 m^2$  de  $148.365 m^2$  que tiene presencia de vigas estructurales.

Sobre las vigas estructurales y la plancha OSB, va el piso final que consta de entablado de madera de 1 cm de ancho de pino insigne. A continuación se calcula su valor  $U \frac{W}{m^2C}$  respectivo utilizando las ecuaciones 2.2 y 2.3.

Tabla 4.2: Valor de U para piso ventilado caso BASE.

1.- PISO				
PISO- ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
VIGA ESTRUCTURAL PINO BRUTO 2 x 6'	0.1524	410	0.104	1.465
PLANCHA OSB	0.02	800	0.15	0.133
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.22
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>2.271</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.440</b>
PISO - ZONA SIN VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
PLANCHA OSB	0.02	800	0.15	0.133
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.22
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>0.806</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>1.241</b>
PISO - TOTAL				
Tipo Piso	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
PISO - VIGA	0.440	44.575	19.627	
PISO - SIN VIGA	1.241	103.790	128.817	
	ÁREA TOTAL	148.365		
			<b>VALOR U [W/m2C°]</b>	<b>1.001</b>

#### 4.2.1.2. Muros

Para los muros se utilizan las indicaciones de [37], considerando una altura de 2.4 metros y utilizando vigas de 2x4 pulgadas, se deben establecer pies derechos a no más de 60 cm de separación, con una cadeneta cortafuego central y muchachos o puntales para las ventanas y puertas. De esta forma se tiene la siguiente distribución.

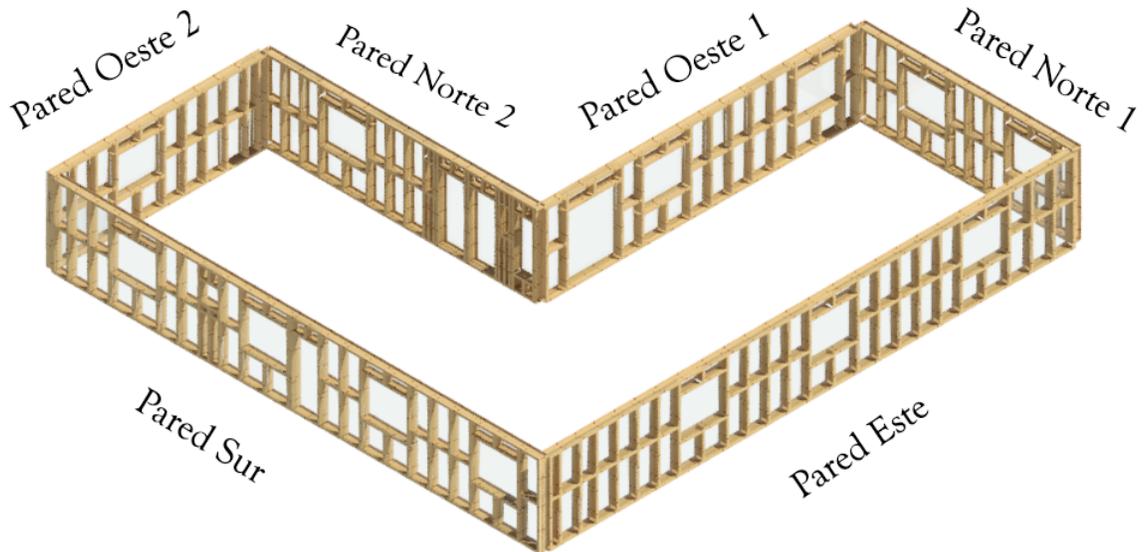


Figura 4.6: Entramado muros de madera PSR Alto Quilantahue.

En donde finalmente se tiene un área de  $16.54 \text{ m}^2$  de  $110.31 \text{ m}^2$  en que se encuentran vigas estructurales. Además de las vigas se tiene una composición, desde el exterior al interior, por: plancha Zinc, plancha OSB, viga estructural, plancha OSB y entablado de 1 cm de espesor. Existe un espacio de aire en los espacios en que no hay vigas estructurales, pero no se considerará ese espacio como estanco, debido a las malas condiciones del inmueble. A continuación se calcula su valor  $U \frac{W}{m^2C^\circ}$  respectivo utilizando las ecuaciones 2.2 y 2.3.

Tabla 4.3: Valor de U para muros caso BASE.

2.- PAREDES				
MUROS - ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mCº]	RESISTENCIA [m2Cº/W]
PLANCHA ZINC 5V	0.003	7130	112	0.00003
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
VIGA PINO CEPILLADO 2 x 4'	0.09	410	0.104	0.865
PLANCHA OSB	0.0111	400	0.15	0.074
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2Cº/W]</b>				<b>1.280</b>
<b>VALOR U [W/m2Cº]</b>				<b>0.782</b>
MUROS - ZONA SIN VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mCº]	RESISTENCIA [m2Cº/W]
PLANCHA ZINC 5V	0.003	7130	112	0.00003
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2Cº/W]</b>				<b>0.414</b>
<b>VALOR U [W/m2Cº]</b>				<b>2.414</b>
MUROS - TOTAL				
Tipo Pared	Valor U [W/m2Cº]	Área [m2]	U*A	
PARED - VIGA	0.782	16.54	12.924	
PARED - SIN VIGA	2.414	93.77	226.397	
	ÁREA TOTAL	110.31		
			<b>VALOR U<sub>prom</sub> [W/m2Cº]</b>	<b>2.170</b>

#### 4.2.1.3. Techo

Para el techo se observa un techo con cerchas, es por esto que se siguen las indicaciones de [39], en donde se consideran dentro de la envolvente térmica solo la parte inferior, que contempla la estructura inferior de la cercha con vigas de 2x5 pulgadas, encintado de 2x2 pulgadas, plancha OSB y la terminación del techo con lo mismo que las paredes y suelo, un entablado en pino. El folleto establece que la separación de las cerchas debe de ser de hasta 1 metro y del encintado cada 40 cm. Por tanto, existen tres tipos de zona de techo: zona viga, zona sin viga con encintado y zona sin viga y sin encintado



Figura 4.7: Estructura básica de un techo con cerchas [39].

Tabla 4.4: Valor de U para techo caso BASE.

3.- TECHO				
TECHO - ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
VIGA ESTRUCTURAL PINO BRUTO 2 x 6'	0.1524	410	0.104	1.465
ENCINTADO MSD CEPILLADO 2 x 2'	0.0508	410	0.104	0.488
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>2.270</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.441</b>
TECHO - ZONA SIN VIGA CON ENCINTADO				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
ENCINTADO	0.0508	410	0.104	0.488
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>0.805</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>1.243</b>
TECHO - ZONA SIN VIGA SIN ENCINTADO				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>0.316</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>3.163</b>
TECHO - TOTAL				
Tipo Suelo	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
TECHO - VIGA	0.441	5.89	2.595	
TECHO - SIN VIGA CON ENCINTADO	1.243	17.24	21.426	
TECHO - SIN VIGA SIN ENCINTADO	3.163	125.235	396.120	
	ÁREA TOTAL	148.365		
			VALOR U <sub>prom</sub> [W/m2C°]	<b>2.832</b>

#### 4.2.1.4. Puertas

Se considera una puerta de pino maciza, para la puerta principal se establece como si existieran dos puertas unidas de este tipo. Se tienen 5 puertas en total de las mismas características.

Tabla 4.5: Valor de U para puertas caso BASE.

4.- PUERTA				
PUERTA - MADERA MACIZA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Pino insigne	0.045	410	0.104	0.433
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>0.603</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>1.659</b>

#### 4.2.1.5. Ventanas

Se establece que existen ventanas de 4 tipos, todas de marco de aluminio y con vidrio simple.

Tabla 4.6: Tipos de ventanas y sus medidas en metros

Ventana tipo I	Ventana tipo II	Ventana tipo III	Ventana tipo IV
1.4 x 1.2	0.6 x 0.6	0.6 x 1.2	0.3 x 0.8

Para el cálculo del valor U de las ventanas, se separa en el área de marco y el área de vidrio. Para determinar estas áreas, se encuentra información sobre las medidas de una

ventana comercial, por lo que es posible calcular sus áreas dependiendo de las dimensiones de cada una. Con lo establecido en Antecedentes es posible calcular el valor U para cada tipo de ventanas.

Tabla 4.7: Áreas elementos ventanas según tipo en metros.

ÁREA	ANCHO	ALTO	Área vidrio	Área marco	Área solapa
TIPO I	0.658	1.107	1.456812	0.247	0.051
TIPO II	0.258	0.507	0.261612	0.205	0.051
TIPO III	0.258	1.107	0.571212	0.214	0.051
TIPO VI	0.108	0.707	0.152712	0.196	0.051

Tabla 4.8: Valor de U para ventanas caso BASE.

VENTANA TIPO I				
VENTANA TIPO I - TOTAL				
Elemento ventana	Valor U [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	U*A	% ÁREA
MARCO	7.370	0.29855	2.200	17%
VIDRIO	5.747	1.456812	8.372	83%
	ÁREA TOTAL	1.755362		
VALOR U <sub>prom</sub> [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]				<b>6.023</b>
VENTANA TIPO II				
VENTANA TIPO II - TOTAL				
Elemento ventana	Valor U [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	U*A	% ÁREA
MARCO	7.370	0.25615	1.888	49%
VIDRIO	5.747	0.261612	1.504	51%
	ÁREA TOTAL	0.517762		
VALOR U <sub>prom</sub> [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]				<b>6.550</b>
VENTANA TIPO III				
VENTANA TIPO III - TOTAL				
Elemento ventana	Valor U [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	U*A	% ÁREA
MARCO	7.370	0.26575	1.959	32%
VIDRIO	5.747	0.571212	3.283	68%
	ÁREA TOTAL	0.836962		
VALOR U <sub>prom</sub> [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]				<b>6.262</b>
VENTANA TIPO IV				
VENTANA TIPO IV - TOTAL				
Elemento ventana	Valor U [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	U*A	% ÁREA
MARCO	7.370	0.24705	1.821	62%
VIDRIO	5.747	0.152712	0.878	38%
	ÁREA TOTAL	0.399762		
VALOR U <sub>prom</sub> [W/m <sup>2</sup> C <sup>o</sup> ]				<b>6.750</b>

#### 4.2.1.6. Resumen envolvente térmica caso BASE

Tabla 4.9: Áreas correspondientes a la envolvente térmica

	Pared 1 [m]	Pared 2 [m]	Total [m]	Alto [m]	Superficie [m <sup>2</sup> ]
Pared norte	6.3	8	14.3	2.4	34.32
Pared sur	14.3	-	14.3	2.4	34.32
Pared este	15.55	-	15.55	2.4	37.32
Pared oeste	9.25	6.3	15.55	2.4	37.32
TOTAL					143.28
TOTAL SUPERFICIE EFECTIVO PAREDES					110.306

Tabla 4.10: Áreas correspondientes a la envolvente térmica. Continuación.

	# Puerta	# Ventana tipo I	# Ventana tipo II	# Ventana tipo III	# Ventana tipo IV	Área puertas [m <sup>2</sup> ]	Área ventanas [m <sup>2</sup> ]
Pared norte	2	3	0	1	2	3.2	6.90
Pared sur	1	4	1	0	0	1.6	7.54
Pared este	0	3	0	0	0	0	5.27
Pared oeste	2	3	0	0	0	3.2	5.27
TOTAL	5	13	1	1	2	8	24.97

Tabla 4.11: Valor UA caso BASE.

CASO BASE	Suelo	Paredes	Techo	Puertas 0,8 x 2	Ventana tipo I 1,4 x 1,2	Ventana tipo II 0,6 x 0,6	Ventana tipo III 0,6 x 1,2	Ventana tipo IV 0,3 x 0,8
Área total [m <sup>2</sup> ]	148.365	110.306	148.365	8.0	22.820	0.518	0.837	0.800
U [W/m <sup>2</sup> C°]	1.001	2.170	2.832	1.659	6.023	6.550	6.262	6.750
U*A [W/C°]	148.444	239.320	420.142	13.274	137.446	3.391	5.241	5.397
<b>U*A total CASO BASE [W/C°]</b>	972.655							

Es posible observar que el elemento en donde mayormente escapa el calor es a través del techo con un valor de U\*A de 420.142, muy por encima de cualquier otro elemento, es por esto, que es un elemento que debe tenerse mayor consideración al aplicar las medidas de eficiencia energética.

#### 4.2.2. Envolvente térmica caso con medidas de EE

Dentro del programa de Plan de Descontaminación de algunas ciudades, se proponen soluciones constructivas, que corresponden a medidas de eficiencia energética (EE) que tienen como objetivo mejorar la envolvente térmica. Una de ellas es el PDA de la ciudad de Coyhaique en la región de Aysén [40]. A continuación, se toman estas soluciones y se adaptan para cumplir los valores de U establecidos en la Tabla 3.2.

##### 4.2.2.1. Piso

La medida de eficiencia energética implementada consiste en rellenar los espacios entre las vigas estructurales con poliestireno expandido de densidad 10 kg/m<sup>3</sup>, una capa de fieltro

para evitar la entrada de humedad y aire no deseado además de una capa fibrocemento de 6 mm que sirva de cubierta.

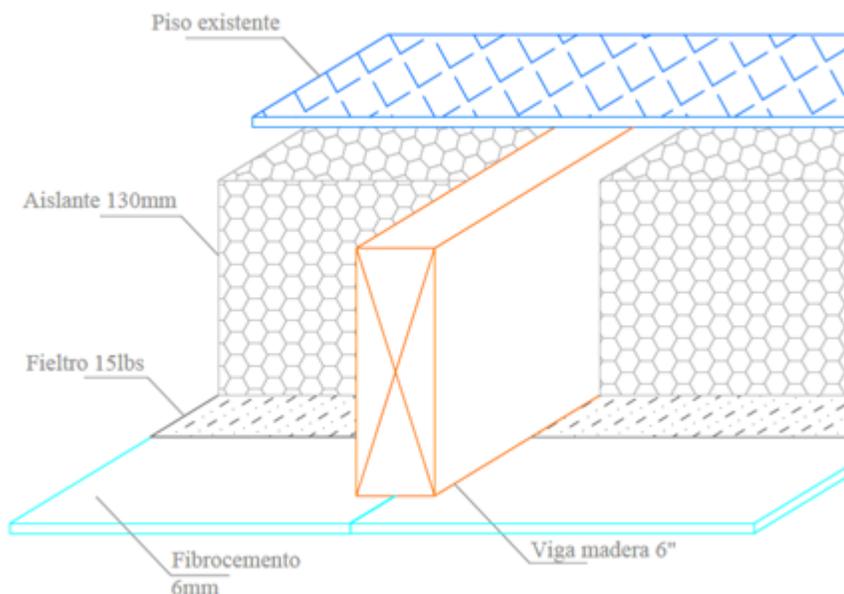


Figura 4.8: Solución constructiva PDA piso ventilado [40]

Tabla 4.12: Valor de U para piso ventilado caso con EE.

1.- SUELO				
SUELO - ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Fibrocemento 6 mm	0.006	-	0.24	0.025
Filtro 15 lbs	0.001	30	-	0.000
VIGA ESTRUCTURAL PINO BRUTO 2 x 6'	0.1524	410	0.104	1.465
PLANCHA OSB	0.02	800	0.15	0.133
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.22
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>2.296</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.436</b>
SUELO - ZONA SIN VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Fibrocemento 6 mm	0.006	-	0.24	0.025
Filtro 15 lbs	0.001	30	-	0.000
Poliestireno expandido	0.04	10	0.043	0.930
PLANCHA OSB	0.02	800	0.15	0.133
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.22
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>1.761</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.568</b>
SUELO - TOTAL				
Tipo Suelo	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
SUELO - VIGA	0.436	44.575	19.413	
SUELO - SIN VIGA	0.568	103.79	58.940	
	ÁREA TOTAL	148.365		
			<b>VALOR U<sub>prom</sub> [W/m2C°]</b>	<b>0.528</b>

#### 4.2.2.2. Muros

La solución constructiva escogida es la de rellenar la paredes con poliestireno expandido de densidad  $10 \frac{kg}{m^3}$ .



Figura 4.9: Solución constructiva PDA muro [40]

Tabla 4.13: Valor de U para muros caso con EE.

2.- PAREDES				
PAREDES - ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
PLANCHA ZINC 5V	0.003	7130	112	0.00003
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
VIGA PINO CEPILLADO 2 x 4'	0.09	410	0.104	0.865
PLANCHA OSB	0.0111	400	0.15	0.074
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>1.280</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.782</b>
PAREDES - ZONA SIN VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
PLANCHA ZINC 5V	0.003	7130	112	0.00003
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
Poliestireno expandido	0.09	10	0.043	2.093
PLANCHA OSB	0.0111	800	0.15	0.074
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>2.507</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.399</b>
PAREDES - TOTAL				
Tipo Pared	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
PARED - VIGA	0.782	16.54	12.924	
PARED - SIN VIGA	0.399	93.77	37.400	
	ÁREA TOTAL	110.31		
			<b>VALOR U<sub>prom</sub> [W/m2C°]</b>	<b>0.456</b>

#### 4.2.2.3. Techo

La solución constructiva escogida es la de rellenar el techo con lana mineral de densidad  $100 \frac{kg}{m^3}$ .

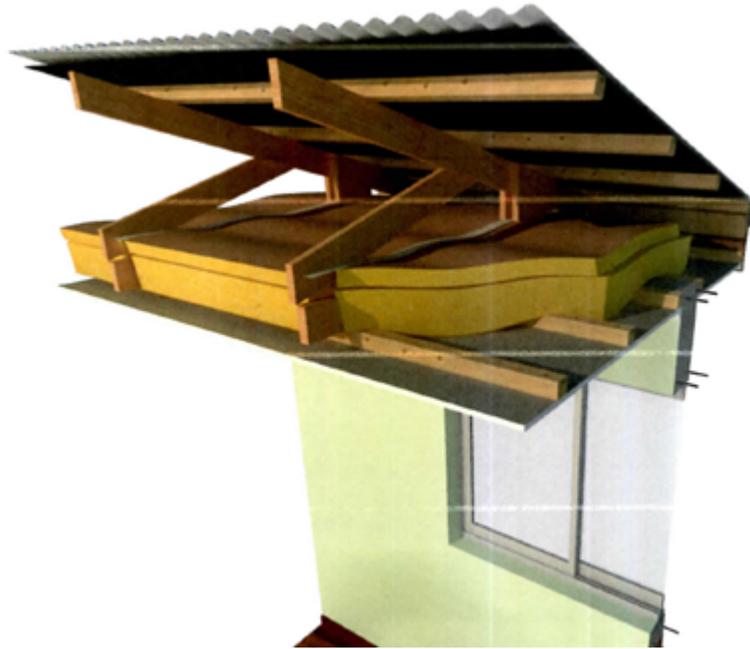


Figura 4.10: Solución constructiva PDA techo [40]

Tabla 4.14: Valor de U para techo caso con EE.

3.- TECHO				
TECHO - ZONA VIGA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
VIGA ESTRUCTURAL PINO BRUTO 2 x 6'	0.1524	410	0.104	1.465
ENCINTADO MSD CEPILLADO 2 x 2'	0.0508	410	0.104	0.488
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>2.270</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.441</b>
TECHO - ZONA SIN VIGA CON ENCINTADO				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Lana mineral	0.14	100	0.041	3.415
ENCINTADO	0.0508	410	0.104	0.488
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>4.219</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.237</b>
TECHO - ZONA SIN VIGA SIN ENCINTADO				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Lana mineral	0.14	100	0.041	3.415
PLANCHA OSB	0.012	800	0.15	0.080
ENTABLADO PINO INSIGNE	0.01	410	0.104	0.096
RSI + RSE				0.14
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>3.731</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.268</b>
3.- TECHO - TOTAL				
Tipo Suelo	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
TECHO - VIGA	0.441	5.89	2.595	
TECHO - SIN VIGA CON ENCINTADO	0.237	17.24	4.086	
TECHO - SIN VIGA SIN ENCINTADO	0.268	125.235	33.568	
ÁREA TOTAL		148.365		
			<b>VALOR Uprom [W/m2C°]</b>	<b>0.271</b>

#### 4.2.2.4. Puertas

Se elige cambiar la puerta por una de contraplacada de HDF (tablero aglomerado), con un marco compuesto de pino y rellena de poliestireno expandido de densidad de  $15 \frac{kg}{m^3}$  [41]

Tabla 4.15: Valor de U para puerta caso con EE.

