



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

INFLUENCIA DEL SOBRECONSUMO ELÉCTRICO EN INVIERNO Y QUÉ

OPCIONES HAY PARA REVERTIRLO

Memoria para Optar el Título de Ingeniero Civil

Alumno: Eduardo Andrés Caamaño Torres

Profesor Guía: PhD Johanna Castaño Agudelo

Concepción, Agosto, 2019

© Eduardo Andrés Caamaño Torres

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, el 12de agosto de 2019, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno *Eduardo Andrés Caamaño Torres* de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para Optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesora PhDJohanna Marcela Castaño Agudelo

Profesor MSc Patricio Ananías Uarac Pinto

RESUMEN

En los últimos años se ha visto como grandes proyectos hidro-eléctricos y termo eléctricos no se han ejecutado debido a la preocupación y manifestación de la población por conservar el medio ambiente. Por un lado, las grandes centrales hidroeléctricas inundaron grandes valles provocando pérdidas de ecosistemas y alteraron el cauce natural de los ríos, por el otro las centrales termo eléctricas son una gran fuente de contaminación al expulsar los gases de combustión (en su mayoría carbón) a la atmosfera.

Debido a lo anterior, y a factores que se dan en la temporada de invierno, considerando la menor cantidad de horas de luz día y temperaturas más bajas, la población tiende a aumentar su consumo eléctrico, tanto para iluminación como calefacción. Por esta razón, se crearon leyes y decretos para restringir este consumo eléctrico en la esta temporada, conocido en Chile como límite de invierno.

Por consecuencia, se necesita buscar fuentes de energías limpias, tal como energías renovables no convencionales donde podemos encontrar eólica, pequeña hidroeléctrica, fotovoltaica, geotérmica y biomasa. Chile, gracias a su geografía tiene la posibilidad de producir todas las nombradas anteriormente, en este estudio solo se acotará a la energía eólica y fotovoltaica debido a su menor complejidad para una instalación domiciliaria.

Finalmente, en cuanto a la implementación de esta alternativa como fuente de energía debe tener un costo atractivo para la población, idealmente que se pueda recuperar la inversión en pocos años.

ABSTRACT

In recent years it has been seen as major hydro-electric and thermo-electric projects have not been implemented due to the concern and manifestation of the population to conserve the environment. On the one hand, large hydroelectric plants flooded large valleys causing loss of ecosystems and disrupting the natural riverbed of rivers, on the other the thermo-electric power plants are a great source of pollution by expelling flue gases (mostly coal) to the atmosphere.

Due to the above, and to factors that occur in the winter season, considering the lower number of daylight hours and lower temperatures, the population tends to increase its electricity consumption, both for lighting and heating. For this reason, laws and decrees were created to restrict this electricity consumption in this season, known in Chile as a winter limit.

As a result, we need to look for clean energy sources, such as unconventional renewable energies where we can find wind, small hydropower, photovoltaic, geothermal and biomass. Chile, thanks to its geography has the possibility to produce all the above mentioned, in this study will only be limited to wind and photovoltaic energy due to its lower complexity for a home installation.

Finally, as for the implementation of this alternative as an energy source, it should have an attractive cost to the population, ideally that the investment can be recouped in a few years.

ÍNDICE

| | | |
|------------|---|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 | Motivación..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 1 |
| 1.2.1 | Objetivo general | 1 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 1 |
| 1.3 | Alcances | 2 |
| 1.4 | Metodología | 2 |
| CAPÍTULO 2 | MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 | Introducción | 4 |
| 2.2 | Energías convencionales..... | 5 |
| 2.3 | Energías renovables | 7 |
| 2.3.1 | Energía eólica | 7 |
| 2.3.2 | Energía solar fotovoltaica..... | 8 |
| 2.3.3 | Pequeñas centrales hidroeléctricas..... | 9 |
| 2.4 | Límite de invierno | 9 |
| CAPÍTULO 3 | ALTERNATIVAS DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO..... | 11 |
| 3.1 | Energía solar fotovoltaica | 11 |
| 3.1.1 | Paneles solares fotovoltaicos a base de silicio | 12 |
| 3.1.2 | Paneles solares a base de cadmio telurio (CdTe) | 15 |
| 3.1.3 | Paneles solares híbridos..... | 15 |
| 3.1.4 | Tiempo de recuperación de energía y huella de carbono de los sistemas fotovoltaicos comerciales..... | 16 |