4.- PUERTA				
4.- PUERTA - ZONA MARCO				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Tablero aglomerado	0.003	930	0.26	0.012
Pino cepillado 1x2'	0.041	410	0.104	0.394
Tablero aglomerado	0.003	930	0.26	0.012
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>0.587</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>1.703</b>
4.- PUERTA - ZONA ALMA				
MATERIAL	ESPESOR ( m)	DENSIDAD (Kg/m3)	CONDUCTIVIDAD [W/mC°]	RESISTENCIA [m2C°/W]
Tablero aglomerado	0.003	930	0.26	0.012
Poliestireno expandido	0.041	15	0.0413	0.993
Tablero aglomerado	0.003	930	0.26	0.012
RSI + RSE				0.17
<b>RESISTENCIA TOTAL [m2C°/W]</b>				<b>1.186</b>
<b>VALOR U [W/m2C°]</b>				<b>0.843</b>
4.- PUERTA - TOTAL				
Tipo Pared	Valor U [W/m2C°]	Área [m2]	U*A	
PUERTA - MARCO	1.703	0.136	0.232	
PUERTA - ALMA	0.843	1.464	1.234	
	ÁREA TOTAL	1.6		
			<b>VALOR U<sub>prom</sub> [W/m2C°]</b>	<b>0.916</b>

#### 4.2.2.5. Ventanas

El recambio de ventanas se basa bajo la solución constructiva Ventana 3.1.V.A.7 [40] Ventana de abatir de PVC, que consta de: Ventana de PVC, Abatir, dimensiones 1.5 m de ancho x 1.1 m de alto. Dos hojas de 0.75 x 1.1 m cada una, una fija y otra de abatir. Cristal DVH 3-8-3. Separador de espuma no metálico. Cierre tipo manilla de parche unipunto. Refuerzo de acero zincado en todos los perfiles base de 1.5 mm. de espesor. Burlete perimetral de PVC enriquecido con caucho, tipo 52-053P, flexible, anti hongos y resistentes a los rayos ultravioleta, dureza shore A 60+-2 ASTM D2240.

En el documento de la solución se presenta el valor U global de la ventana igual a 3. Para el ejercicio de esta memoria de título, se asumirá que es posible aplicar este mismo U global considerando los diferentes tipos de ventanas con diferentes áreas.

#### 4.2.2.6. Resumen envolvente térmica caso con EE

Tabla 4.16: Valor U\*A caso con EE.

CASO CON EE	Suelo	Paredes	Techo	Puertas 0,8 x 2	Ventana tipo I 1,4 x 1,2	Ventana tipo II 0,6 x 0,6	Ventana tipo III 0,6 x 1,2	Ventana tipo IV 0,3 x 0,8
Área total [m2]	148.365	110.306	148.365	8	22.820	0.518	0.837	0.800
U [W/m2C°]	0.528	0.456	0.271	0.916	3.000	3.000	3.000	3.000
U*A [W/C°]	78.353	50.324	40.249	7.332	68.459	1.553	2.511	2.399
<b>U*A total CASO con EE [W/C°]</b>	251.179							

#### 4.2.2.7. Costos medidas de eficiencia energética (EE)

Se realiza las cotizaciones a través de páginas web sobre los materiales y elementos constructivos. Idealmente, se realizan 3 cotizaciones para cada material o elemento.

Tabla 4.17: Costos asociados a las medidas de eficiencia energética.

Elemento	Precio
Suelo	\$ 1,133,486
Pared	\$ 376,108
Techo	\$ 8,172,188
Puertas	\$ 40,303
Ventanas	\$ 3,360,523
Cornisa poliestireno	\$ 62,700
SubTotal	\$ 13,145,308
Instalación (30 % del costo)	\$ 3,943,592
<b>Total</b>	<b>\$ 17,088,900</b>

### 4.2.3. Comparativa caso BASE y con EE.

Tabla 4.18: Comparativa valores U y U\*A caso BASE y con EE.

U [W/m <sup>2</sup> C°]	Suelo	Paredes	Techo	Puertas	Ventana tipo I	Ventana tipo II	Ventana tipo III	Ventana tipo IV	U*A TOTAL [W/C°]
Área total [m <sup>2</sup> ]	148.365	110.306	148.365	8	22.820	0.518	0.837	0.8	-
Caso base	1.001	2.170	2.832	1.659	6.023	6.550	6.262	6.750	972.655
Con EE	0.528	0.456	0.271	0.916	3.487	3.000	3.000	3.000	251.179
Dif% cr CASO BASE	47 %	79 %	90 %	45 %	42 %	54 %	52 %	56 %	74 %

## 4.3. Cargas térmica y demanda eléctrica de consumo base

### 4.3.1. Infiltraciones de aire

Para mejorar esta situación, se debe conocer que, en [33] se realiza un estudio para una casa de estructura liviana, en donde se determina que por las ventanas se infiltra un 0.2 % de aire, por la puerta un 4 % y el encuentro muro cielo se infiltra un 11 % de aire. Es por esto que se propone, dentro de las medidas de eficiencia energética, el sellado de encuentro muro-cielo.

Para el recambio de puertas se consideran las siguientes medidas con el fin de reducir en un 74 % la infiltración por la puerta. Luego de la revisión bibliográfica es posible determinar que al modificar una ventana de marco de aluminio por una de PVC se reduce en un 39 % la infiltración. Finalmente, al sellar el encuentro muro-cielo, se reduce en un 100 % la infiltración asociada a ese elemento. Por tanto, si se aplican estas medidas al caso con EE, se tiene la siguiente reducción de renovaciones de aire por hora.

Tabla 4.19: Reducción de infiltración caso con EE.

Elemento	Representación %	Infiltraciones de aire caso BASE [ren/h]	Disminución porcentual caso con EE	Disminución de infiltración de aire por elemento [ren/h]
Puertas	0.04	0.368	0.74	0.272
Ventanas	0.02	0.018	0.39	0.007
Encuentro muro cielo	0.11	1.012	1	1.012
Total reducción [ren/h]				1.2

Por lo que las infiltraciones de aire quedan determinadas por: En caso BASE se tienen 9.2 ren/h, mientras que en el caso con EE se tienen 8 ren/h. Para finalizar, la solución constructiva que se utilizará para sellar el encuentro muro-cielo será una moldura de poliestireno expandido con adhesivo.

### 4.3.2. Cargas térmicas

A continuación se presentan las cargas térmicas totales para el caso BASE y con EE, para luego analizar el aporte por infiltraciones de aire versus las cargas por envolvente térmica.

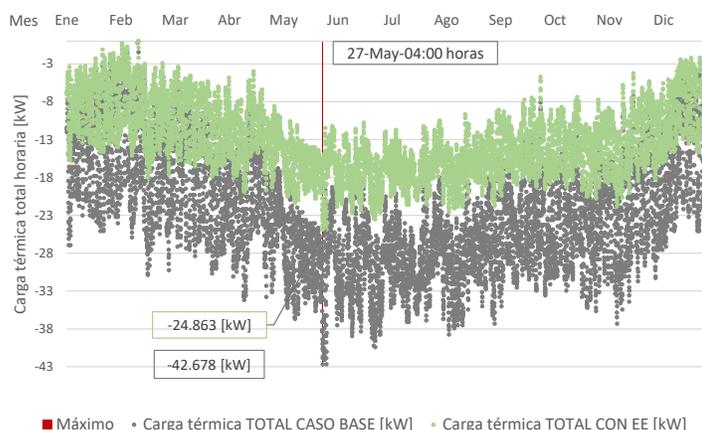


Figura 4.11: Carga térmica total para caso BASE y caso con EE.

Se observa que el día en que mayor es la carga térmica de calefacción es el día 27 de mayo a las 4 am, en donde se tienen 42.678 y 24.863 kW de carga de calefacción respectivamente, constituyendo un 42 % de disminución correspondiente a las medidas de eficiencia energética.

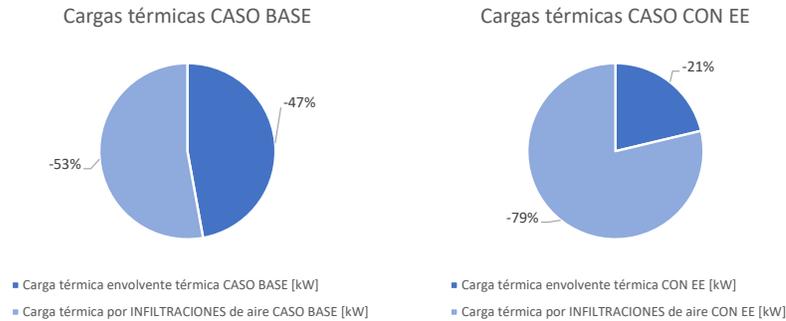


Figura 4.12: Aporte a las cargas térmicas totales: Infiltración vs Envolverte térmica.

Se observa que en general, las infiltraciones de aire constituyen más del 50% de aporte a las cargas térmicas totales, en específico para el caso con EE toma mayor importancia el tratamiento de las infiltraciones de aire, al aportar un 79% dentro de las cargas térmicas.

Se puede determinar que para este tipo de inmueble, se tiene una carga térmica para el caso BASE de 0.29 kW por metro cuadrado, mientras que para el caso con medidas de EE, se tiene una carga térmica de 0.17 kW por metro cuadrado.

Debido a que la Ecuación 3.3 involucra el área de forma lineal, al mantener las mismas medidas de todos los elementos del inmueble y las condiciones climáticas, es posible aplicar los valores anteriores a todo inmueble similar del sector, multiplicándolo por el área.

En cuanto a la variación de las condiciones climáticas, estas cambian radicalmente tanto la temperatura ambiente como las variables meteorológicas, por lo que no es posible determinar una relación matemática debido a la variabilidad de cada caso, las cuales determinan en gran parte las cargas térmicas.

Un valor que puede utilizarse en otros lugares climáticos, manteniendo el mismo tipo de infraestructura y materialidad, es el valor U y U\*A de cada elemento, en donde se observa en la Tabla 4.18 los valores correspondientes para el caso BASE y para el caso con medidas de EE.

### 4.3.3. Demanda eléctrica de consumo base

Para estimar la demanda eléctrica base, se determina a partir de la información enviada por la PSR Alto Quilantahue de los dispositivos eléctricos utilizados en el lugar, la potencia y horas de uso estimadas para cada uno, dando el siguiente total.

Tabla 4.20: Consumo eléctrico PSR Alto Quilantahue.

Nombre	Cantidad en existencias	Horas de uso	Potencia [W]	Consumo [Wh]
Equipo Radiocomunicacion	1	9	25	225
Electrobomba 0,5 HP	1	2	375	750
Sistema de camaras	1	24	40	960
TV 32"	1	9	48	432
TV 32"	1	9	48	432
UPS	1	0.5	900	450
Impresora	1	2	19	38
Torre de PC	1	9	0	0
PC	1	9	180	1620
Lámpara calor roja	1	1	250	250
Refrigerador domestico	1	24	0.023	0.543
		diario [kWh/día]	1885.023	5.16
		mensual [kWh/mes]	-	154.726
		anual [kWh/año]	-	1882.503

Se debe tener en cuenta que la Potencia W máxima será de 1,885.023 W y el gasto diario será de 5.16 kWh/día, teniendo un gasto por hora en un día (dividiendo por 24 horas) de 0.215 kWh.

## 4.4. Sistema de calefacción geotérmica

### 4.4.1. Bomba de calor

En primer lugar, se establecieron anteriormente las cargas térmicas máximas, las que equivaldrán a la potencia máxima térmica de las bombas de calor a seleccionar. Para el caso BASE se estableció una carga térmica de 43 kW y para el caso con EE de 25 kW aproximadamente. Se escogen entonces las siguientes bombas de calor para los casos respectivos.



Figura 4.13: Bomba de calor ECOFOREST [42] .

Para el caso BASE se tienen el funcionamiento de dos bombas de calor ecoGEO+ 5-22 en

cascada, alcanzando una potencia máxima de 44 kW, con un COP de calefacción de 4.6 [42]. Mientras que para el caso base se tienen dos combas de calor ecoGEO+ 3-12 en cascada, alcanzando una potencia máxima de 24 kW y un COP de calefacción de 4.9 [43].

El gasto eléctrico de las bombas de calor depende de la diferencia de entrada del colector y la temperatura de salida de agua caliente del sistema de distribución fancoil.

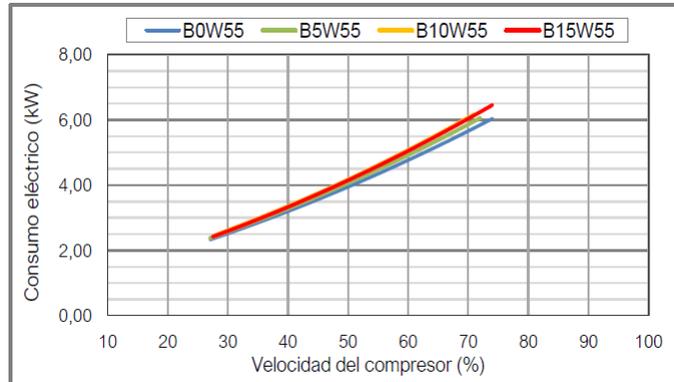


Figura 4.14: Curva gasto eléctrico de la Bomba de calor (BC) para caso BASE.[42]

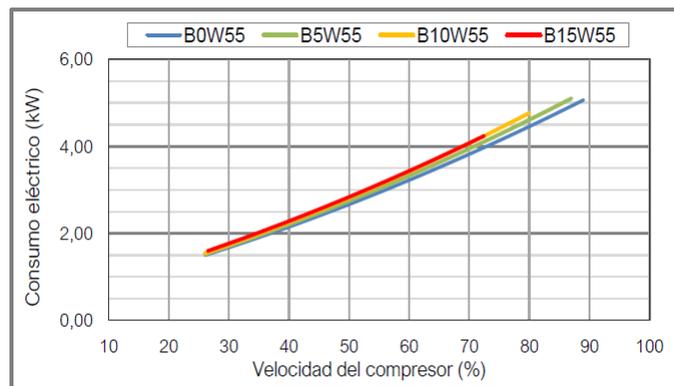


Figura 4.15: Curva gasto eléctrico de la Bomba de calor (BC) para caso con EE.[43]

Por tanto, se tiene que el mínimo de funcionamiento para las bombas es de:

Tabla 4.21: Potencia de funcionamiento mínimo Bombas de calor (BC).

	Tcol menor o igual a [°C]	Potencia BC mínima [kW]
Caso BASE	5	6.5
	10	7.5
	15	8.5
Caso con EE	5	4
	10	4.5
	15	5.2

#### 4.4.2. Fluidos de trabajo y caudales

Se observa anteriormente que las temperaturas en el sector de Alto Quilantahue pueden llegar a los 0°C, lo que implica un peligro de congelación para el colector geotérmico, es por esto que se establece como fluido de trabajo agua con un 20% de etilenglicol. Mientras que para el sistema de fancoils, se define como fluido de trabajo agua a 55°C. Las características de cada fluido utilizado se detallan a continuación:

Tabla 4.22: Características físicas de los fluidos de trabajo.

Cp Agua + etilenglicol 20% [J/kg C°]	3,918
Densidad Agua + etilenglicol [kg/m3]	1,036
Viscosidad dinámica [Poise]	0.003
Cp Agua a 55°C [J/kg C°]	4,183
Densidad Agua a 55°C [kg/m3]	985.7

Para establecer los caudales, pérdidas de carga y número de Reynolds, se utilizan las fórmulas anteriormente expuestas en la sección de Antecedentes. Se tiene  $\Delta T_{FC} = 5.1^\circ\text{C}$  suponiendo un sistema fancoil de 5.2 kW de potencia y 894 litros por hora de agua a 55°C;  $T_{in} = 7.2$ ,  $T_{out} = 13.93$  para el caso BASE y 14°C con EE. Se establecen los valores de partida para el colector geotérmico de las siguientes medidas de tuberías.

Tabla 4.23: Diámetros escogidos para colector geotérmico para caso BASE y con EE.

	D interior[m]	D exterior[m]	Clasificación
Geotermia caso BASE	0.0444	0.05	PN16
Geotermia caso con EE	0.0355	0.04	PN16

Tabla 4.24: Resultados para caudal, Reynolds y pérdida de carga por metro de tubería del colector geotérmico.

D interior caso BASE [m]	0.044
D interior caso con EE [m]	0.036
Caudal caso BASE [m <sup>3</sup> /s]	0.0012
Caudal caso con EE [m <sup>3</sup> /s]	0.0007
Reynolds BASE	12,146.120
Reynolds con EE	8,930.704
Velocidad caso BASE [m/s]	0.792
Velocidad caso con EE [m/s]	0.728
Pérdidas de carga caso BASE [mca/m]	0.019
Pérdidas de carga con EE [mca/m]	0.021

Los valores son aceptables para el tipo de tubería que se seleccionó, de todas formas se realiza una prueba para todas las potencias horarias y, por tanto, caudales que se necesitarán durante todo el año. En esta prueba se tiene que el criterio de número de Reynolds mayor a 2,300, se cumple para el caso BASE y con EE respectivamente en un 98 % y un 92 %. Mientras que el criterio de hasta 3 mca por cada 100 metros de tubería se cumple en ambos casos en un 100 %, por lo que las tuberías para el colector geotérmico son aprobadas.

#### 4.4.3. Colector geotérmico

Se establece la temperatura del suelo con la 3.4, esto se debe realizar teniendo en consideración el tipo de suelo. Se determina que el suelo de la PSR Alto Quilantahue es de características arcilla-limo seco en su valor máximo, debido a que tiene un gran contenido de agua a 120 cm de profundidad [44]. Por lo tanto, se tiene su conductividad térmica  $k_g$ , su capacidad térmica volumétrica  $C_g$ , son de 1 y 1.6, respectivamente. Lo que implica una difusividad térmica  $\alpha_g$  igual a 0.054 ( $m^2/dia$ ).

Tabla 4.25: Valores para determinar temperatura del suelo.

Difusividad térmica [ $m^2/dia$ ]	T promedio anual [ $^{\circ}C$ ]	t0 [dias]	z [m]	Tmin [ $^{\circ}C$ ]	Tmax [ $^{\circ}C$ ]	As [ $^{\circ}C$ ]
0.054	10.116	35	1.5	0.400	26.2	13.3

Con esto es posible calcular la temperatura diaria, definiendo así la temperatura máxima y mínima del suelo a 1.5 metros de profundidad. Donde  $T_{minsuelo}$  igual a 0.4 $^{\circ}C$  y  $T_{maxsuelo}$  igual a 26.2 $^{\circ}C$ .

Junto a las ecuaciones 3.7, 3.6 y la indicación de la ecuación 2.10, se tiene que  $T_c = -5.192$ ,  $R_s = 1$ ,  $R_c = 0.047$  para ambos casos.

Para el factor de operación de calefacción se tiene que julio es el mes con mayor utilización, por lo que se determina un  $F_{cal}$  igual a 0.657 para el caso BASE y de 0.703 para el caso con

EE. Finalmente, con la ecuación 2.5, se tiene que el largo del colector para ambos casos es de 2,962.211 metros para el caso BASE y 1,866.927 metros para el caso con EE, implicando aproximadamente 1,100 metros de diferencia entre un caso y otro.

Si se establece una distribución de circuito de colector geotérmico con una distancia de 0.6 metros, se puede obtener los siguientes resultados.

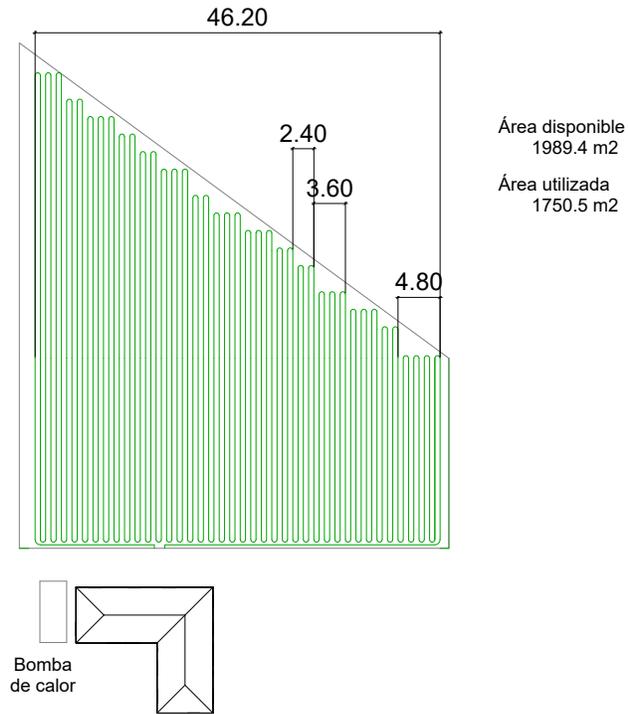


Figura 4.16: Circuito de colector geotérmico para caso BASE.

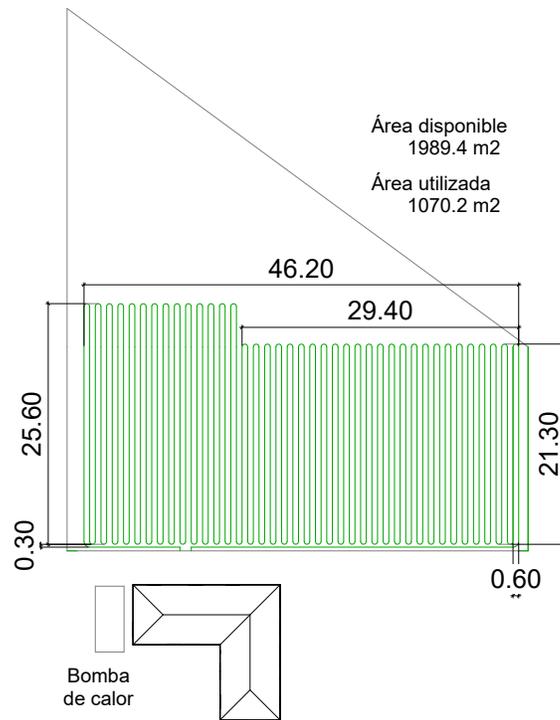


Figura 4.17: Circuito de colector geotérmico para caso con EE.

#### 4.4.4. Circuito de calefacción por Fancoils

Para el sistema de fancoil se necesitarán 5 equipos que suplan la carga necesaria, por lo que para el caso con EE se necesitará de un equipo con 5 kW de potencia, mientras que para el caso BASE se necesitará un equipo de 8.6 kW. Se elige el equipo de marca PHNIX, modelo PFP-100(V)-C y potencia de 5.2 kW para el caso con EE y para el caso BASE, el modelo PFP-080(V)-C con una capacidad de 4.3 kW, pero se utilizarán 2 fancoils en cada sector, teniendo un total de 10 equipos [45].



Figura 4.18: Fancoil escogido para la PSR Alto Quilantahue [45].

#### 4.4.5. Bombas hidráulicas y gasto eléctrico para el sistema de calefacción geotérmico

Con el largo del colector geotérmico y el largo del sistema de distribución de fancoil, es posible calcular las pérdidas de carga totales, considerando una tubería para el sistema de fancoil de material CPVC con un diámetro interno de 49.1 mm [46].

Tabla 4.26: Resultados para selección de bombas hidráulicas.

Caudal caso BASE [m <sup>3</sup> /h]	4.42
Caudal con EE [m <sup>3</sup> /h]	2.60
Pérdidas de carga total caso BASE [mca]	55.060
Pérdidas de carga total con EE [mca]	39.642
D interno FC [mm]	49.1
Caudal FC caso BASE [m <sup>3</sup> /h]	7.44
Caudal FC caso con EE [m <sup>3</sup> /h]	4.34
Pérdida de carga total BASE [mca]	2.00
Pérdida de carga total con EE [mca]	0.78

Con estos datos es posible seleccionar las bombas hidráulicas para el sistema de colector y sistema de fancoil.

Tabla 4.27: Bombas marca Grundfos seleccionadas para la PSR Alto Quilantahue.

Caso	Tipo de Bomba	Modelo	Qmin	Qmax	Hmin	Hmax	Potencia en base al caudal
Caso BASE	Bomba colector geotérmico	crn 5-10 a-p-a-e-hqqe	3.049	10.281	45.145	100.853	$y = -0.0143x^2 + 0.342x + 1.0909$
	Bomba sistema fancoil	crn 3-8 a-p-a-e-hqqe	1.215	4.490	20.685	53.460	$y = -0.0191x^2 + 0.1802x + 0.3034$
Caso con EE	Bomba colector geotérmico	magna1 40-60 f n	0	7.74	0.282	1.027	$y = -0.0002x^2 + 0.0028x + 0.011$
	Bomba sistema fancoil	magna1 25-40 n	0	6.22	1	1.058	$y = -0.0005x^3 + 0.0047x^2 - 0.0034x + 0.0099$



(a) Bomba para colector geotérmico [47].



(b) Bomba para sistema fancoils [48].

Figura 4.19: Imágenes referenciales sobre bombas escogidas para la PSR Alto Quilantahue.

Luego, es posible calcular el gasto eléctrico horario del sistema completo de calefacción geotérmica. El gasto eléctrico de la bomba de calor se obtendrá dividiendo la carga térmica

horaria por el COP asociado a su caso.

Tabla 4.28: Gasto eléctrico anual para cada caso en kWh.

CB	caso Base	caso con EE
1,882.503	60,549.463	30,143.665

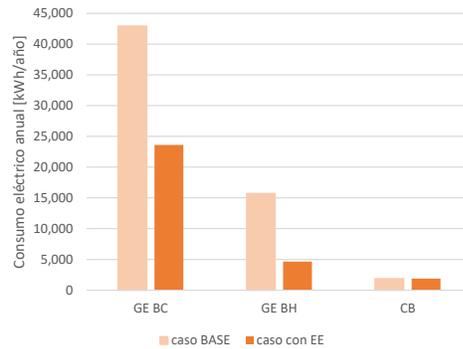


Figura 4.20: Comparativa gasto eléctrico sistema de calefacción geotérmico.

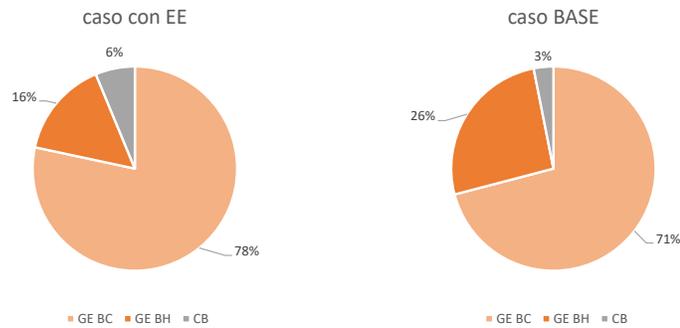


Figura 4.21: Aporte de gasto eléctrico según bomba de calor (BC), bomba hidráulica (BH) y consumo base (CB).

Es posible observar en el gráfico que el gasto eléctrico va asociado directamente a la bomba de calor, por lo que es crucial tener un COP elevado para que estas tecnologías se traduzcan en un ahorro sustantivo. Por otro lado, al comparar el valor total anual de 60,549.463 y 30,143.665 kWh/año para el caso BASE y con EE respectivamente, se puede concluir que las medidas de eficiencia energética (EE) se traducen en una baja de un 50 % del gasto eléctrico, reforzando la idea de la importancia de la evaluación e incorporación de estas a este tipo de proyectos.

#### 4.4.6. Costos sistema de calefacción geotérmica

A continuación se calculan los precios que se deben considerar en cuanto a la inversión del proyecto y su mantención.

Tabla 4.29: Costos asociados al sistema de calefacción geotérmico.

Ítem	Caso base	Caso EE	Costo base	Costo EE	Descripción
Tamaño Bomba de Calor [kW]	44	24	\$ 13,857,668	\$ 7,558,728	G1 costo bomba
Costo Bomba de Calor [\$]	\$ 13,857,668	\$ 7,558,728	\$ 4,573,030	\$ 2,494,380	G7 costo instalación
Área colector [m <sup>2</sup> ]	1751	1070	\$ 42,962,522	\$ 26,264,937	G8 costo crear colector
Tamaño Bomba de Calor [kW]	44	24	\$ 468,600	\$ 255,600	G10 costo mantenimiento bomba
Tamaño FanCoil [kW]	43	26	\$ 6,961,915	\$ 4,209,530	E3 costo instalación circuito fancoil
Fan coil	\$ 761,248	\$ 855,441	\$ 7,612,480	\$ 4,277,205	Costo fancoil
Fan coil			\$ 200,000	\$ 200,000	Mantenimiento FC cada 10 años
<b>Total (sin mantenimiento)</b>			<b>\$ 75,967,615</b>	<b>\$ 44,804,780</b>	

#### 4.5. Sistema fotovoltaico

Se dimensionará un sistema de generación fotovoltaica para los casos: Consumo base, caso BASE y caso EE. Luego se aplicarán dos criterios: si cumple la demanda horaria (Uno a uno) y si cumple demanda horaria acumulada (Acumulado). Lo anterior se realiza para verificar si el sistema podría funcionar sin baterías y confirmar la posibilidad de autogeneración de la energía requerida, identificando puntos claves durante el año.

Tabla 4.30: Resultados dimensionamiento sistema fotovoltaico (PV).

Sistema fotovoltaico	Consumo base	Geotermia caso BASE	Geotermia caso con EE
Uno a uno	33 %	31 %	31 %
Acumulado	100 %	54 %	51 %
Retorno a la red [kWh]	740.96	1101.93	26.16
Consumo total [kWh]	1,882.50	60,549.46	30,143.66
Generación total [kWh]	2,623.46	61,651.39	30,169.83
Potencia Instalada [kW]	2	47	23
N de paneles	4	94	46
Área utilizada [m <sup>2</sup> ]	10	241	20

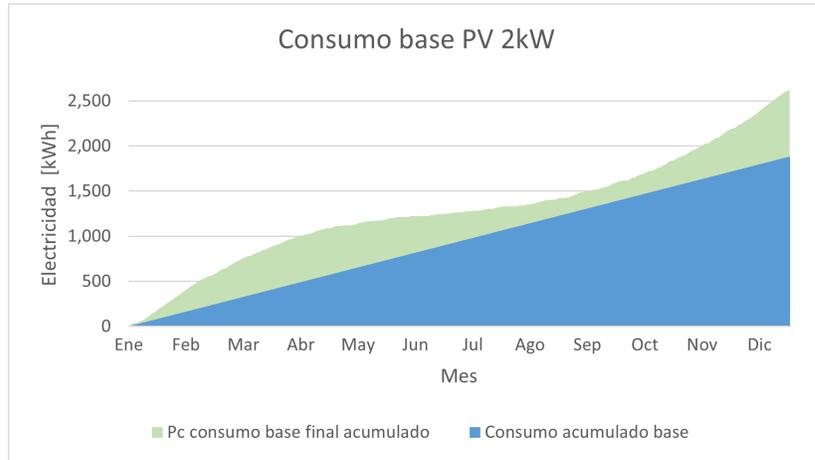
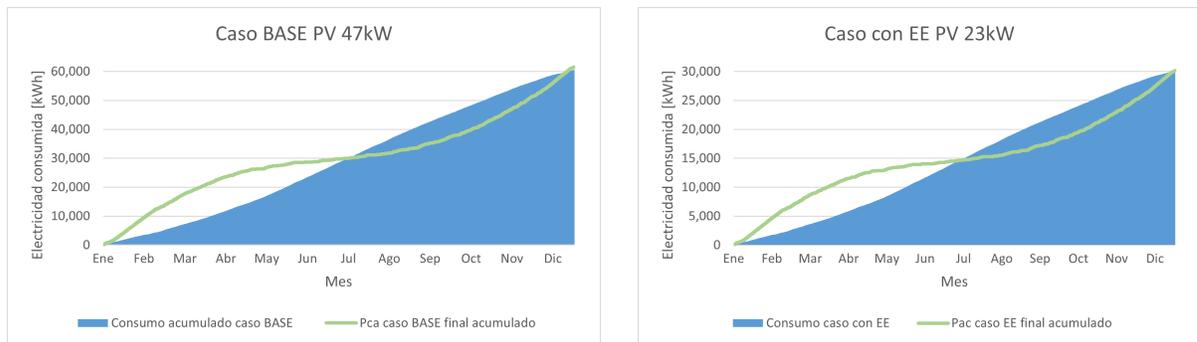


Figura 4.22: Gasto y generación acumulado consumo base (CB).



(a) Geotermia caso BASE.

(b) Geotermia caso con EE.

Figura 4.23: Gasto y generación acumulada sistema fotovoltaico.

Se puede observar que todos los sistemas no pueden abastecer de forma horaria por sí solos la demanda eléctrica, por lo que es necesario para este tipo de sistemas, un arreglo de baterías adecuado para cada caso. Por otro lado, es posible mencionar que el sistema para el caso base acumulado sí logró suplir la energía demandada, mientras que en el caso con Geotermia caso BASE y caso con Geotermia caso con EE llegado el mes de junio - julio llegan a un punto de no lograr abastecer la energía acumulada demandada, esto puede indicar que en periodos de mucha demanda eléctrica debido al invierno, la importancia de la no intermitencia eléctrica es fundamental para el correcto funcionamiento de estas tecnologías al no poder apoyarse 100 % en las energías renovables, también se puede estudiar la posibilidad de un generador de backup. Por otro lado, al observar las áreas utilizadas, todos los casos Geotermia BASE y con EE son compatibles con el colector geotérmico.

#### 4.5.1. Estudio preliminar con sistema de baterías

Para tener una mayor perspectiva sobre si es viable el tener este tipo de sistemas pudiendo proveer energía de forma constante, se realiza un estudio preliminar con un sistema de baterías de litio con una profundidad de descarga de 80 % y dos días de autonomía que comienza con la batería cargada al 100 % [49]. Esto no se incluirá en el análisis económico debido a que se escapa del alcance de la presente memoria, por lo que serviría ante trabajos futuros para

su respectiva evaluación. Se visualizarán los momentos en donde se inyecta energía a la red (mayor generación que consumo y batería llena), momentos en que se consumirá energía de red o se activará un generador a diesel (generación menor al consumo y batería al 20 %) y momentos en que se utiliza la batería (generación menor a la consumida y batería mayor a un 20 %).

Tabla 4.31: Sistema fotovoltaico con sistema de baterías de litio con 80 % de profundidad de descarga.

Sistema fotovoltaico	Consumo base	Geotermia caso BASE	Geotermia caso con EE
Consumo promedio diario [kWh/día]	5	167.5	82.5
Capacidad baterías [kWh]	10	335	165
Energ. Total Consumida/diesel [kWh]	394.55	21,584.09	10,874.96
% horas año uso bateria	64.43 %	59.08 %	58.88 %
% horas año inyección	14.61 %	11.48 %	11.45 %
% horas año consumo/diesel	20.96 %	29.44 %	29.67 %

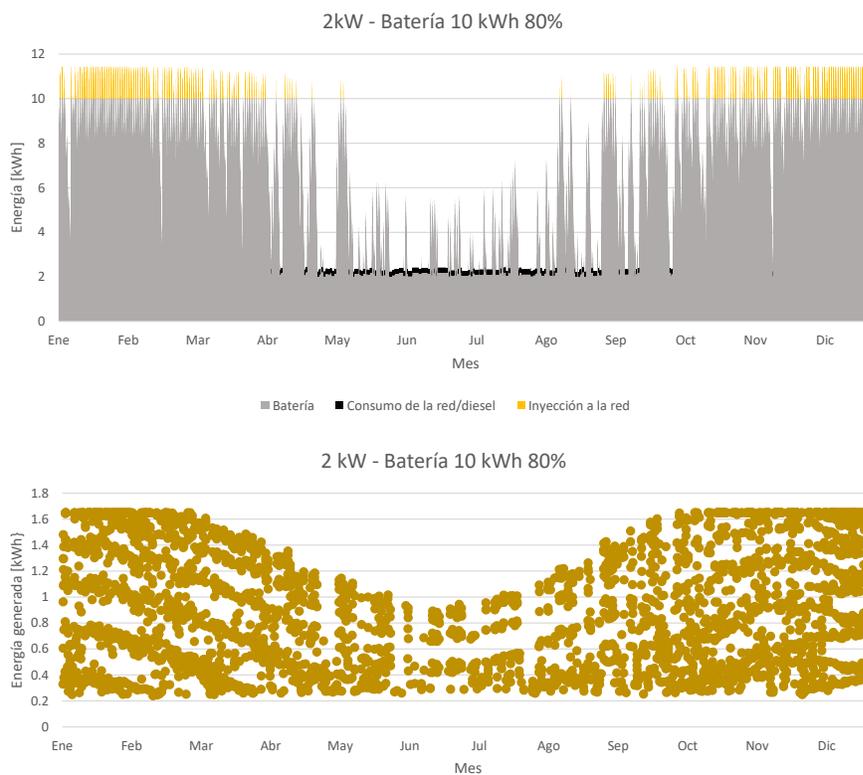


Figura 4.24: Sistema fotovoltaico Consumo base con sistema de baterías 10 kWh.

Se observa que en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre se tiene el uso del consumo de la red/generador diesel, coincidiendo con una generación que baja de los 1.4 kWh por hora. En cambio, para los meses de verano y principios de otoño prima la inyección de energía a la red, coincidiendo con los meses de mayor generación de energía.

Esto se traduce en un 20.96% de horas al año de uso del consumo de la red/generador diesel, resultando en 72 días al año de uso de este recurso.

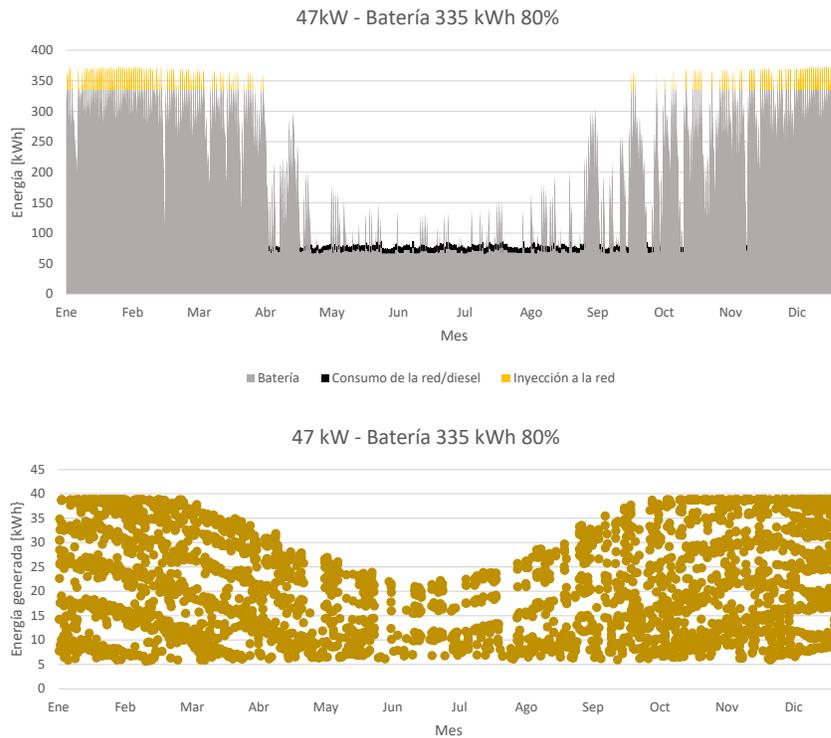


Figura 4.25: Sistema fotovoltaico Geotermia caso BASE con sistema de baterías 335 kWh.

Se logra observar un comportamiento similar al anterior, pero las magnitudes cambian, en donde coincide el uso de consumo de la red/generador diesel con la baja de la generación a 16 kWh por hora. Esto también se traduce en un 29.44% del uso de este recurso, equivalente a 108 días al año.

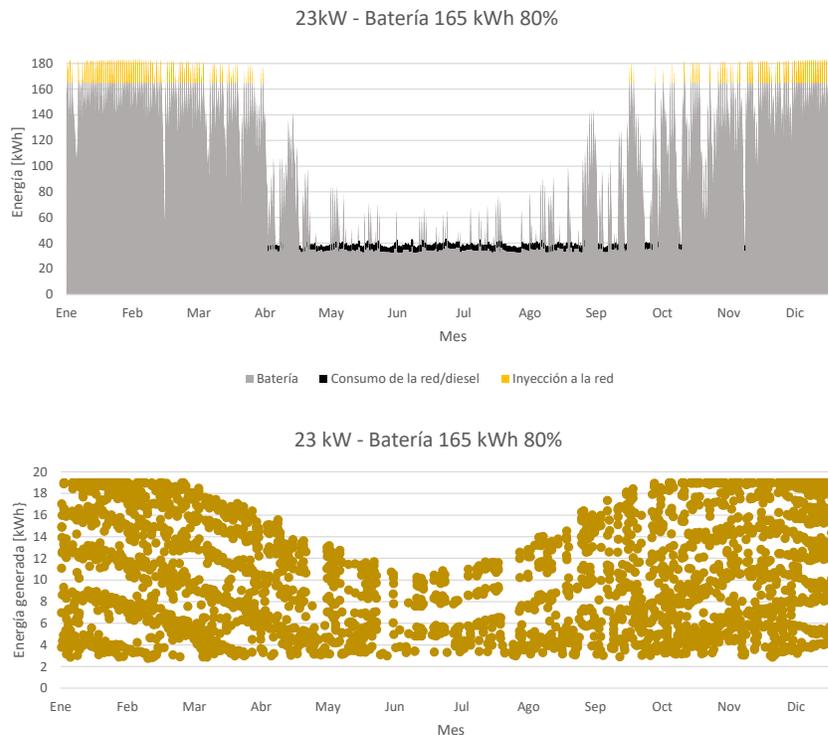


Figura 4.26: Sistema fotovoltaico Geotermia caso con EE con sistema de baterías 165 kWh.

El comportamiento entre el caso de Geotermia caso BASE y caso con EE son bastante similares, mostrando una diferencia entre sistemas de mayor potencia instalada versus el sistema de 2 kW, en donde se observa una disminución en las horas de uso de la batería y las horas de inyección al año, mientras que existe un aumento en las horas año de consumo de la red/generador diesel.

#### 4.5.2. Costos sistema fotovoltaico

Tabla 4.32: Costos asociados al sistema fotovoltaico.

	CB	Geotermia caso BASE	Geotermia caso con EE
Precio	\$ 2,558,734	\$ 44,337,309	\$ 23,591,100
Mantenimiento anual 2 %	\$ 51,174.68	\$ 886,746.18	\$ 471,822.00

## 4.6. Aerogenerador

Para el dimensionamiento del sistema eólico se utilizarán los mismos criterios que con el sistema fotovoltaico. Para el caso BASE no fue posible dimensionar un sistema eólico debido a que no cumple el criterio para ser caracterizado como generador pequeño (menor o igual a

60 kW de potencia), por lo que se procede dimensionar un aerogenerador para el caso de CB y caso EE.

Tabla 4.33: Resultados dimensionamiento sistema eólico.

Sistema eólico	Consumo base	Geotermia caso con EE
Uno a uno	64 %	28 %
Acumulado	100 %	98 %
Retorno a la red [kWh]	648.463	5786.036
Consumo total [kWh]	1,882.503	30,143.665
Generación total [kWh]	2,530.966	35,929.701
Potencia Instalada [kW]	3	60

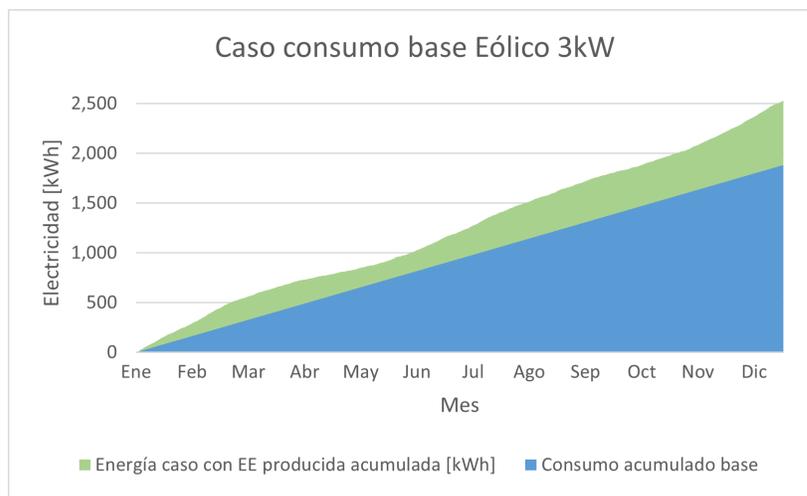


Figura 4.27: Gasto y generación acumulado consumo base (CB) sist. eólico.

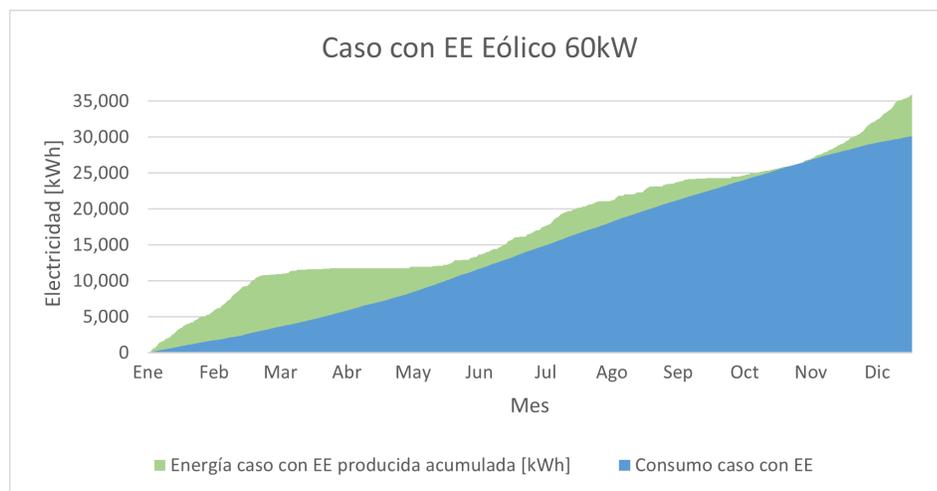


Figura 4.28: Gasto y generación acumulado Geotermia caso con EE sist. eólico.

Se puede observar que para el sistema de consumo base es posible satisfacer en un 64 % la demanda horaria, esto habla que el recurso eólico está presente en gran parte del año, posicionándose como un recurso de gran robustez para sistemas pequeños, en cambio, para el sistema de 60 kW, solo pudo abastecer un 28 %. Con respecto al análisis del acumulado, ambos alcanzan aproximadamente el 100 % por lo que podrían ser sistemas que funcionen muy bien con un sistema de baterías asociado.

#### 4.6.1. Estudio preliminar con sistema de baterías

Similarmente, al sistema fotovoltaico, se realizará un estudio preliminar para observar su comportamiento con un sistema de baterías de litio con una autonomía de dos días y profundidad de descarga de un 80 %. Al igual que con el sistema fotovoltaico, este análisis no se incluirá en el análisis económico.

Tabla 4.34: Sistema eólico con sistema de baterías de litio con 80 % de profundidad de descarga.

Sistema eólico	Consumo Base	Geotermia caso con EE
Consumo promedio diario [kWh/día]	5	82.5
Capacidad baterías [kWh]	10	165
Energ. Total Consumida/diesel [kWh]	65.73	11,234.73
% horas año uso bateria	48.40 %	48.05 %
% horas año inyección	44.49 %	16.71 %
% horas año consumo/diesel	7.11 %	35.24 %



Figura 4.29: Sistema eólico Consumo base con sistema de baterías 10 kWh.

Se puede observar que el sistema eólico para el caso de consumo base conjugado con un sistema de baterías logra ser bastante autónomo, en donde solo el 7.11 % de las horas en un año necesitaría de un apoyo de la red o activar un generador a diesel, equivalente a 26 días. Es posible relacionar también que cuando baja la generación de energía de 0.1 kWh es cuando se presentan estos episodios. Al contrario, cuando se sobrepasa o iguala la generación de energía de los 0.5 kWh, se inyecta energía a la red, lo cual ocurre el 44.49 % de las horas al año.

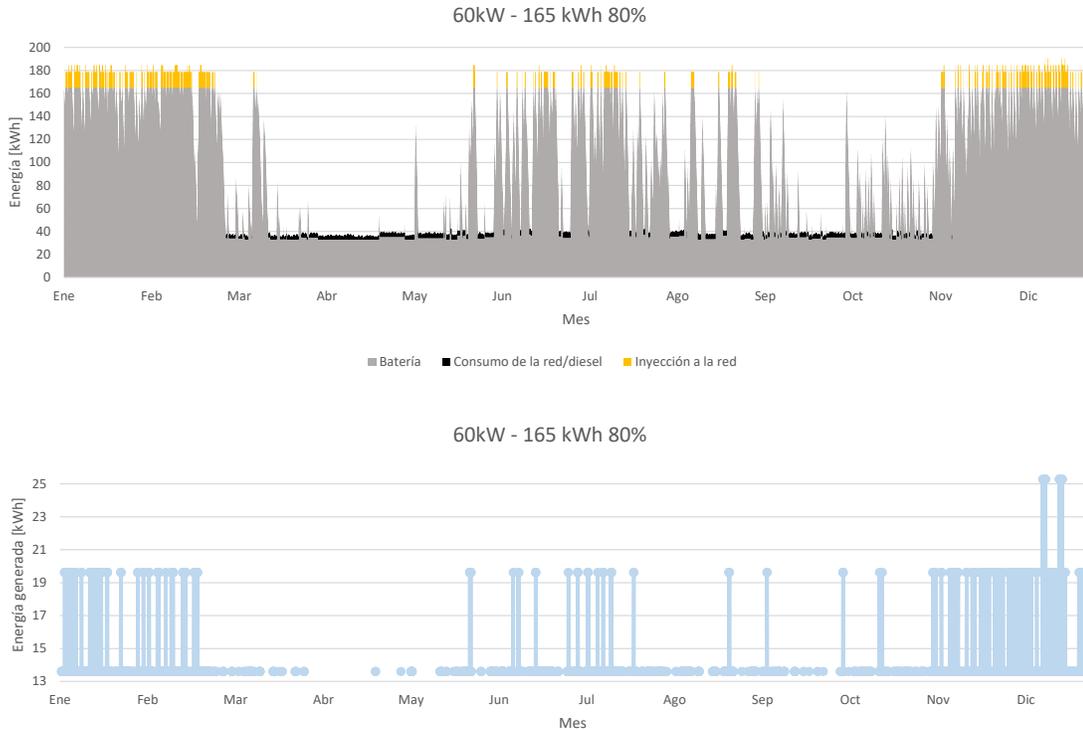


Figura 4.30: Sistema eólico Geotermia caso con EE con sistema de baterías 165 kWh.

Si se observa la situación del caso Geotermia caso con EE, se mantiene el porcentaje de uso de batería con respecto al consumo base, pero cambian las horas de inyección y horas de consumo/uso generador diesel al año. En cuanto a las horas de consumo de la red/generador diesel, estas aumentan a 35.24 %, equivalentes a 129 días al año. Es correcto entonces inferir que para instalaciones con mayor magnitud de potencia instalada, las velocidades menores del recurso eólico, no tienen un gran aporte en la generación de energía, por lo que en los episodios de consumo de la red/generador diesel. En este caso, se observa que hay una generación de 13.5 kWh aproximadamente o incluso nula cuando se asocia a estos episodios.

#### 4.6.2. Costos sistema eólico

Tabla 4.35: Costos asociados al sistema eólico.

	CB	Geotermia caso con EE
Precio instalación	\$ 3,003,876	\$ 60,077,524
Precio mantención anual	\$ 60,078	\$ 1,201,550

## 4.7. Evaluación económica

Para poder evaluar las medidas de eficiencia energética por sí solas, se debe calcular el ahorro que se tiene en cuanto a la calefacción, pero seguir utilizando la leña y el gas licuado.

Tabla 4.36: Gasto en calefacción: Caso actual versus Geotermia caso con EE.

Leña - GLP	Caso actual	Geotermia caso con EE
Ecal (99.999 - 0.001 %) [kWh/año]	367,804.314	115,761.58
Leña m <sup>3</sup>	12	4
Gasto leña	\$ 540,000	\$ 180,000
Balones 15kg	18	6
Gasto gas	\$ 387,000	\$ 129,000
Total	\$ 927,000	\$ 309,000

Este ahorro también lleva consigo un ahorro en las emisiones de  $CO_2$ , por lo que si se considera el precio social del carbono, definiendo un factor de emisión de 1.767 y 3.202  $kg_{CO_2eq}/kg_{comb}$  para la leña y el GLP respectivamente [50], se tiene

Tabla 4.37: Ahorro en carbono equivalente caso EE.

99.999 - 0.001 %	Caso actual	Geotermia caso con EE
kg leña	7,776	2,592
tonCO <sub>2</sub> leña	13.74	4.58
kg GLP	270	90
CO <sub>2</sub> GLP	0.865	0.288
Total tonCO <sub>2</sub> eq	14.605	4.868
Total \$ en CO <sub>2</sub> eq	\$ 421,887	\$ 140,629
	Ahorro	\$ 281,258

Tanto los costos como los ahorros se ajustarán año a año con una inflación del 6%, como se mencionó en antecedentes, con excepción de la tarifa eléctrica, debido a que esta tendrá su costo base fijado y el costo variable se considera una inflación anual de 0.8%. Esto en base a las tarifas observadas para Tirúa durante los años 2019 y 2023.

Sobre el precio de la energía sobrante, se considerará el mismo precio al que se compra la energía en una primera iteración.

Tabla 4.38: Resultados evaluación económica 8 casos.

	Inversión inicial	VAN	TIR	Años retorno	Retorno a la red [kWh/año]
Geotermia caso BASE	\$ (75,967,615)	\$ (161,790,877)	-	-	-
Geotermia caso con medidas EE	\$ (61,893,680)	\$ (92,816,715)	-	-	-
Geotermia caso BASE con PV	\$ (120,304,924)	\$ (203,970,143)	-	-	1,101.927
Geotermia caso con medidas EE con PV	\$ (85,484,780)	\$ (123,916,486)	-	-	26.164
Geotermia caso con medidas EE con Eólica	\$ (121,971,204)	\$ (43,321,815)	6%	16	5,786.036
Medidas EE	\$ (17,088,900)	\$ (611,783)	10%	13	-
Medidas EE con PV	\$ (19,647,634)	\$ 7,422,476	13%	9	740.960
Medidas EE con Eólica	\$ (20,092,776)	\$ 5,398,506	12%	10	648.463

Se observa para los diferentes casos

1. Geotermia caso BASE: Se obtiene un VAN negativo, aún más negativo que la inversión inicial, por lo que este caso es desfavorable económicamente, debido a que los ahorros en carbono equivalente se ven mermados por el gasto eléctrico que se debe realizar para calefaccionar la PSR Alto Quilantahue (10 MM\$ versus 1MM\$ anual).
2. Geotermia caso con medidas EE: Se obtiene el mismo escenario anterior, solo que un poco más disminuido, es importante recalcar que el gasto eléctrico en comparación del caso sin medidas de EE es del 50 % menos (10 MM\$ versus 5MM\$ anual).
3. Geotermia caso BASE con PV: Mismo caso que con los anteriores, se obtiene un VAN muy negativo, por lo que el ahorro que produce la generación fotovoltaica no es posible contrarrestar el gasto en electricidad necesario y recuperar la inversión inicial.
4. Geotermia caso con medidas de EE con PV: Mismo caso que los anteriores, a pesar de bajar el costo en electricidad, aún no es posible contrarrestarlo con el ingreso que genera el sistema de PV.
5. Geotermia con medidas EE con Eólica: Este caso presenta un VAN negativo, pero a su vez menor que la inversión inicial, pero presenta una TIR del 6 %, indicando que fue posible recuperar la inversión inicial, pero no se obtiene la rentabilidad esperada. En donde se tienen 16 años de retorno de la inversión.
6. Medidas EE: Se observa un VAN negativo y una TIR del 10 % en donde se recupera la inversión a los 13 años, es decir, las medidas de EE son una medida económica que no es atractiva, ya que se demora bastante en recuperar la inversión, siendo una barrera importante al querer llevar a cabo este tipo de proyectos.
7. Medidas EE con PV: Este caso presenta un VAN positivo y TIR mayor a la tasa de descuento, por lo que es un proyecto en que se recupera la inversión y es rentable económicamente, considerando 9 años de tasa de retorno.
8. Medidas EE con Eólica: Este caso es similar al anterior, en donde se presenta como una alternativa atractiva económicamente.

Es importante mencionar que mostraron mayor rentabilidad económica los casos con hibridación de las medidas de EE y energías como la fotovoltaica y eólica. Si bien, no fue posible asegurar la demanda eléctrica hora a hora y al no considerar un arreglo de baterías, la opción

de Netbilling podría solucionar este dilema. El incorporar baterías a un sistema, conlleva agregar costos sin embargo, la solución del Netbilling podría satisfacer las necesidades de vender la energía sobrante pese a no contar con un sistema de almacenamiento de energía.

A continuación se realiza un estudio de sensibilidad sobre el pago de la energía sobrante en donde se compara el valor VAN, TIR y tasa de retorno si se disminuye el precio de compra en un 20 y 50 por ciento.

Tabla 4.39: Análisis de sensibilidad sobre la variación del precio de venta de la energía sobrante.

Variación precio venta	100 %			20 %			50 %		
	Casos	VAN	TIR	Años retorno	VAN	TIR	Años retorno	VAN	TIR
Medidas EE con PV	\$ 7,422,476	13 %	9	\$ 5,132,225	12 %	10	\$ 1,696,848	11 %	11
Medidas EE con Eólica	\$ 5,398,506	12 %	10	\$ 3,394,158	12 %	10	\$ 387,637	10 %	12

Se puede observar que a medida que el precio va disminuyendo, la VAN va disminuyendo, pero los años de retorno son relativamente estables, por lo que hibridar las medidas de EE con energías renovables asegura un retorno de la inversión más rápido, pero al considerar precios más bajos a futuro se rentará de menor manera, algo que es bastante lógico. Es importante destacar que al disminuir en un 50 % el precio, la rentabilidad es bastante baja y llega a cierto punto crítico.

Finalmente, del análisis económico se puede concluir que no es viable económicamente hibridar la geotermia con energías renovables, tanto en el caso con o sin medidas de eficiencia energética (EE), no obstante es interesante el resultado económico de la hibridación de las medidas de EE con generación fotovoltaica y eólica, debido a que esta hibridación disminuye los años en recuperar la inversión (diferencia de 4 años) y además es una inversión que se convertiría en un ingreso rentable a través del Netbilling. En otras palabras, los proyectos de generación fotovoltaica o eólica conectadas a través de Netbilling pueden ser capaces de financiar el mejoramiento de la envolvente térmica de los inmuebles, ya sean casas, hospitales o postas rurales como lo es el caso de la PSR Alto Quilantahue, otorgando mayor confort térmico, mejor calidad de vida y un desarrollo sustentable viable económicamente.

# Capítulo 5

## Conclusiones

La comunidad usuaria de la posta de salud rural (PSR) Alto Quilantahue, ubicada en Tirúa, Región del BíoBío, presenta sus intenciones de energizar este establecimiento con energías eólicas. Adicionalmente, se detecta que el inmueble tiene una envolvente térmica en mal estado y se utiliza una calefacción en base a leña y GLP el cual tiene efectos nocivos en la salud de la misma comunidad. Es por esto que la presente memoria tiene como objetivo estudiar la factibilidad económica y técnica de la hibridación de la calefacción geotérmica con la generación fotovoltaica y eólica, considerando las medidas de eficiencia energética (EE) como otro factor dentro de la hibridación.

Se consideraron 9 casos a estudiar, en donde el caso base representa el estado actual de la envolvente térmica y el caso con EE representa el mejoramiento de la envolvente térmica a través de medidas de eficiencia energética (EE): Caso base con Geotermia, Caso base con Geotermia y sistema fotovoltaico, caso base con geotermia y sistema eólico, caso con EE con geotermia, caso con EE con geotermia y sistema fotovoltaico, caso con EE con geotermia y eólico, caso con EE, caso con EE con sistemas fotovoltaicos, caso con EE con sistema eólico.

En primera instancia se determinaron las variables meteorológicas a través de la obtención de TMY y un ajuste de distribución de Weibull para la determinación de la velocidad del viento más probable a través de la librería de Python, Reliability con la cual se determinó que la base del explorador eólico sería la más confiable y conservadora, estableciendo velocidades más probables para 10 y 50 metros de forma horaria. Esto sería la base del cálculo del recurso solar y eólico.

Para poder determinar las cargas térmicas se realizó un modelamiento del estado actual de la PSR Alto Quilantahue, a partir de esto se establecen las medidas de EE, considerando aislación en toda la envolvente, recambio de ventanas, puertas y medidas contra las infiltraciones de aire, como lo es sellar el encuentro muro-cielo.

Se determinaron las cargas térmicas para el caso base y con EE, de forma en que obtuvieron los valores de 42.678 kW y 24.863 kW respectivamente. Luego, con esto se determinó el dimensionamiento del sistema geotérmico para el caso base y con EE, teniendo un largo de colector de 2,962.211 metros para el caso BASE y 1,866.927 metros para el caso con EE. El sistema geotérmico considera un gasto eléctrico importante, en donde se determina la

totalidad de su gasto eléctrico es de 60,549.463 y 30,143.665 kWh/año respectivamente.

Con estos valores y considerando un gasto de consumo eléctrico base de la PSR Alto Quilantahue de 1,882.503 kWh/año, se dimensiona un sistema fotovoltaico para los tres casos. Teniendo para el consumo base un sistema de 2kWp, para el caso base 47kWp de potencia y para el caso con EE 23kWp.

Por otro lado, se dimensiona el sistema eólico, en donde se determina un sistema de 3kWp para el consumo base y 60kWp para el caso con EE. No fué posible dimensionar el sistema eólico para el caso base, debido que se necesitaba un aerogenerador mucho más grande, escapándose del criterio determinado para pequeños aerogeneradores.

Finalmente, se realiza una evaluación económica de cada caso estableciéndose los siguientes escenarios: Caso base con Geotermia, Caso base con Geotermia y sistema fotovoltaico, caso con EE con geotermia, caso con EE con geotermia y sistema fotovoltaico, caso con EE con geotermia y eólico, son casos económicamente no viables, debido a que el costo de la electricidad consumida por la calefacción por geotermia sobrepasa el valor de los ahorros por carbono equivalente y los ingresos por la generación fotovoltaica o eólica. Por otro lado, para los casos: caso con EE con sistemas fotovoltaicos, caso con EE con sistema eólico, logran ser económicamente viables, en específico los últimos dos, en donde se llega a la conclusión de que los proyectos de generación fotovoltaica o eólica conectados a través de Netbilling pueden ser capaces de financiar el mejoramiento de la envolvente térmica de los inmuebles, ya sean casas, hospitales o postas rurales como lo es el caso de la PSR Alto Quilantahue. A demás acortar los años de retorno de inversión (de 13 a 9 años), siendo una hibridación que presenta una oportunidad para romper barreras económicas.

## 5.1. Trabajo a futuro

Se propone como trabajo a futuro el estudiar la viabilidad de la hibridación de medidas de EE con energía fotovoltaica y eólica en su conjunto bajo la modalidad de Netbilling, ya que es una hibridación interesante y beneficiosa en términos económicos, estableciendo un límite de 100 kWp, teniendo como marco las restricciones de espacio y presupuesto.

Por otro lado, se propone estudiar los mismos casos propuestos en la presente memoria, pero con un sistema de baterías, considerando sus costos y por consiguiente su impacto en la evaluación económica.

Estudiar otros establecimientos de salud en los que su gasto base de calefacción o refrigeración sea mayor a la de la PSR Alto Quilantahue, ya que dado su contexto, el gasto anual es bastante bajo. Por lo anterior, resulta interesante evaluar la relevancia del gasto base versus el gasto eléctrico que pueda ser realizado con geotermia. Los establecimientos de salud son lugares en que, según su envergadura y funcionamiento de 24 horas, necesitan condiciones de climatización determinadas, por lo que el estudio de estos establecimientos son de gran importancia para las comunidades.

# Bibliografía

- [1] BCN Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, “Reportes Estadísticos 2021 de Tirúa. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.” [https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas\\_v.html?anno=2021&idcom=8207](https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=8207), 2023.
- [2] Agencia SE, “EEL TIRÚA.” <https://old.comunaenergetica.cl/tirua/>.
- [3] L. Bilir and N. Yildirim, *Investigation of a Small Scale Wind Turbine-Heat Pump Hybrid System for a Detached House*. May 2016.
- [4] H. Li, P. E. Campana, Y. Tan, and J. Yan, “Feasibility study about using a stand-alone wind power driven heat pump for space heating,” *Applied Energy*, vol. 228, no. C, pp. 1486–1498, 2018.
- [5] MINVU - Ministerio de Vivienda y Urbanismo, “Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía,” 2018.
- [6] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Nov. 2013.
- [7] NREL, “Weather Data - System Advisor Model - SAM.” <https://sam.nrel.gov/weather-data.html>.
- [8] JRC, “JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission.” [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#TMY](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY).
- [9] D. M. Deaves and I. G. Lines, “On the fitting of low mean windspeed data to the Weibull distribution,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 66, pp. 169–178, Mar. 1997.
- [10] A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhashti, M. Khanali, and R. Abbaszadeh, “An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran,” *Energy*, vol. 35, pp. 188–201, Jan. 2010.
- [11] M. Reid, “MatthewReid854/reliability: V0.5.1.” Zenodo, July 2020.
- [12] ASHRAE, *2021 ASHRAE Handbook – Fundamentals*. May 2021.
- [13] INN, “NCh853:2021.” <https://ecommerce.inn.cl/nch853202179509>.
- [14] MINVU - Ministerio de Vivienda y Urbanismo, “Vol. 2 Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile,” 2019.
- [15] S. Kavanaugh and K. Rafferty, *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. Dec. 2014.
- [16] RETScreen, *Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook : Ground-source Heat Pump Project Analysis Chapter*. Minister of Natural Resources Canada, 2001.

- [17] O. Ozgener and A. Hepbasli, “Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system,” *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 101–110, Jan. 2005.
- [18] ATECYR, “Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado,” 2012.
- [19] ALEJANDRA VARGAS CÁCERES, *ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN GEOTÉRMICO-SOLAR PARA UNA VIVIENDA EN CHILE*. PhD thesis, Universidad de Chile, 2018.
- [20] Alejandra Molina Monje and Francisco Martínez, “Modelo de GENERACIÓN FOTOVOLTAICA,” tech. rep., Universidad de Chile, 2017.
- [21] D. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application*. July 2011.
- [22] G. van Bussel, “Electricity Generation electricity generation with Small Wind Turbines wind turbine,” pp. 696–713, Jan. 2013.
- [23] N. S. Chain, *Proyectos de inversion*. Jan. 2014.
- [24] M. A. F. Carcamo, *Análisis de beneficios económicos por mejoras energéticas en viviendas: Estudio aplicado a viviendas de sectores medios en Santiago de Chile*. Jan. 2020.
- [25] E. R. FONTAINE, *Evaluacion Social de Proyectos*. Jan. 2008.
- [26] SNI, “Informe Precios Sociales 2023,” tech. rep., 2023.
- [27] T. Varas, M. Cortes Carmona, P. Ferrada, E. Fuentealba, G. Lefranc, and M. Crutchik, “Evaluation of incentive mechanism for distributed generation in Northern Chile,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, pp. 2719–2725, June 2016.
- [28] DFI Uchile, “Explorador Solar.” <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- [29] DFI Uchile, “Explorador Eólico.” <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- [30] NASA, “POWER | Data Access Viewer.” <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [31] M. F. L. Macé de Gastines, A. M. Villalba, and A. E. Pattini, “Improved model for the thermal performance calculation of non-planar window frames for building simulation programs,” May 2016.
- [32] ASHRAE, *HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics, Second Edition*. Mar. 2013.
- [33] CITEC DECON, *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones / ISBN 978-956-9275-27-2 - Libro*.
- [34] R. Sancha, “Índice de Precios de Bombas de Calor v2019,” Jan. 2020.
- [35] C. Fuentes, “Índice de precios de sistemas fotovoltaicos 2020,” Nov. 2020.
- [36] CNE, “INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN,” tech. rep., 2020.
- [37] A. Fritz Durán and M. Ubilla Sanz, *Manual de diseño: construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda de madera : FONDEF D03/1020 muro ventilado, FONDEF D06/1034 pisos y techos*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012.
- [38] Ricardo Hempel, *Edificación En Madera - Cuadernillos*. Concepción: Universidad del BíoBío, 1987.

- [39] ARAUCO, “Techo con Cerchas.”
- [40] DITEC, “PDA Coyhaique.” <http://xi.serviu.cl/pda/pda.htm>.
- [41] IGAL Chile, “Puerta HDF 2 Paneles.” <https://www.igalchile.cl/producto/puerta-hdf-2-paneles/>.
- [42] ECOFOREST, “→ ecoGEO+ 3-12 2023.” <https://ecoforest.com/es/productos/bombas-de-calor/geotermia/ecogeo-3-12/>.
- [43] ECOFOREST, “→ ecoGEO+ 5-22 2023.” <https://ecoforest.com/es/productos/bombas-de-calor/geotermia/ecogeo-5-22/>.
- [44] N. Stolpe, *DESCRIPCIONES DE LOS PRINCIPALES SUELOS DE LA VIII REGIÓN DE CHILE*. May 2006.
- [45] PHNIX, “Ultra Thin Water Fan Coil-Air Source Heat Pump Supplier - PHNIX Heat Pump.” <https://www.phnix-e.com/ultra-thin-fan-coil.html>.
- [46] TIGRE, “Informaciones Técnicas | Tigre Chile.” <https://www.tigre.cl/informaciones-tecnicas>.
- [47] GRUNDFOS, “CRN 3-8 A-P-A-E-HQQE.” <https://product-selection.grundfos.com/products/cr-cre-cri-crie-crn-crne-crt-crte/crn/crn-3-8-92902244>.
- [48] GRUNDFOS, “MAGNA1 40-60 F N.” <https://product-selection.grundfos.com/cl/products/magna/magna1-n/magna1-40-60-f-n-98254917>.
- [49] GIZ, NAMA, “Sistemas de Almacenamiento con Energía Solar Fotovoltaica en Chile,” tech. rep., Santiago, Chile, 2020.
- [50] Rojas, C., Simon, F., Muniz, I., et al., “TENDENCIAS DE LAS EMISIONES DE GEI DE HOGARES POR USO DE ENERGÍA EN CUATRO CIUDADES CHILENAS DURANTE EL COVID-19,” tech. rep., 2022.
- [51] SODAL, “Catálogo SODAL ventanas correderas.” <http://www.sodal.cl/webite/site/home/slides>.
- [52] R. E. Dev, “3kW Small Wind Turbine | Renewable On-Grid & Off-Grid Energy Systems.”
- [53] R. E. Dev, “60kW Small Wind Turbine | Renewable On-Grid & Off-Grid Energy Systems.”
- [54] D. Salgado, “Valor del pellet se duplicó y la leña subió casi a la mitad desde 2019 a la fecha en Los Ríos.” <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-los-rios/2023/01/23/valor-del-pellet-se-duplico-y-la-lena-subio-casi-a-la-mitad-desde-2019-a-la-fecha-en-los-rios.shtml>, Jan. 2023.
- [55] GasEnLinea, “Precios de Cilindros de Gas Licuado de Petróleo en línea.” [https://gasenlinea.gob.cl/index.php/web/buscador?rere\\_id=0](https://gasenlinea.gob.cl/index.php/web/buscador?rere_id=0).
- [56] GASCO, “Gas Licuado – Gasco Magallanes.”
- [57] Madera Nativa Chile, “Ulmo | Caracterización Experiencial: Maderas Nativas de Chile.” <https://maderanativachile.cl/catalogo/ulmo/>.

# Anexos

## Anexo A. Cálculo valor U ventanas caso BASE

A partir de la información extraída de [51] se tiene que el área de cada componente de la ventana es posible calcularla de la siguiente forma, considerando  $x$  como el largo de la ventana e  $y$  el alto de la ventana.

Tabla A.1: Dimensiones elementos ventanas.

Elemento	Cantidad	Ecuación LARGO componente	ALTO visible [mm]
1 - Riel inferior	1	$x-16$	23
2 - Riel superior	1	$x-16$	18
3 - Jamba	2	$y$	8
4 - Zócalo	2	$x/2-15$	36
5 - Cabezal	2	$x/2-15$	31
6 - Traslapo	2	$y-32$	22
8 - Pierna con aleta	2	$y-32$	34

Así, se tienen los siguientes largos para los componentes para cada tipo de ventana.

Tabla A.2: Largo elementos ventanas.

Elemento	Largo Tipo I [mm]	Largo Tipo II [mm]	Largo Tipo III [mm]	Largo Tipo IV [mm]
1 - Riel inferior	1,384	584	584	284
2 - Riel superior	1,384	584	584	284
3 - Jamba	1,200	600	1200	800
4 - Zócalo	685	685	685	685
5 - Cabezal	685	685	685	685
6 - Traslapo	1,168	1,168	1,168	1,168
8 - Pierna con aleta	1,168	1,168	1,168	1,168

## Anexo B. Curvas aerogeneradores

Para el aerogenerador de 3 kW de potencia se tienen los siguientes datos

Tabla B.1: Aerogenerador Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52].

Annual Mean wind Speed (m/s)	Estimated Annual Output (kWh)
2	375
3	1,250
4	2,700
5	4,450
6	6,300
7	8,160
8	9,800
9	11,100
10	12,100

Tabla B.2: Curva de potencia aerogenerador Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52]

Velocidad del viento [m/s]	Potencia [kW]
0	0
1	0
2	0.043
3	0.143
4	0.308
5	0.508
6	0.719
7	0.932
8	1.119
9	1.267
10	1.381
11	1.381
12	1.381
13	1.381
14	1.381
15	1.381

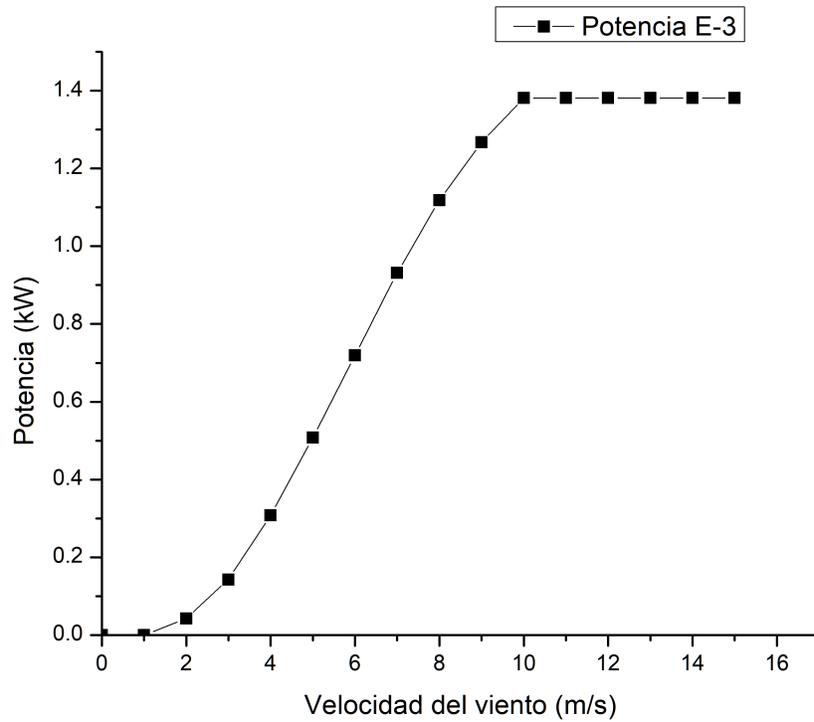


Figura B.1: Curva de potencia Ryse Energy modelo E-3 HAWT [52]

Para el sistema de 60 kW de potencia, se tienen los siguientes datos

Tabla B.3: Aerogenerador Ryse Energy modelo E-60 HAWT. [53]

Annual Mean wind Speed (m/s)	Estimated Annual Output (kWh)
5	119,121
5.5	145,580
6	171,886
6.5	202,278
7	221,466
7.5	243,979
8	264,856

Tabla B.4: Curva de potencia aerogenerador Ryse Energy modelo E-60 HAWT.

Velocidad del viento [m/s]	Potencia [kW]
0	0
0.5	0
1	0
1.5	0
2	0
2.5	0
3	0
3.5	0
4	0
4.5	0
5	13.598
5.5	16.619
6	19.622
6.5	23.091
7	25.282
7.5	27.851
8	30.235
8.5	30.235
9	30.235
9.5	30.235
10	30.235
10.5	30.235
11	30.235

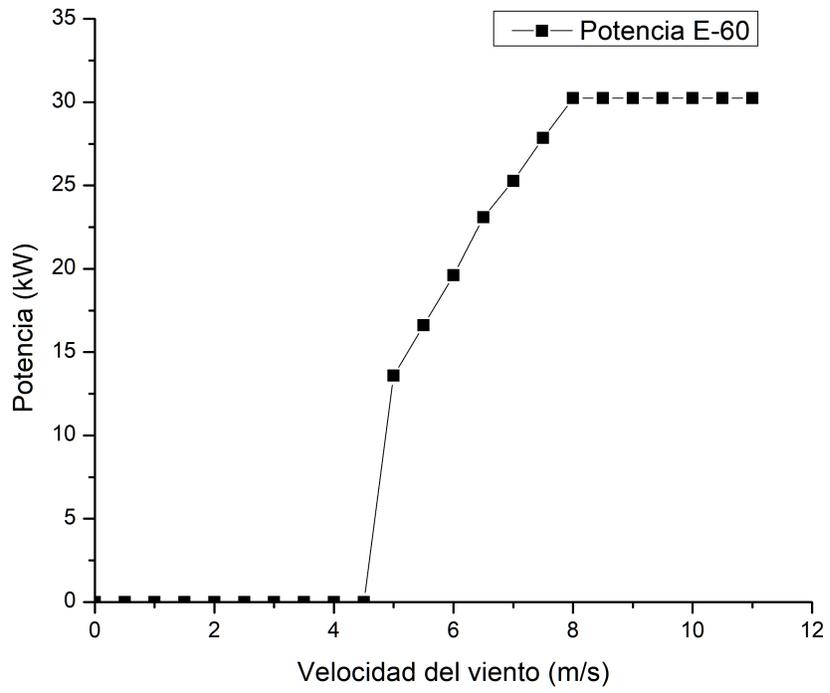


Figura B.2: Curva de potencia Ryse Energy modelo E-60 HAWT [53]

## Anexo C. Evaluación económica

### C.1. Costos y Ahorros

#### C.1.1. Tasa de inflación

Tabla C.1: Cálculo de la tasa de inflación anual al año 2021

	ENERO	DICIEMBRE	Tasa de inflación
2021 IPC	107.49	114.39	6 %

El valor de la inflación anual al 6 % se aplica a todos los valores, tanto costos como ahorros, con excepción de las tarifas de la electricidad, debido a que tiene un comportamiento y reglamento diferente a los demás valores.

#### C.1.2. Variabilidad en la electricidad

Se observa que la electricidad se valoriza de forma diferenciada en costo fijo y costo variable. Se analizan los valores del año 2019 y el año 2023 de la zona de Tirúa de la empresa FRONTEL y no existe variación del costo fijo pero sí existe un 4 % en 5 años, por lo que se considera una inflación de 0.8 % anual en su costo variable. El costo variable considera el costo por transporte y por precio de la electricidad base consumida por unidad de kWh.

Tabla C.2: Cálculo de la tasa de inflación anual para el costo variable de electricidad

Año	2019	2023	% inflación	% inflación anual
Precio variable	160	167	4 %	0.8 %

#### C.1.3. Ahorro costo social Carbono equivalente

En este Anexo se explicará el cálculo del ahorro en las emisiones de tonelada de carbono equivalente a la atmósfera por evitar la quema de leña y gas licuado de petróleo (GLP) para cada caso.

Para el caso del uso de geotermia para el caso BASE y con EE, se evitan el uso anual de \$528,991 de leña y \$377,850 de GLP.

Para la leña, se tiene que el valor del metro cúbico estéreo es de \$45,000 aproximadamente [54], el metro cúbico estéreo equivale a 0.64 metros cúbico de leña sólida, un metro cúbico equivale a 0.73 Gcal o  $174.47 \cdot 10^6$  Joules y se consideran 31,536,000 segundos en un año. Por otro lado, para el GLP se tiene un precio por balón de gas de 15 kg de \$21,500 en la región del BíoBío [55] y que un kg de GLP equivale a 12.1 kcal o 0.014 kWh (utilizando un factor de conversión de 0.001163 kWh/kcal) [56], se tiene que:

Tabla C.3: Equivalencia gasto actual PSR Alto Quilantahue

Leña	Precio leña por 1 m3 estéreo	N m3 estéreos	m3 leña sólida/segundo	Energía utilizada [J/s]	Energía utilizada [kWh/año]	% energía total
	\$ 45,000	12	2.386E-07	41.623	364614.557	99.999%
GLP	Precio gas balón 15 kg	N balones de gas 15 kg	kg de GLP/año	Energía utilizada [J/s]	Energía utilizada [kWh/año]	% energía total
	\$ 21,500.00	18	263.616	-	3.691	0.001%

Así, al utilizar el valor social de la tonCO<sub>2</sub>eq como \$28,887 y la densidad del ulmo como 648  $\frac{kg}{m^3}$  [57], se tiene que al utilizar geotermia y al no usar geotermia, pero sí usar medidas de eficiencia energética, el ahorro por evitar las emisiones de carbono equivalente son las mencionadas en la Tabla 4.37.

#### C.1.4. Cotización medidas de EE

A continuación se presenta la cotización de las medidas de eficiencia energética (EE)

Tabla C.4: Cotización medidas de EE

Piso									
MATERIAL	[\$/m2] 1	[\$/m2] 2	[\$/m2] 3	Precio promedio \$/m2	Área a utilizar [m2]	Precio por elemento	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
Fibrocemento 6 mm	\$ 6.351	\$ 6.351	\$ 4.858	\$ 5.853	148.365	\$ 868.382	<a href="https://shorturl.at/sgLY3">https://shorturl.at/sgLY3</a>	<a href="https://shorturl.at/gjPX8">https://shorturl.at/gjPX8</a>	<a href="https://shorturl.at/kHIZ1">https://shorturl.at/kHIZ1</a>
Filtro 15 lbs	\$ 325	\$ 475	\$ 702	\$ 501	148.365	\$ 74.269	<a href="https://shorturl.at/gjDJP">https://shorturl.at/gjDJP</a>	<a href="https://shorturl.at/mwJ47">https://shorturl.at/mwJ47</a>	<a href="https://shorturl.at/aoOUZ">https://shorturl.at/aoOUZ</a>
Poliestireno expandido 10 kg/m3 e10mm	\$ 1.568	\$ 2.380	\$ 1.568	\$ 1.839	103.79	\$ 190.835	<a href="https://shorturl.at/wAJKT">https://shorturl.at/wAJKT</a>	<a href="https://shorturl.at/joB69">https://shorturl.at/joB69</a>	<a href="https://shorturl.at/QTWZ9">https://shorturl.at/QTWZ9</a>
<b>Precio total [\$]</b>						<b>\$1,133,486</b>			
Muros									
MATERIAL	[\$/m2] 1	[\$/m2] 2	[\$/m2] 3	Precio promedio \$/m2	Área a utilizar [m2]	Precio por elemento	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
3x Poliestireno expandido 10 kg/m3 e30mm	\$ 3.933	\$ 3.360	\$ 4.740	\$ 4.011	93.77	\$ 376.108	<a href="https://shorturl.at/ehsEK">https://shorturl.at/ehsEK</a>	<a href="https://shorturl.at/cE134">https://shorturl.at/cE134</a>	<a href="https://shorturl.at/gpql4">https://shorturl.at/gpql4</a>
<b>Precio total [\$]</b>						<b>\$ 376,108</b>			
Techo									
MATERIAL	[\$/m2] 1	[\$/m2] 2	[\$/m2] 3	Precio promedio \$/m2	Área a utilizar [m2]	Precio por elemento	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
Lana mineral 100 kg/m3 e40mm	\$ 15.794			\$ 15.794	142.48	\$2,250.215	<a href="https://shorturl.at/knrAG">https://shorturl.at/knrAG</a>		
Lana mineral 100 kg/m3 e100mm	\$ 41.565			\$ 41.565	142.48	\$5,921.973	<a href="https://shorturl.at/fuCV">https://shorturl.at/fuCV</a>		
<b>Precio total [\$]</b>						<b>\$8,172,188</b>			
Puerta									
MATERIAL	[\$/m2] 1	[\$/m2] 2	[\$/m2] 3	Precio promedio \$/m2	Área a utilizar [m2]	Precio por elemento	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
Puerta contraplacada HDF 0.8 x 2m	\$ 40.303			\$ 40.303	-	\$ 40.303	<a href="https://shorturl.at/gwJL">https://shorturl.at/gwJL</a>		
<b>Precio total [\$]</b>						<b>\$ 40,303</b>			
Ventanas									
MATERIAL	[\$/m2] 1	[\$/m2] 2	[\$/m2] 3	Precio promedio \$/m2	Área a utilizar [m2]	Precio por elemento	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3
13x Ventana PVC Cristal DVH 1.4 x 1.2	\$ 83.327	\$ 79.756	\$ 240.600	\$ 134.561	1.76	\$3,070.645	<a href="https://shorturl.at/bfKCE">https://shorturl.at/bfKCE</a>	<a href="https://shorturl.at/hkDKP">https://shorturl.at/hkDKP</a>	<a href="https://shorturl.at/vBMT3">https://shorturl.at/vBMT3</a>
Ventana PVC Cristal DVH 0.6 x 0.6	\$ 83.327	\$ 79.756	\$ 240.600	\$ 134.561	0.52	\$ 69.671	<a href="https://shorturl.at/bfKCE">https://shorturl.at/bfKCE</a>	<a href="https://shorturl.at/hkDKP">https://shorturl.at/hkDKP</a>	<a href="https://shorturl.at/vBMT3">https://shorturl.at/vBMT3</a>
Ventana PVC Cristal DVH 0.6 x 1.2	\$ 83.327	\$ 79.756	\$ 240.600	\$ 134.561	0.84	\$ 112.623	<a href="https://shorturl.at/bfKCE">https://shorturl.at/bfKCE</a>	<a href="https://shorturl.at/hkDKP">https://shorturl.at/hkDKP</a>	<a href="https://shorturl.at/vBMT3">https://shorturl.at/vBMT3</a>
2x Ventana PVC Cristal DVH 0.3 x 0.8	\$ 83.327	\$ 79.756	\$ 240.600	\$ 134.561	0.40	\$ 107.585	<a href="https://shorturl.at/bfKCE">https://shorturl.at/bfKCE</a>	<a href="https://shorturl.at/hkDKP">https://shorturl.at/hkDKP</a>	<a href="https://shorturl.at/vBMT3">https://shorturl.at/vBMT3</a>
<b>Precio total [\$]</b>						<b>\$3,360,523</b>			

Tabla C.5: Cotización medida de eficiencia energética: moldura de poliestireno.

Precio tira 2 metros moldura poliestireno	\$ 2,090
Fuente	<a href="https://shorturl.at/bqwGZ">https://shorturl.at/bqwGZ</a>
Perímetro a sellar [m]	59.7
N tiras	30
Precio total	\$ 62,700

Estos resultados están reflejados en resumidamente en la Tabla 4.17, considerando un 30% de costo asociado a instalación.

## C.2. Flujos de caja

### C.2.1. Geotermia Caso BASE

Tabla C.6: Flujo de caja: caso BASE con geotermia con 10% de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 421,887	\$ 448,969	\$ 477,789	\$ 508,459	\$ 541,098	\$ 575,832	\$ 612,796	\$ 652,133	\$ 693,994	\$ 738,543
Ahorro costo calefacción (Leña + GLP)		\$ 965,053	\$ 1,027,002	\$ 1,092,927	\$ 1,163,084	\$ 1,237,745	\$ 1,317,198	\$ 1,401,752	\$ 1,491,733	\$ 1,587,490	\$ 1,689,395
Gasto por electricidad (calefacción)		\$ (10,143,253)	\$ (10,224,387)	\$ (10,306,171)	\$ (10,388,608)	\$ (10,471,705)	\$ (10,555,467)	\$ (10,639,899)	\$ (10,725,007)	\$ (10,810,795)	\$ (10,897,270)
Mantenimiento		\$ (468,600)	\$ (496,716)	\$ (526,519)	\$ (558,110)	\$ (591,597)	\$ (627,093)	\$ (664,718)	\$ (704,601)	\$ (746,877)	\$ (991,690)
Inversión Activo Fijo Geotermia	\$ (75,967,615)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (75,967,615)</b>	<b>\$ (9,224,913)</b>	<b>\$ (9,245,133)</b>	<b>\$ (9,261,974)</b>	<b>\$ (9,275,175)</b>	<b>\$ (9,284,459)</b>	<b>\$ (9,289,529)</b>	<b>\$ (9,290,070)</b>	<b>\$ (9,285,742)</b>	<b>\$ (9,276,188)</b>	<b>\$ (9,461,022)</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (75,967,615)</b>	<b>\$ (85,192,528)</b>	<b>\$ (94,437,661)</b>	<b>\$ (103,699,634)</b>	<b>\$ (112,974,809)</b>	<b>\$ (122,259,269)</b>	<b>\$ (131,548,798)</b>	<b>\$ (140,838,868)</b>	<b>\$ (150,124,610)</b>	<b>\$ (159,400,798)</b>	<b>\$ (168,861,819)</b>

Tabla C.7: Flujo de caja: caso base con geotermia con 10% de tasa de interés por 30 años. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 785,952	\$ 836,404	\$ 890,094	\$ 947,231	\$ 1,008,036	\$ 1,072,744	\$ 1,141,605	\$ 1,214,887	\$ 1,292,873	\$ 1,375,865	\$ 1,464,185	\$ 1,558,174	\$ 1,658,196	\$ 1,764,639	\$ 1,877,915	\$ 1,998,462	\$ 2,126,748	\$ 2,263,268	\$ 2,408,552	\$ 2,563,161
\$ 1,797,840	\$ 1,913,247	\$ 2,036,063	\$ 2,166,761	\$ 2,305,850	\$ 2,453,867	\$ 2,611,386	\$ 2,779,016	\$ 2,957,407	\$ 3,147,249	\$ 3,349,277	\$ 3,564,274	\$ 3,793,072	\$ 4,036,557	\$ 4,295,672	\$ 4,571,419	\$ 4,864,868	\$ 5,177,154	\$ 5,509,486	\$ 5,863,151
\$ (10,984,437)	\$ (11,072,300)	\$ (11,160,867)	\$ (11,250,142)	\$ (11,340,132)	\$ (11,430,841)	\$ (11,522,276)	\$ (11,614,443)	\$ (11,707,347)	\$ (11,800,994)	\$ (11,895,391)	\$ (11,990,543)	\$ (12,086,457)	\$ (12,183,138)	\$ (12,280,592)	\$ (12,378,826)	\$ (12,477,846)	\$ (12,577,658)	\$ (12,678,269)	\$ (12,779,684)
\$ (839,191)	\$ (889,543)	\$ (942,915)	\$ (999,490)	\$ (1,059,469)	\$ (1,123,027)	\$ (1,190,409)	\$ (1,261,833)	\$ (1,337,543)	\$ (1,417,796)	\$ (1,502,864)	\$ (1,593,036)	\$ (1,688,618)	\$ (1,789,935)	\$ (1,897,331)	\$ (2,011,171)	\$ (2,131,841)	\$ (2,259,751)	\$ (2,395,336)	\$ (2,739,057)
\$ (9,239,835)	\$ (9,212,192)	\$ (9,177,626)	\$ (9,135,640)	\$ (9,085,705)	\$ (9,027,257)	\$ (8,959,694)	\$ (8,882,372)	\$ (8,794,610)	\$ (8,695,675)	\$ (8,584,792)	\$ (8,461,131)	\$ (8,323,806)	\$ (8,171,876)	\$ (8,004,336)	\$ (7,820,115)	\$ (7,618,071)	\$ (7,396,988)	\$ (7,155,568)	\$ (7,092,429)
\$ (178,101,655)	\$ (187,313,847)	\$ (196,491,472)	\$ (205,627,112)	\$ (214,712,817)	\$ (223,740,074)	\$ (232,699,768)	\$ (241,582,140)	\$ (250,376,750)	\$ (259,272,425)	\$ (268,267,218)	\$ (276,318,348)	\$ (284,642,155)	\$ (292,814,031)	\$ (300,818,367)	\$ (308,638,483)	\$ (316,256,554)	\$ (323,653,542)	\$ (330,809,110)	\$ (337,901,539)

Tabla C.8: Indicadores económicos Geotermia caso BASE.

<b>VAN (10% anual)</b>	<b>\$ (161,790,877)</b>
<b>TIR</b>	<b>-</b>
<b>Años retorno</b>	<b>-</b>

## C.2.2. Geotermia Caso con EE

Tabla C.9: Flujo de caja: caso con EE con geotermia con 10% de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 421,887	\$ 448,969	\$ 477,789	\$ 508,459	\$ 541,098	\$ 575,832	\$ 612,796	\$ 652,133	\$ 693,994	\$ 738,543
Ahorro costo calefacción (Leña + GLP)		\$ 965,053	\$ 1,027,002	\$ 1,092,927	\$ 1,163,084	\$ 1,237,745	\$ 1,317,198	\$ 1,401,752	\$ 1,491,733	\$ 1,587,490	\$ 1,689,395
Gasto por electricidad (calefacción)		\$ (5,050,403)	\$ (5,090,795)	\$ (5,131,509)	\$ (5,172,550)	\$ (5,213,919)	\$ (5,255,618)	\$ (5,297,651)	\$ (5,340,021)	\$ (5,382,729)	\$ (5,425,780)
Mantención		\$ (255,600)	\$ (270,936)	\$ (287,192)	\$ (304,424)	\$ (322,689)	\$ (342,050)	\$ (362,573)	\$ (384,328)	\$ (407,388)	\$ (431,831)
Inversión Activo medidas EE	\$ (17,088,900)										
Inversión Activo Fijo Geotermia	\$ (44,804,780)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (61,893,680)</b>	<b>\$ (3,919,063)</b>	<b>\$ (3,885,760)</b>	<b>\$ (3,847,986)</b>	<b>\$ (3,805,430)</b>	<b>\$ (3,757,765)</b>	<b>\$ (3,704,638)</b>	<b>\$ (3,645,677)</b>	<b>\$ (3,580,483)</b>	<b>\$ (3,508,632)</b>	<b>\$ (3,629,672)</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (61,893,680)</b>	<b>\$ (65,812,743)</b>	<b>\$ (69,698,504)</b>	<b>\$ (73,546,490)</b>	<b>\$ (77,351,920)</b>	<b>\$ (81,109,685)</b>	<b>\$ (84,814,323)</b>	<b>\$ (88,460,000)</b>	<b>\$ (92,040,483)</b>	<b>\$ (95,549,115)</b>	<b>\$ (99,178,787)</b>

Tabla C.10: Flujo de caja: caso con EE con geotermia con 10% de tasa de interés por 30 años. Continuación

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 785,952	\$ 836,404	\$ 890,091	\$ 947,231	\$ 1,008,036	\$ 1,072,744	\$ 1,141,695	\$ 1,214,887	\$ 1,292,273	\$ 1,373,865	\$ 1,461,185	\$ 1,554,174	\$ 1,652,196	\$ 1,764,639	\$ 1,877,915	\$ 1,998,462	\$ 2,126,748	\$ 2,263,268	\$ 2,408,552	\$ 2,563,161
\$ 1,797,840	\$ 1,913,247	\$ 2,036,063	\$ 2,166,761	\$ 2,305,850	\$ 2,453,807	\$ 2,611,386	\$ 2,779,016	\$ 2,957,407	\$ 3,147,249	\$ 3,349,277	\$ 3,564,274	\$ 3,793,072	\$ 4,036,557	\$ 4,295,672	\$ 4,571,419	\$ 4,864,868	\$ 5,177,154	\$ 5,509,486	\$ 5,863,151
\$ (5,469,174)	\$ (5,512,916)	\$ (5,557,098)	\$ (5,601,452)	\$ (5,646,252)	\$ (5,691,410)	\$ (5,736,930)	\$ (5,782,814)	\$ (5,829,064)	\$ (5,875,685)	\$ (5,922,680)	\$ (5,970,051)	\$ (6,017,801)	\$ (6,065,932)	\$ (6,114,449)	\$ (6,163,354)	\$ (6,212,650)	\$ (6,262,340)	\$ (6,312,428)	\$ (6,362,917)
\$ (457,741)	\$ (485,205)	\$ (514,317)	\$ (545,176)	\$ (577,887)	\$ (612,560)	\$ (649,314)	\$ (688,273)	\$ (729,569)	\$ (773,343)	\$ (819,744)	\$ (868,928)	\$ (921,064)	\$ (976,328)	\$ (1,034,908)	\$ (1,097,002)	\$ (1,162,822)	\$ (1,232,592)	\$ (1,306,547)	\$ (1,384,940)
\$ (3,343,123)	\$ (3,248,470)	\$ (3,145,168)	\$ (3,032,636)	\$ (2,910,253)	\$ (2,777,359)	\$ (2,633,252)	\$ (2,477,183)	\$ (2,308,353)	\$ (2,325,914)	\$ (1,928,962)	\$ (1,716,531)	\$ (1,487,596)	\$ (1,241,064)	\$ (975,770)	\$ (690,474)	\$ (383,857)	\$ (54,510)	\$ 299,062	\$ 478,455
\$ (102,521,910)	\$ (105,770,380)	\$ (108,915,548)	\$ (111,948,184)	\$ (114,858,437)	\$ (117,635,796)	\$ (120,269,048)	\$ (122,746,231)	\$ (125,054,584)	\$ (127,380,498)	\$ (129,309,460)	\$ (131,025,991)	\$ (132,513,587)	\$ (133,754,651)	\$ (134,730,421)	\$ (135,420,895)	\$ (135,804,752)	\$ (135,859,262)	\$ (135,560,201)	\$ (135,081,745)

Tabla C.11: Indicadores económicos Geotermia caso con EE.

<b>VAN (10% anual)</b>	<b>\$ (92,816,715)</b>
<b>TIR</b>	<b>-</b>
<b>Años retorno</b>	<b>-</b>

### C.2.3. Geotermia caso BASE con PV

Tabla C.12: Flujo de caja: caso BASE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 421,887	\$ 448,969	\$ 477,789	\$ 508,459	\$ 541,098	\$ 575,832	\$ 612,796	\$ 652,133	\$ 693,994	\$ 738,543
Ahorro costo calefacción (Leña + GLP)		\$ 965,053	\$ 1,027,002	\$ 1,092,927	\$ 1,163,084	\$ 1,237,745	\$ 1,317,198	\$ 1,401,752	\$ 1,491,733	\$ 1,587,490	\$ 1,689,395
Gasto por electricidad (calefacción)		\$ (10,143,253)	\$ (10,224,387)	\$ (10,306,171)	\$ (10,388,608)	\$ (10,471,705)	\$ (10,555,467)	\$ (10,639,899)	\$ (10,725,007)	\$ (10,810,795)	\$ (10,897,270)
Ingreso generación elect. Restante		\$ 1,793,254	\$ 1,794,731	\$ 1,796,219	\$ 1,797,719	\$ 1,799,231	\$ 1,800,756	\$ 1,802,292	\$ 1,803,841	\$ 1,805,402	\$ 1,806,976
Mantenimiento PV		\$ (886,746)	\$ (939,951)	\$ (996,348)	\$ (1,056,129)	\$ (1,119,497)	\$ (1,186,666)	\$ (1,257,866)	\$ (1,333,338)	\$ (1,413,339)	\$ (1,498,139)
Mantenimiento Geotermia		\$ (468,600)	\$ (496,716)	\$ (526,519)	\$ (558,110)	\$ (591,597)	\$ (627,093)	\$ (664,718)	\$ (704,601)	\$ (746,877)	\$ (991,690)
Inversión Activo Fijo PV 47kW	\$ (44,337,309)										
Inversión Activo Fijo Geotermia	\$ (75,967,615)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (120,304,924)</b>	<b>\$ (8,318,405)</b>	<b>\$ (8,390,353)</b>	<b>\$ (8,462,103)</b>	<b>\$ (8,533,585)</b>	<b>\$ (8,604,724)</b>	<b>\$ (8,675,440)</b>	<b>\$ (8,745,644)</b>	<b>\$ (8,815,239)</b>	<b>\$ (8,884,124)</b>	<b>\$ (9,152,185)</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (120,304,924)</b>	<b>\$ (128,623,329)</b>	<b>\$ (137,013,682)</b>	<b>\$ (145,475,785)</b>	<b>\$ (154,009,370)</b>	<b>\$ (162,614,094)</b>	<b>\$ (171,289,534)</b>	<b>\$ (180,035,178)</b>	<b>\$ (188,850,417)</b>	<b>\$ (197,734,541)</b>	<b>\$ (206,886,726)</b>

Tabla C.13: Flujo de caja: caso BASE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 785,952	\$ 836,404	\$ 890,094	\$ 947,231	\$ 1,008,036	\$ 1,072,744	\$ 1,141,605	\$ 1,214,887	\$ 1,292,873	\$ 1,375,865	\$ 1,464,185	\$ 1,558,174	\$ 1,658,196	\$ 1,764,639	\$ 1,877,915	\$ 1,998,462	\$ 2,126,748	\$ 2,263,268	\$ 2,408,552	\$ 2,563,161
\$ 1,797,840	\$ 1,913,247	\$ 2,036,063	\$ 2,166,761	\$ 2,305,850	\$ 2,453,867	\$ 2,611,386	\$ 2,779,016	\$ 2,957,407	\$ 3,147,249	\$ 3,349,277	\$ 3,564,274	\$ 3,793,072	\$ 4,036,557	\$ 4,295,672	\$ 4,571,419	\$ 4,864,868	\$ 5,177,154	\$ 5,509,486	\$ 5,863,151
\$ (10,384,437)	\$ (11,072,300)	\$ (11,166,867)	\$ (11,250,142)	\$ (11,340,132)	\$ (11,430,841)	\$ (11,522,276)	\$ (11,614,443)	\$ (11,707,347)	\$ (11,801,994)	\$ (11,895,391)	\$ (11,990,543)	\$ (12,086,457)	\$ (12,183,138)	\$ (12,280,592)	\$ (12,378,826)	\$ (12,477,846)	\$ (12,577,658)	\$ (12,678,269)	\$ (12,779,684)
\$ 1,808,563	\$ 1,810,162	\$ 1,811,773	\$ 1,813,398	\$ 1,815,036	\$ 1,816,687	\$ 1,818,351	\$ 1,820,028	\$ 1,821,719	\$ 1,823,425	\$ 1,826,243	\$ 1,829,076	\$ 1,831,921	\$ 1,834,785	\$ 1,837,661	\$ 1,840,550	\$ 1,843,454	\$ 1,846,373	\$ 1,849,305	\$ 1,852,251
\$ (1,588,027)	\$ (1,683,309)	\$ (1,784,308)	\$ (1,891,366)	\$ (2,004,848)	\$ (2,125,139)	\$ (2,252,647)	\$ (2,387,806)	\$ (2,531,074)	\$ (2,682,939)	\$ (2,843,915)	\$ (3,014,550)	\$ (3,195,423)	\$ (3,387,148)	\$ (3,590,377)	\$ (3,805,800)	\$ (4,034,148)	\$ (4,276,197)	\$ (4,532,709)	\$ (4,804,735)
\$ (839,191)	\$ (889,543)	\$ (942,915)	\$ (999,490)	\$ (1,059,460)	\$ (1,123,027)	\$ (1,190,409)	\$ (1,261,833)	\$ (1,337,543)	\$ (1,417,796)	\$ (1,502,864)	\$ (1,593,036)	\$ (1,688,618)	\$ (1,789,935)	\$ (1,897,331)	\$ (2,011,171)	\$ (2,131,841)	\$ (2,259,751)	\$ (2,395,336)	\$ (2,739,057)
<b>\$ (9,019,300)</b>	<b>\$ (9,085,339)</b>	<b>\$ (9,150,160)</b>	<b>\$ (9,213,608)</b>	<b>\$ (9,275,517)</b>	<b>\$ (9,335,709)</b>	<b>\$ (9,393,990)</b>	<b>\$ (9,450,151)</b>	<b>\$ (9,503,965)</b>	<b>\$ (9,555,191)</b>	<b>\$ (9,602,465)</b>	<b>\$ (9,646,605)</b>	<b>\$ (9,687,306)</b>	<b>\$ (9,724,240)</b>	<b>\$ (9,757,053)</b>	<b>\$ (9,785,365)</b>	<b>\$ (9,808,765)</b>	<b>\$ (9,826,812)</b>	<b>\$ (9,839,031)</b>	<b>\$ (10,044,910)</b>
<b>\$ (215,906,026)</b>	<b>\$ (224,991,365)</b>	<b>\$ (234,141,525)</b>	<b>\$ (243,355,133)</b>	<b>\$ (252,630,650)</b>	<b>\$ (261,966,359)</b>	<b>\$ (271,360,349)</b>	<b>\$ (280,810,500)</b>	<b>\$ (290,314,465)</b>	<b>\$ (300,069,656)</b>	<b>\$ (309,672,121)</b>	<b>\$ (319,318,726)</b>	<b>\$ (329,006,031)</b>	<b>\$ (338,730,271)</b>	<b>\$ (348,487,324)</b>	<b>\$ (358,272,689)</b>	<b>\$ (368,081,454)</b>	<b>\$ (377,908,267)</b>	<b>\$ (387,747,298)</b>	<b>\$ (397,792,208)</b>

Tabla C.14: Indicadores económicos Geotermia caso BASE con PV.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ (203,970,143)</b>
<b>TIR</b>	<b>-</b>
<b>Años retorno</b>	<b>-</b>

## C.2.4. Geotermia caso con EE con PV

Tabla C.15: Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro costo social ton CO <sub>2</sub> eq		\$ 421,887	\$ 448,969	\$ 477,789	\$ 508,459	\$ 541,098	\$ 575,832	\$ 612,796	\$ 652,133	\$ 693,994	\$ 738,543
Ahorro costo calefacción (Leña + GLP)		\$ 965,053	\$ 1,027,002	\$ 1,092,927	\$ 1,163,084	\$ 1,237,745	\$ 1,317,198	\$ 1,401,752	\$ 1,491,733	\$ 1,587,490	\$ 1,689,395
Gasto por electricidad (calefacción)		\$ (5,050,403)	\$ (5,090,795)	\$ (5,131,509)	\$ (5,172,550)	\$ (5,213,919)	\$ (5,255,618)	\$ (5,297,651)	\$ (5,340,021)	\$ (5,382,729)	\$ (5,425,780)
Ingreso generación elect. Restante		\$ 42,579	\$ 42,614	\$ 42,650	\$ 42,685	\$ 42,721	\$ 42,757	\$ 42,794	\$ 42,831	\$ 42,868	\$ 42,905
Mantenión Geotermia		\$ (255,600)	\$ (270,936)	\$ (287,192)	\$ (304,424)	\$ (322,689)	\$ (342,050)	\$ (362,573)	\$ (384,328)	\$ (407,388)	\$ (431,831)
Mantenión PV		\$ (471,822)	\$ (500,131)	\$ (530,139)	\$ (561,948)	\$ (595,664)	\$ (631,404)	\$ (669,289)	\$ (709,446)	\$ (752,013)	\$ (797,133)
Inversión Activo PV 23kW	\$ (23,591,100)										
Inversión Activo medidas EE	\$ (17,088,900)										
Inversión Activo Fijo Geotermia	\$ (44,804,780)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (85,484,780)</b>	<b>\$ (4,348,306)</b>	<b>\$ (4,343,277)</b>	<b>\$ (4,335,475)</b>	<b>\$ (4,324,692)</b>	<b>\$ (4,310,708)</b>	<b>\$ (4,293,285)</b>	<b>\$ (4,272,172)</b>	<b>\$ (4,247,098)</b>	<b>\$ (4,217,777)</b>	<b>\$ (4,183,901)</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (85,484,780)</b>	<b>\$ (89,833,086)</b>	<b>\$ (94,176,364)</b>	<b>\$ (98,511,839)</b>	<b>\$ (102,836,531)</b>	<b>\$ (107,147,239)</b>	<b>\$ (111,440,524)</b>	<b>\$ (115,712,696)</b>	<b>\$ (119,959,794)</b>	<b>\$ (124,177,571)</b>	<b>\$ (128,561,471)</b>

Tabla C.16: Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema fotovoltaico (PV) con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 755,952	\$ 836,404	\$ 890,094	\$ 947,231	\$ 1,008,036	\$ 1,072,744	\$ 1,141,695	\$ 1,214,887	\$ 1,292,273	\$ 1,373,865	\$ 1,461,185	\$ 1,553,174	\$ 1,650,196	\$ 1,764,639	\$ 1,877,915	\$ 1,998,462	\$ 2,126,748	\$ 2,263,288	\$ 2,408,552	\$ 2,563,161
\$ 1,797,840	\$ 1,913,247	\$ 2,036,063	\$ 2,166,761	\$ 2,305,850	\$ 2,453,807	\$ 2,611,386	\$ 2,779,016	\$ 2,957,407	\$ 3,147,249	\$ 3,349,277	\$ 3,564,274	\$ 3,793,072	\$ 4,036,557	\$ 4,295,672	\$ 4,571,419	\$ 4,864,868	\$ 5,177,154	\$ 5,509,486	\$ 5,863,151
\$ (5,469,174)	\$ (5,512,916)	\$ (5,557,098)	\$ (5,601,452)	\$ (5,646,252)	\$ (5,691,410)	\$ (5,736,930)	\$ (5,782,814)	\$ (5,829,064)	\$ (5,875,685)	\$ (5,922,680)	\$ (5,970,051)	\$ (6,017,801)	\$ (6,065,932)	\$ (6,114,449)	\$ (6,163,354)	\$ (6,212,650)	\$ (6,262,340)	\$ (6,312,428)	\$ (6,362,917)
\$ 42,943	\$ 42,981	\$ 43,019	\$ 43,058	\$ 43,097	\$ 43,136	\$ 43,175	\$ 43,215	\$ 43,255	\$ 43,296	\$ 43,363	\$ 43,430	\$ 43,497	\$ 43,565	\$ 43,634	\$ 43,702	\$ 43,771	\$ 43,841	\$ 43,910	\$ 43,980
\$ (457,741)	\$ (485,205)	\$ (514,317)	\$ (545,176)	\$ (577,887)	\$ (612,560)	\$ (649,314)	\$ (688,273)	\$ (729,569)	\$ (773,343)	\$ (819,744)	\$ (868,928)	\$ (921,064)	\$ (976,328)	\$ (1,034,908)	\$ (1,097,002)	\$ (1,162,822)	\$ (1,232,502)	\$ (1,306,547)	\$ (1,584,940)
\$ (844,961)	\$ (895,659)	\$ (949,399)	\$ (1,006,362)	\$ (1,066,744)	\$ (1,130,749)	\$ (1,198,594)	\$ (1,270,509)	\$ (1,346,740)	\$ (1,427,544)	\$ (1,513,197)	\$ (1,603,989)	\$ (1,700,228)	\$ (1,802,242)	\$ (1,910,376)	\$ (2,024,999)	\$ (2,146,499)	\$ (2,275,289)	\$ (2,411,806)	\$ (2,556,515)
<b>\$ (4,145,141)</b>	<b>\$ (4,101,148)</b>	<b>\$ (4,051,548)</b>	<b>\$ (3,995,941)</b>	<b>\$ (3,933,900)</b>	<b>\$ (3,864,972)</b>	<b>\$ (3,788,671)</b>	<b>\$ (3,704,477)</b>	<b>\$ (3,611,838)</b>	<b>\$ (3,510,163)</b>	<b>\$ (3,398,796)</b>	<b>\$ (3,277,090)</b>	<b>\$ (3,144,327)</b>	<b>\$ (2,999,740)</b>	<b>\$ (2,842,513)</b>	<b>\$ (2,671,771)</b>	<b>\$ (2,486,584)</b>	<b>\$ (2,285,959)</b>	<b>\$ (2,068,834)</b>	<b>\$ (2,034,079)</b>
<b>\$ (132,706,613)</b>	<b>\$ (136,807,761)</b>	<b>\$ (140,859,308)</b>	<b>\$ (144,855,249)</b>	<b>\$ (148,789,150)</b>	<b>\$ (152,654,122)</b>	<b>\$ (156,442,793)</b>	<b>\$ (160,147,270)</b>	<b>\$ (163,759,108)</b>	<b>\$ (167,469,271)</b>	<b>\$ (170,868,067)</b>	<b>\$ (174,145,157)</b>	<b>\$ (177,289,484)</b>	<b>\$ (180,289,225)</b>	<b>\$ (183,131,737)</b>	<b>\$ (185,803,508)</b>	<b>\$ (188,290,092)</b>	<b>\$ (190,576,051)</b>	<b>\$ (192,644,885)</b>	<b>\$ (194,678,965)</b>

Tabla C.17: Indicadores económicos Geotermia caso con EE con PV.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ (123,916,486)</b>
<b>TIR</b>	<b>-</b>
<b>Años retorno</b>	<b>-</b>

## C.2.5. Geotermia caso con EE con Eólica

Tabla C.18: Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema de aerogenerador (Eólico) con 10% de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 421,887	\$ 448,969	\$ 477,789	\$ 508,459	\$ 541,098	\$ 575,832	\$ 612,796	\$ 652,133	\$ 693,994	\$ 738,543
Ahorro costo calefacción (Leña + GLP)		\$ 965,053	\$ 1,027,002	\$ 1,092,927	\$ 1,163,084	\$ 1,237,745	\$ 1,317,198	\$ 1,401,752	\$ 1,491,733	\$ 1,587,490	\$ 1,689,395
Gasto por electricidad (calefacción)		\$ (5,050,403)	\$ (5,090,795)	\$ (5,131,509)	\$ (5,172,550)	\$ (5,213,919)	\$ (5,255,618)	\$ (5,297,651)	\$ (5,340,021)	\$ (5,382,729)	\$ (5,425,780)
Ingreso generación elect. Restante		\$ 9,416,079	\$ 9,423,832	\$ 9,431,647	\$ 9,439,525	\$ 9,447,465	\$ 9,455,469	\$ 9,463,538	\$ 9,471,671	\$ 9,479,868	\$ 9,488,132
Mantenión Geotermia		\$ (255,600)	\$ (270,936)	\$ (287,192)	\$ (304,424)	\$ (322,689)	\$ (342,050)	\$ (362,573)	\$ (384,328)	\$ (407,388)	\$ (431,000)
Mantenión Eólico		\$ 1,201,550	\$ 1,273,644	\$ 1,350,062	\$ 1,431,066	\$ 1,516,930	\$ 1,607,946	\$ 1,704,422	\$ 1,806,688	\$ 1,915,089	\$ 2,029,994
Inversión Activo Eólico 60kW	\$ (60,077,524)										
Inversión Activo medidas EE	\$ (17,088,900)										
Inversión Activo Fijo Geotermia	\$ (44,804,780)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (121,971,204)</b>	<b>\$ 6,698,566</b>	<b>\$ 6,811,715</b>	<b>\$ 6,933,723</b>	<b>\$ 7,065,160</b>	<b>\$ 7,206,630</b>	<b>\$ 7,358,777</b>	<b>\$ 7,522,283</b>	<b>\$ 7,697,875</b>	<b>\$ 7,886,325</b>	<b>\$ 7,888,454</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (121,971,204)</b>	<b>\$ (115,272,638)</b>	<b>\$ (108,460,923)</b>	<b>\$ (101,527,200)</b>	<b>\$ (94,462,039)</b>	<b>\$ (87,255,409)</b>	<b>\$ (79,896,632)</b>	<b>\$ (72,374,349)</b>	<b>\$ (64,676,474)</b>	<b>\$ (56,790,149)</b>	<b>\$ (48,901,695)</b>

Tabla C.19: Flujo de caja: caso con EE con geotermia hibridado sistema de aerogenerador (Eólico) con 10% de tasa de interés por 30 años. Continuación

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 785,952	\$ 836,404	\$ 890,094	\$ 947,231	\$ 1,008,036	\$ 1,072,744	\$ 1,141,605	\$ 1,214,887	\$ 1,292,873	\$ 1,375,865	\$ 1,464,185	\$ 1,558,174	\$ 1,658,196	\$ 1,764,639	\$ 1,877,915	\$ 1,998,462	\$ 2,126,748	\$ 2,263,268	\$ 2,408,552	\$ 2,563,161
\$ 1,797,840	\$ 1,913,247	\$ 2,036,063	\$ 2,166,761	\$ 2,305,850	\$ 2,453,867	\$ 2,611,386	\$ 2,779,016	\$ 2,957,407	\$ 3,147,249	\$ 3,349,277	\$ 3,564,274	\$ 3,793,072	\$ 4,036,557	\$ 4,295,672	\$ 4,571,419	\$ 4,864,868	\$ 5,177,154	\$ 5,509,486	\$ 5,863,151
\$ (5,469,174)	\$ (5,512,916)	\$ (5,557,008)	\$ (5,601,452)	\$ (5,646,252)	\$ (5,691,410)	\$ (5,736,930)	\$ (5,782,814)	\$ (5,829,064)	\$ (5,875,685)	\$ (5,922,680)	\$ (5,970,051)	\$ (6,017,801)	\$ (6,065,932)	\$ (6,114,449)	\$ (6,163,354)	\$ (6,212,650)	\$ (6,262,340)	\$ (6,312,428)	\$ (6,362,917)
\$ 9,496,461	\$ 9,504,857	\$ 9,513,321	\$ 9,521,852	\$ 9,530,451	\$ 9,539,119	\$ 9,547,857	\$ 9,556,664	\$ 9,565,542	\$ 9,574,491	\$ 9,589,297	\$ 9,604,176	\$ 9,619,127	\$ 9,634,152	\$ 9,649,250	\$ 9,664,423	\$ 9,679,671	\$ 9,694,995	\$ 9,710,395	\$ 9,725,872
\$ (457,741)	\$ (485,205)	\$ (514,317)	\$ (545,176)	\$ (577,887)	\$ (612,560)	\$ (649,314)	\$ (688,273)	\$ (729,569)	\$ (773,343)	\$ (819,744)	\$ (868,928)	\$ (921,064)	\$ (976,328)	\$ (1,034,908)	\$ (1,097,002)	\$ (1,162,822)	\$ (1,232,592)	\$ (1,306,547)	\$ (1,584,940)
\$ 2,151,794	\$ 2,280,902	\$ 2,417,756	\$ 2,562,821	\$ 2,716,590	\$ 2,879,586	\$ 3,052,361	\$ 3,235,502	\$ 3,429,633	\$ 3,635,411	\$ 3,853,535	\$ 4,084,747	\$ 4,329,832	\$ 4,589,622	\$ 4,864,999	\$ 5,156,899	\$ 5,466,313	\$ 5,794,292	\$ 6,141,950	\$ 6,510,467
\$ 8,305,133	\$ 8,537,289	\$ 8,785,908	\$ 9,052,037	\$ 9,336,789	\$ 9,641,346	\$ 9,966,965	\$ 10,314,984	\$ 10,686,821	\$ 10,883,987	\$ 11,513,870	\$ 11,972,392	\$ 12,461,363	\$ 12,982,710	\$ 13,538,480	\$ 14,130,848	\$ 14,762,128	\$ 15,434,777	\$ 16,151,407	\$ 16,714,794
\$ (40,596,563)	\$ (32,059,274)	\$ (23,273,365)	\$ (14,221,328)	\$ (4,884,540)	\$ 4,756,806	\$ 14,723,771	\$ 25,038,754	\$ 35,725,576	\$ 46,609,562	\$ 58,123,433	\$ 70,095,825	\$ 82,557,187	\$ 95,539,897	\$ 109,078,376	\$ 123,209,225	\$ 137,971,353	\$ 153,406,129	\$ 169,557,536	\$ 186,272,330

Tabla C.20: Indicadores económicos Geotermia caso con EE con Eólico.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ (43,321,815)</b>
<b>TIR</b>	<b>6 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>16</b>

## C.2.6. Medidas EE

Tabla C.21: Flujo de caja: caso solo medidas de eficiencia energética (EE) con 10% de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Inversión Activo Fijo	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (17,088,900)</b>	<b>\$ 937,311</b>	<b>\$ 997,479</b>	<b>\$ 1,061,509</b>	<b>\$ 1,129,649</b>	<b>\$ 1,202,164</b>	<b>\$ 1,279,333</b>	<b>\$ 1,361,456</b>	<b>\$ 1,448,851</b>	<b>\$ 1,541,855</b>	<b>\$ 1,640,830</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (17,088,900)</b>	<b>\$ (16,151,589)</b>	<b>\$ (15,154,110)</b>	<b>\$ (14,092,601)</b>	<b>\$ (12,962,952)</b>	<b>\$ (11,760,788)</b>	<b>\$ (10,481,455)</b>	<b>\$ (9,119,999)</b>	<b>\$ (7,671,148)</b>	<b>\$ (6,129,293)</b>	<b>\$ (4,488,463)</b>

Tabla C.22: Flujo de caja: caso solo medidas de eficiencia energética (EE) con 10% de tasa de interés por 30 años.  
Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
<b>\$ 1,746,158</b>	<b>\$ 1,858,248</b>	<b>\$ 1,977,532</b>	<b>\$ 2,104,474</b>	<b>\$ 2,239,565</b>	<b>\$ 2,383,327</b>	<b>\$ 2,536,317</b>	<b>\$ 2,699,129</b>	<b>\$ 2,872,391</b>	<b>\$ 3,056,776</b>	<b>\$ 3,252,997</b>	<b>\$ 3,461,813</b>	<b>\$ 3,684,034</b>	<b>\$ 3,920,519</b>	<b>\$ 4,172,185</b>	<b>\$ 4,440,006</b>	<b>\$ 4,725,019</b>	<b>\$ 5,028,328</b>	<b>\$ 5,351,106</b>	<b>\$ 5,694,605</b>
<b>\$ (2,742,304)</b>	<b>\$ (884,057)</b>	<b>\$ 1,093,476</b>	<b>\$ 3,197,950</b>	<b>\$ 5,437,515</b>	<b>\$ 7,820,842</b>	<b>\$ 10,357,159</b>	<b>\$ 13,056,288</b>	<b>\$ 15,928,679</b>	<b>\$ 18,985,455</b>	<b>\$ 22,238,452</b>	<b>\$ 25,700,265</b>	<b>\$ 29,384,299</b>	<b>\$ 33,304,818</b>	<b>\$ 37,477,003</b>	<b>\$ 41,917,009</b>	<b>\$ 46,642,029</b>	<b>\$ 51,670,356</b>	<b>\$ 57,021,463</b>	<b>\$ 62,716,067</b>

Tabla C.23: Indicadores económicos medidas EE.

<b>VAN (10% anual)</b>	<b>\$ (611,783)</b>
<b>TIR</b>	<b>10%</b>
<b>Años retorno</b>	<b>13</b>

## C.2.7. Medidas EE con PV

Tabla C.24: Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado PV con 10 % de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO <sub>2</sub> eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 1,205,824	\$ 1,206,817	\$ 1,207,818	\$ 1,208,826	\$ 1,209,843	\$ 1,210,868	\$ 1,211,901	\$ 1,212,943	\$ 1,213,993	\$ 1,215,051
Costo de mantención		\$ (51,175)	\$ (54,245)	\$ (57,500)	\$ (60,950)	\$ (64,607)	\$ (68,483)	\$ (72,592)	\$ (76,948)	\$ (81,565)	\$ (86,459)
Inversión Activo PV 2kW	\$ (2,558,734)										
Inversión Activo Fijo medidas EE	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ 2,091,960</b>	<b>\$ 2,150,050</b>	<b>\$ 2,211,827</b>	<b>\$ 2,277,526</b>	<b>\$ 2,347,400</b>	<b>\$ 2,421,718</b>	<b>\$ 2,500,765</b>	<b>\$ 2,584,846</b>	<b>\$ 2,674,283</b>	<b>\$ 2,769,423</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ (17,555,674)</b>	<b>\$ (15,405,624)</b>	<b>\$ (13,193,797)</b>	<b>\$ (10,916,271)</b>	<b>\$ (8,568,871)</b>	<b>\$ (6,147,153)</b>	<b>\$ (3,646,388)</b>	<b>\$ (1,061,542)</b>	<b>\$ 1,612,742</b>	<b>\$ 4,382,164</b>

Tabla C.25: Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado PV con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 1,216,118	\$ 1,217,193	\$ 1,218,277	\$ 1,219,369	\$ 1,220,470	\$ 1,221,580	\$ 1,222,699	\$ 1,223,827	\$ 1,224,964	\$ 1,226,110	\$ 1,228,006	\$ 1,229,912	\$ 1,231,826	\$ 1,233,750	\$ 1,235,684	\$ 1,237,627	\$ 1,239,580	\$ 1,241,542	\$ 1,243,514	\$ 1,245,496
\$ (91,646)	\$ (97,145)	\$ (102,974)	\$ (109,152)	\$ (115,701)	\$ (122,643)	\$ (130,002)	\$ (137,802)	\$ (146,070)	\$ (154,834)	\$ (164,124)	\$ (173,972)	\$ (184,410)	\$ (195,474)	\$ (207,203)	\$ (219,635)	\$ (232,813)	\$ (246,782)	\$ (261,589)	\$ (277,284)
<b>\$ 2,870,630</b>	<b>\$ 2,978,296</b>	<b>\$ 3,092,836</b>	<b>\$ 3,214,692</b>	<b>\$ 3,344,334</b>	<b>\$ 3,482,264</b>	<b>\$ 3,629,015</b>	<b>\$ 3,785,154</b>	<b>\$ 3,951,286</b>	<b>\$ 4,128,052</b>	<b>\$ 4,316,879</b>	<b>\$ 4,517,753</b>	<b>\$ 4,731,450</b>	<b>\$ 4,958,795</b>	<b>\$ 5,200,666</b>	<b>\$ 5,457,998</b>	<b>\$ 5,731,786</b>	<b>\$ 6,023,088</b>	<b>\$ 6,333,031</b>	<b>\$ 6,662,816</b>
<b>\$ 7,252,794</b>	<b>\$ 10,231,090</b>	<b>\$ 13,323,926</b>	<b>\$ 16,538,617</b>	<b>\$ 19,882,951</b>	<b>\$ 23,365,215</b>	<b>\$ 26,994,231</b>	<b>\$ 30,779,385</b>	<b>\$ 34,730,670</b>	<b>\$ 38,858,722</b>	<b>\$ 43,175,601</b>	<b>\$ 47,693,354</b>	<b>\$ 52,424,804</b>	<b>\$ 57,383,599</b>	<b>\$ 62,584,265</b>	<b>\$ 68,042,263</b>	<b>\$ 73,774,049</b>	<b>\$ 79,797,136</b>	<b>\$ 86,130,168</b>	<b>\$ 92,792,984</b>

Tabla C.26: Indicadores económicos medidas EE con PV.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 7,422,476</b>
<b>TIR</b>	<b>13 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>9</b>

## C.2.8. Medidas EE con Eólica

Tabla C.27: Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado Eólica con 10 % de tasa de interés por 30 años.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 1,055,295	\$ 1,056,164	\$ 1,057,040	\$ 1,057,923	\$ 1,058,813	\$ 1,059,710	\$ 1,060,614	\$ 1,061,525	\$ 1,062,444	\$ 1,063,370
Costo de mantención		\$ (60,078)	\$ (63,682)	\$ (67,503)	\$ (71,553)	\$ (75,846)	\$ (80,397)	\$ (85,221)	\$ (90,334)	\$ (95,754)	\$ (101,500)
Inversión Activo E 3kW	\$ (3,003,876)										
Inversión Activo Fijo	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ 1,932,528</b>	<b>\$ 1,989,961</b>	<b>\$ 2,051,046</b>	<b>\$ 2,116,019</b>	<b>\$ 2,185,130</b>	<b>\$ 2,258,646</b>	<b>\$ 2,336,849</b>	<b>\$ 2,420,042</b>	<b>\$ 2,508,545</b>	<b>\$ 2,602,701</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ (18,160,248)</b>	<b>\$ (16,170,287)</b>	<b>\$ (14,119,242)</b>	<b>\$ (12,003,223)</b>	<b>\$ (9,818,093)</b>	<b>\$ (7,559,448)</b>	<b>\$ (5,222,599)</b>	<b>\$ (2,802,557)</b>	<b>\$ (294,012)</b>	<b>\$ 2,308,689</b>

Tabla C.28: Flujo de caja: caso con medidas de eficiencia energética (EE) hibridado Eólica con 10 % de tasa de interés por 30 años. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 1,064,304	\$ 1,065,245	\$ 1,066,193	\$ 1,067,149	\$ 1,068,113	\$ 1,069,085	\$ 1,070,064	\$ 1,071,051	\$ 1,072,046	\$ 1,073,049	\$ 1,074,708	\$ 1,076,376	\$ 1,078,051	\$ 1,079,735	\$ 1,081,427	\$ 1,083,128	\$ 1,084,837	\$ 1,086,554	\$ 1,088,280	\$ 1,090,015
\$ (107,590)	\$ (114,045)	\$ (120,888)	\$ (128,141)	\$ (135,830)	\$ (143,979)	\$ (152,618)	\$ (161,775)	\$ (171,482)	\$ (181,771)	\$ (192,677)	\$ (204,237)	\$ (216,492)	\$ (229,481)	\$ (243,250)	\$ (257,845)	\$ (273,316)	\$ (289,715)	\$ (307,097)	\$ (325,523)
<b>\$ 2,702,872</b>	<b>\$ 2,809,447</b>	<b>\$ 2,922,838</b>	<b>\$ 3,043,483</b>	<b>\$ 3,171,848</b>	<b>\$ 3,308,432</b>	<b>\$ 3,453,763</b>	<b>\$ 3,608,405</b>	<b>\$ 3,772,956</b>	<b>\$ 3,948,054</b>	<b>\$ 4,135,028</b>	<b>\$ 4,333,951</b>	<b>\$ 4,545,593</b>	<b>\$ 4,770,773</b>	<b>\$ 5,010,363</b>	<b>\$ 5,265,289</b>	<b>\$ 5,536,540</b>	<b>\$ 5,825,167</b>	<b>\$ 6,132,289</b>	<b>\$ 6,459,096</b>
<b>\$ 5,011,561</b>	<b>\$ 7,821,009</b>	<b>\$ 10,743,847</b>	<b>\$ 13,787,329</b>	<b>\$ 16,959,178</b>	<b>\$ 20,267,610</b>	<b>\$ 23,721,373</b>	<b>\$ 27,329,778</b>	<b>\$ 31,102,733</b>	<b>\$ 35,050,787</b>	<b>\$ 39,185,815</b>	<b>\$ 43,519,767</b>	<b>\$ 48,065,360</b>	<b>\$ 52,836,134</b>	<b>\$ 57,846,496</b>	<b>\$ 63,111,786</b>	<b>\$ 68,648,326</b>	<b>\$ 74,473,493</b>	<b>\$ 80,605,782</b>	<b>\$ 87,064,878</b>

Tabla C.29: Indicadores económicos medidas EE con Eólica.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 5,398,506</b>
<b>TIR</b>	<b>12 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>10</b>

### C.2.9. Análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV

Tabla C.30: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 964,659	\$ 965,453	\$ 966,254	\$ 967,061	\$ 967,875	\$ 968,695	\$ 969,521	\$ 970,354	\$ 971,194	\$ 972,041
Costo de mantención		\$ (51,175)	\$ (54,245)	\$ (57,500)	\$ (60,950)	\$ (64,607)	\$ (68,483)	\$ (72,592)	\$ (76,948)	\$ (81,565)	\$ (86,459)
Inversión Activo PV 2kW	\$ (2,558,734)										
Inversión Activo Fijo medidas EE	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ 1,850,795</b>	<b>\$ 1,908,687</b>	<b>\$ 1,970,263</b>	<b>\$ 2,035,761</b>	<b>\$ 2,105,432</b>	<b>\$ 2,179,544</b>	<b>\$ 2,258,385</b>	<b>\$ 2,342,257</b>	<b>\$ 2,431,485</b>	<b>\$ 2,526,412</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ (17,796,839)</b>	<b>\$ (15,888,152)</b>	<b>\$ (13,917,889)</b>	<b>\$ (11,882,128)</b>	<b>\$ (9,776,697)</b>	<b>\$ (7,597,152)</b>	<b>\$ (5,338,767)</b>	<b>\$ (2,996,510)</b>	<b>\$ (565,025)</b>	<b>\$ 1,961,387</b>

Tabla C.31: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad PV. Continuación

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 972,894	\$ 973,754	\$ 974,621	\$ 975,495	\$ 976,376	\$ 977,264	\$ 978,159	\$ 979,062	\$ 979,971	\$ 980,888	\$ 982,405	\$ 983,929	\$ 985,461	\$ 987,000	\$ 988,547	\$ 990,101	\$ 991,664	\$ 993,234	\$ 994,811	\$ 996,397
\$ (91,646)	\$ (97,145)	\$ (102,974)	\$ (109,152)	\$ (115,701)	\$ (122,643)	\$ (130,002)	\$ (137,802)	\$ (146,070)	\$ (154,834)	\$ (164,124)	\$ (173,972)	\$ (184,410)	\$ (195,474)	\$ (207,203)	\$ (219,635)	\$ (232,813)	\$ (246,782)	\$ (261,589)	\$ (277,284)
<b>\$ 2,627,406</b>	<b>\$ 2,734,857</b>	<b>\$ 2,849,180</b>	<b>\$ 2,970,818</b>	<b>\$ 3,100,240</b>	<b>\$ 3,237,948</b>	<b>\$ 3,384,475</b>	<b>\$ 3,540,389</b>	<b>\$ 3,706,293</b>	<b>\$ 3,882,830</b>	<b>\$ 4,071,277</b>	<b>\$ 4,271,771</b>	<b>\$ 4,485,085</b>	<b>\$ 4,712,045</b>	<b>\$ 4,953,529</b>	<b>\$ 5,210,473</b>	<b>\$ 5,483,870</b>	<b>\$ 5,774,779</b>	<b>\$ 6,084,329</b>	<b>\$ 6,413,717</b>
<b>\$ 4,588,794</b>	<b>\$ 7,323,651</b>	<b>\$ 10,172,831</b>	<b>\$ 13,143,649</b>	<b>\$ 16,243,889</b>	<b>\$ 19,481,837</b>	<b>\$ 22,866,312</b>	<b>\$ 26,406,701</b>	<b>\$ 30,112,994</b>	<b>\$ 33,995,824</b>	<b>\$ 38,067,101</b>	<b>\$ 42,338,872</b>	<b>\$ 46,823,957</b>	<b>\$ 51,536,002</b>	<b>\$ 56,489,531</b>	<b>\$ 61,700,004</b>	<b>\$ 67,183,873</b>	<b>\$ 72,958,653</b>	<b>\$ 79,042,981</b>	<b>\$ 85,456,699</b>

Tabla C.32: Indicadores económicos sensibilidad Netbilling 20 % PV.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 5,132,225</b>
<b>TIR</b>	<b>12 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>10</b>

## C.2.10. Análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico

Tabla C.33: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 844,236	\$ 844,931	\$ 845,632	\$ 846,338	\$ 847,050	\$ 847,768	\$ 848,491	\$ 849,220	\$ 849,955	\$ 850,696
Costo de mantención		\$ (60,078)	\$ (63,682)	\$ (67,503)	\$ (71,553)	\$ (75,846)	\$ (80,397)	\$ (85,221)	\$ (90,334)	\$ (95,754)	\$ (101,500)
Inversión Activo E 3kW	\$ (3,003,876)										
Inversión Activo Fijo	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ 1,721,469</b>	<b>\$ 1,778,728</b>	<b>\$ 1,839,638</b>	<b>\$ 1,904,434</b>	<b>\$ 1,973,367</b>	<b>\$ 2,046,704</b>	<b>\$ 2,124,726</b>	<b>\$ 2,207,737</b>	<b>\$ 2,296,056</b>	<b>\$ 2,390,027</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ (18,371,307)</b>	<b>\$ (16,592,579)</b>	<b>\$ (14,752,941)</b>	<b>\$ (12,848,507)</b>	<b>\$ (10,875,140)</b>	<b>\$ (8,828,436)</b>	<b>\$ (6,703,710)</b>	<b>\$ (4,495,974)</b>	<b>\$ (2,199,917)</b>	<b>\$ 190,109</b>

Tabla C.34: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 20 % menos costo electricidad Eólico. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 851,443	\$ 852,196	\$ 852,955	\$ 853,720	\$ 854,491	\$ 855,268	\$ 856,051	\$ 856,841	\$ 857,637	\$ 858,439	\$ 859,247	\$ 860,061	\$ 860,881	\$ 861,706	\$ 862,536	\$ 863,371	\$ 864,211	\$ 865,056	\$ 865,906	\$ 866,761
\$ (107,590)	\$ (114,045)	\$ (120,888)	\$ (128,141)	\$ (135,830)	\$ (143,979)	\$ (152,618)	\$ (161,775)	\$ (171,482)	\$ (181,771)	\$ (192,677)	\$ (204,237)	\$ (216,492)	\$ (229,481)	\$ (243,250)	\$ (257,845)	\$ (273,316)	\$ (289,715)	\$ (307,097)	\$ (325,523)
<b>\$ 2,490,012</b>	<b>\$ 2,596,399</b>	<b>\$ 2,709,599</b>	<b>\$ 2,830,053</b>	<b>\$ 2,958,226</b>	<b>\$ 3,094,615</b>	<b>\$ 3,239,750</b>	<b>\$ 3,394,194</b>	<b>\$ 3,558,546</b>	<b>\$ 3,733,444</b>	<b>\$ 3,920,086</b>	<b>\$ 4,118,676</b>	<b>\$ 4,329,983</b>	<b>\$ 4,554,826</b>	<b>\$ 4,794,077</b>	<b>\$ 5,048,664</b>	<b>\$ 5,319,573</b>	<b>\$ 5,607,857</b>	<b>\$ 5,914,633</b>	<b>\$ 6,241,093</b>
<b>\$ 2,680,121</b>	<b>\$ 5,276,520</b>	<b>\$ 7,986,119</b>	<b>\$ 10,816,172</b>	<b>\$ 13,774,397</b>	<b>\$ 16,869,013</b>	<b>\$ 20,108,763</b>	<b>\$ 23,502,958</b>	<b>\$ 27,061,504</b>	<b>\$ 30,794,948</b>	<b>\$ 34,715,035</b>	<b>\$ 38,833,711</b>	<b>\$ 43,163,694</b>	<b>\$ 47,718,520</b>	<b>\$ 52,512,598</b>	<b>\$ 57,561,261</b>	<b>\$ 62,880,834</b>	<b>\$ 68,488,691</b>	<b>\$ 74,403,324</b>	<b>\$ 80,644,417</b>

Tabla C.35: Indicadores económicos sensibilidad 20 % Eólico.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 3,394,158</b>
<b>TIR</b>	<b>12 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>10</b>

### C.2.11. Análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV

Tabla C.36: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 602,912	\$ 603,408	\$ 603,909	\$ 604,413	\$ 604,922	\$ 605,434	\$ 605,951	\$ 606,471	\$ 606,996	\$ 607,525
Costo de mantención		\$ (51,175)	\$ (54,245)	\$ (57,500)	\$ (60,950)	\$ (64,607)	\$ (68,483)	\$ (72,592)	\$ (76,948)	\$ (81,565)	\$ (86,459)
Inversión Activo PV 2kW	\$ (2,558,734)										
Inversión Activo Fijo medidas EE	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ 1,489,048</b>	<b>\$ 1,546,642</b>	<b>\$ 1,607,918</b>	<b>\$ 1,673,113</b>	<b>\$ 1,742,479</b>	<b>\$ 1,816,284</b>	<b>\$ 1,894,815</b>	<b>\$ 1,978,374</b>	<b>\$ 2,067,287</b>	<b>\$ 2,161,897</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (19,647,634)</b>	<b>\$ (18,158,586)</b>	<b>\$ (16,611,944)</b>	<b>\$ (15,004,026)</b>	<b>\$ (13,330,913)</b>	<b>\$ (11,588,435)</b>	<b>\$ (9,772,151)</b>	<b>\$ (7,877,336)</b>	<b>\$ (5,898,962)</b>	<b>\$ (3,831,675)</b>	<b>\$ (1,669,778)</b>

Tabla C.37: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad PV. Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 608,059	\$ 608,596	\$ 609,138	\$ 609,685	\$ 610,235	\$ 610,790	\$ 611,350	\$ 611,914	\$ 612,482	\$ 613,055	\$ 614,003	\$ 614,956	\$ 615,913	\$ 616,875	\$ 617,842	\$ 618,813	\$ 619,790	\$ 620,771	\$ 621,757	\$ 622,748
\$ (91,646)	\$ (97,145)	\$ (102,974)	\$ (109,152)	\$ (115,701)	\$ (122,643)	\$ (130,002)	\$ (137,802)	\$ (146,070)	\$ (154,834)	\$ (164,124)	\$ (173,972)	\$ (184,410)	\$ (195,474)	\$ (207,203)	\$ (219,635)	\$ (232,813)	\$ (246,782)	\$ (261,589)	\$ (277,284)
<b>\$ 2,262,571</b>	<b>\$ 2,369,699</b>	<b>\$ 2,483,697</b>	<b>\$ 2,605,007</b>	<b>\$ 2,734,099</b>	<b>\$ 2,871,474</b>	<b>\$ 3,017,665</b>	<b>\$ 3,173,241</b>	<b>\$ 3,338,803</b>	<b>\$ 3,514,997</b>	<b>\$ 3,702,876</b>	<b>\$ 3,902,797</b>	<b>\$ 4,115,537</b>	<b>\$ 4,341,920</b>	<b>\$ 4,582,824</b>	<b>\$ 4,839,185</b>	<b>\$ 5,111,996</b>	<b>\$ 5,402,317</b>	<b>\$ 5,711,274</b>	<b>\$ 6,040,068</b>
<b>\$ 592,793</b>	<b>\$ 2,962,493</b>	<b>\$ 5,446,190</b>	<b>\$ 8,051,197</b>	<b>\$ 10,785,296</b>	<b>\$ 13,656,770</b>	<b>\$ 16,674,435</b>	<b>\$ 19,847,676</b>	<b>\$ 23,186,479</b>	<b>\$ 26,701,476</b>	<b>\$ 30,404,352</b>	<b>\$ 34,307,149</b>	<b>\$ 38,422,686</b>	<b>\$ 42,764,606</b>	<b>\$ 47,347,430</b>	<b>\$ 52,186,615</b>	<b>\$ 57,298,611</b>	<b>\$ 62,700,927</b>	<b>\$ 68,412,202</b>	<b>\$ 74,452,270</b>

Tabla C.38: Indicadores económicos sensibilidad 50 % PV.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 1,696,848</b>
<b>TIR</b>	<b>11 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>11</b>

## C.2.12. Análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico

Tabla C.39: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ahorro calefacción (Leña + GLP)		\$ 656,053	\$ 698,166	\$ 742,983	\$ 790,677	\$ 841,432	\$ 895,445	\$ 952,925	\$ 1,014,096	\$ 1,079,192	\$ 1,148,468
Ahorro costo social ton CO2eq		\$ 281,258	\$ 299,312	\$ 318,526	\$ 338,973	\$ 360,732	\$ 383,888	\$ 408,531	\$ 434,755	\$ 462,663	\$ 492,362
Ingreso generación elect. Restante		\$ 527,647	\$ 528,082	\$ 528,520	\$ 528,961	\$ 529,406	\$ 529,855	\$ 530,307	\$ 530,763	\$ 531,222	\$ 531,685
Costo de mantención		\$ (60,078)	\$ (63,682)	\$ (67,503)	\$ (71,553)	\$ (75,846)	\$ (80,397)	\$ (85,221)	\$ (90,334)	\$ (95,754)	\$ (101,500)
Inversión Activo E 3kW	\$ (3,003,876)										
Inversión Activo Fijo	\$ (17,088,900)										
<b>Flujo Caja Privado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ 1,404,881</b>	<b>\$ 1,461,879</b>	<b>\$ 1,522,526</b>	<b>\$ 1,587,057</b>	<b>\$ 1,655,724</b>	<b>\$ 1,728,791</b>	<b>\$ 1,806,542</b>	<b>\$ 1,889,279</b>	<b>\$ 1,977,323</b>	<b>\$ 2,071,016</b>
<b>Flujo acumulado</b>	<b>\$ (20,092,776)</b>	<b>\$ (18,687,895)</b>	<b>\$ (17,226,017)</b>	<b>\$ (15,703,491)</b>	<b>\$ (14,116,434)</b>	<b>\$ (12,460,710)</b>	<b>\$ (10,731,919)</b>	<b>\$ (8,925,377)</b>	<b>\$ (7,036,098)</b>	<b>\$ (5,058,775)</b>	<b>\$ (2,987,760)</b>

Tabla C.40: Flujo de caja análisis de sensibilidad Netbilling 50 % menos costo electricidad Eólico.Continuación.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ 1,222,190	\$ 1,300,645	\$ 1,384,136	\$ 1,472,987	\$ 1,567,541	\$ 1,668,164	\$ 1,775,247	\$ 1,889,204	\$ 2,010,476	\$ 2,139,532	\$ 2,276,873	\$ 2,423,030	\$ 2,578,569	\$ 2,744,093	\$ 2,920,242	\$ 3,107,698	\$ 3,307,188	\$ 3,519,483	\$ 3,745,405	\$ 3,985,830
\$ 523,968	\$ 557,603	\$ 593,396	\$ 631,487	\$ 672,024	\$ 715,162	\$ 761,070	\$ 809,925	\$ 861,916	\$ 917,244	\$ 976,123	\$ 1,038,783	\$ 1,105,464	\$ 1,176,426	\$ 1,251,943	\$ 1,332,308	\$ 1,417,832	\$ 1,508,845	\$ 1,605,701	\$ 1,708,774
\$ 532,152	\$ 532,622	\$ 533,007	\$ 533,575	\$ 534,057	\$ 534,542	\$ 535,032	\$ 535,525	\$ 536,023	\$ 536,524	\$ 537,034	\$ 538,188	\$ 539,026	\$ 539,868	\$ 540,714	\$ 541,564	\$ 542,418	\$ 543,277	\$ 544,140	\$ 545,007
\$ (107,590)	\$ (114,045)	\$ (120,888)	\$ (128,141)	\$ (135,830)	\$ (143,979)	\$ (152,618)	\$ (161,775)	\$ (171,482)	\$ (181,771)	\$ (192,677)	\$ (204,237)	\$ (216,492)	\$ (229,481)	\$ (243,250)	\$ (257,845)	\$ (273,316)	\$ (289,715)	\$ (307,097)	\$ (325,523)
<b>\$ 2,170,721</b>	<b>\$ 2,276,825</b>	<b>\$ 2,389,741</b>	<b>\$ 2,509,908</b>	<b>\$ 2,637,792</b>	<b>\$ 2,773,890</b>	<b>\$ 2,918,731</b>	<b>\$ 3,072,879</b>	<b>\$ 3,236,933</b>	<b>\$ 3,411,530</b>	<b>\$ 3,597,674</b>	<b>\$ 3,795,763</b>	<b>\$ 4,006,568</b>	<b>\$ 4,230,906</b>	<b>\$ 4,469,649</b>	<b>\$ 4,723,725</b>	<b>\$ 4,994,122</b>	<b>\$ 5,281,890</b>	<b>\$ 5,588,149</b>	<b>\$ 5,914,089</b>
<b>\$ (817,039)</b>	<b>\$ 1,459,786</b>	<b>\$ 3,849,527</b>	<b>\$ 6,359,435</b>	<b>\$ 8,997,227</b>	<b>\$ 11,771,117</b>	<b>\$ 14,689,848</b>	<b>\$ 17,762,727</b>	<b>\$ 20,999,660</b>	<b>\$ 24,411,190</b>	<b>\$ 28,008,864</b>	<b>\$ 31,804,627</b>	<b>\$ 35,811,195</b>	<b>\$ 40,042,101</b>	<b>\$ 44,511,750</b>	<b>\$ 49,235,475</b>	<b>\$ 54,229,597</b>	<b>\$ 59,511,487</b>	<b>\$ 65,099,636</b>	<b>\$ 71,013,725</b>

Tabla C.41: Indicadores económicos sensibilidad 50 % Eólico.

<b>VAN (10 % anual)</b>	<b>\$ 387,637</b>
<b>TIR</b>	<b>10 %</b>
<b>Años retorno</b>	<b>12</b>