| | | |
|------------------------------------|---|----|
| 3.2 | Pequeñas turbinas eólicas..... | 17 |
| 3.2.1 | Aerogeneradores de velocidad variable..... | 18 |
| 3.2.2 | Aerogeneradores con palas flexibles..... | 19 |
| 3.3 | Inversores de voltaje..... | 20 |
| 3.3.1 | Inversor de onda cuadrada..... | 20 |
| 3.3.2 | Inversor de onda modificada..... | 21 |
| 3.3.3 | Inversores de onda sinusoidal pura..... | 21 |
| 3.4 | Conexión domiciliaria..... | 22 |
| 3.4.1 | Ley 20.571 de Generación Distribuida..... | 22 |
| 3.4.2 | Trámites para pequeños proyectos fotovoltaicos..... | 22 |
| CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN TÉCNICA..... | | 24 |
| 4.1 | Tipo de instalación..... | 24 |
| 4.2 | Posicionamiento de los paneles..... | 25 |
| 4.3 | Condiciones y características..... | 26 |
| 4.4 | Radiación..... | 26 |
| 4.4.1 | Ciclo diario de radiación..... | 28 |
| 4.4.2 | Variabilidad año a año..... | 28 |
| 4.5 | Nubosidad..... | 30 |
| 4.6 | Temperatura..... | 31 |
| 4.7 | Viento..... | 33 |
| 4.8 | Inclinación óptima..... | 34 |
| 4.9 | Generación eléctrica fotovoltaica..... | 34 |
| 4.10 | Estudio de generación por cada alternativa..... | 36 |
| 4.10.1 | Alternativa 1 2kW instalados..... | 36 |
| 4.10.2 | Alternativa 2 5kW instalados..... | 38 |

| | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|----|
| 4.10.3 | Alternativa 3 10kW instalados..... | 39 |
| CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN ECONÓMICA..... | | 40 |
| 5.1 | Costos..... | 40 |
| 5.2 | Enfoque costo beneficio..... | 40 |
| 5.2.1 | Alternativa 1 | 41 |
| | Alternativa 2..... | 42 |
| 5.2.2 | Alternativa 3 | 43 |
| CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES | | 45 |
| REFERENCIAS | | 46 |
| ANEXOS..... | | 48 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Esquema de metodología | 3 |
| Figura 2.1 Generación Bruta..... | 4 |
| Figura 2.2 Brecha hídrica en cuencas | 6 |
| Figura 3.1 Mapa de irradiación horizontal global | 12 |
| Figura 3.2 Estudio de células más eficientes | 13 |
| Figura 3.3 Tiempo de recuperación de la energía de los sistemas fotovoltaicos comerciales..... | 16 |
| Figura 3.4 Huella de carbono de los sistemas fotovoltaicos comerciales | 17 |
| Figura 3.7 Onda pura..... | 22 |
| Figura 4.1 Sistema fotovoltaico conectado a la red | 25 |
| Figura 4.2 Promedio mensual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada del suelo | 27 |
| Figura 4.3 Promedio horario de la radiación global instantánea incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada es sus componentes directa, difusa y reflejada en el suelo | 28 |
| Figura 4.4 Promedio anual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado para cada año de simulación | 29 |
| Figura 4.5 Ciclo anual de frecuencia de nubosidad diurna | 30 |
| Figura 4.6 Ciclo diario de frecuencia de nubosidad | 31 |
| Figura 4.7 Ciclo diario de la temperatura media | 32 |
| Figura 4.8 Ciclo anual de la temperatura media | 33 |
| Figura 4.9 Ciclo diario de la magnitud de viento | 34 |
| Figura 4.10 Ciclo anual de la generación fotovoltaica..... | 35 |
| Figura 4.11 Ciclo diario de generación | 36 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 4.1: Radiación incidente en el plano horizontal..... | 26 |
| Tabla 4.2 Radiación incidente en un plano con inclinación de 30° | 27 |
| Tabla 4.3: Radiación incidente en el plano horizontal..... | 29 |
| Tabla 4.4: Radiación incidente en un plano con inclinación de 30° | 29 |
| Tabla 4.5: Frecuencia de nubosidad diurna mensual | 30 |
| Tabla 4.6: Porcentaje de nubosidad por hora. Los ceros corresponden a horas donde no hay datos de nubosidad..... | 31 |
| Tabla 4.7: Temperatura promedio mensual | 32 |
| Tabla 4.8: Temperatura promedio para cada hora..... | 32 |
| Tabla 4.9: Promedio mensual de la magnitud de viento | 33 |
| Tabla 4.10: Promedio de la generación total en cada mes | 35 |
| Tabla 4.11: Promedio de la generación para cada hora | 35 |
| Tabla 4.12: Promedio de generación para una instalación de 2kW | 37 |
| Tabla 4.13. Generación eléctrica anual en 25 años..... | 37 |
| Tabla 4.14: Promedio de generación para una instalación de 5kW | 38 |
| Tabla 4.15. Generación eléctrica anual en 25 años..... | 38 |
| Tabla 4.16: Promedio de generación para una instalación de 10kW | 39 |
| Tabla 4.17. Generación eléctrica anual en 25 años..... | 39 |
| Tabla 5.1 Cotización | 40 |
| Tabla 5.2 Resumen flujo de caja..... | 41 |
| Tabla 5.3 Indicadores | 42 |
| Tabla 5.4. Resumen flujo de caja..... | 42 |
| Tabla 5.5 Indicadores | 43 |
| Tabla 5.6 Resumen flujo de caja..... | 43 |
| Tabla 5.7 Indicadores | 44 |

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Conocer el impacto económico que produce en los hogares el pago del sobre consumo lleva a generar conocimiento sobre las alternativas de suministro eléctrico existentes en el mercado, para solucionar el problema de sobre consumo en los meses de invierno, buscando siempre la alternativa más amigable con el medio ambiente, y, por lo tanto, mostrar el potencial que tiene Chile en materia de energías renovables no convencionales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Identificar alternativas de suministro eléctrico que contribuyan a la solución de la problemática de sobre consumo en invierno.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar alternativas de energías renovables que puedan ser implementadas para el suministro eléctrico en viviendas.
- Determinar cuál o cuáles alternativas de energías renovables son las idóneas a implementar en viviendas según factores económicos.

Capítulo 1: Introducción

- Evaluar alternativas para viviendas que pudiesen dar solución al problema del sobre consumo en invierno y que permita al usuario vender sus excedentes de energía.

1.3 Alcances

El presente estudio explorará diferentes tipos de energías renovables para la producción de electricidad, buscando cual alternativa es óptima para ser implementada en una determinada ubicación geográfica. Por ello, el objetivo es encontrar cual o cuáles son las más eficientes y amigables con el medio ambiente. Considerando que, al ser una instalación domiciliaria no deberá ocupar un gran espacio físico. Ahora bien, sin dejar de lado que la implementación y el funcionamiento no sea de una alta complejidad para que cualquier persona pueda operarlo sin inconvenientes y no recurra a técnicos para su normal funcionamiento.

1.4 Metodología

Como primera etapa se realizará una revisión bibliográfica para profundizar en la producción de electricidad en Chile, explorando cuales son las principales fuentes de energía, diferenciando las convencionales de las renovables. Además, de ver tanto sus ventajas como desventajas para su producción, identificando cuales son más amigables con el medio ambiente y viables para una instalación domiciliaria. Luego, se realizará una evaluación técnica y económica de estas alternativas. Y, finalmente se evaluará la implementación de las soluciones en una vivienda. La Figura 1.1 muestra el esquema de la metodología implementada en el desarrollo de la memoria de título.

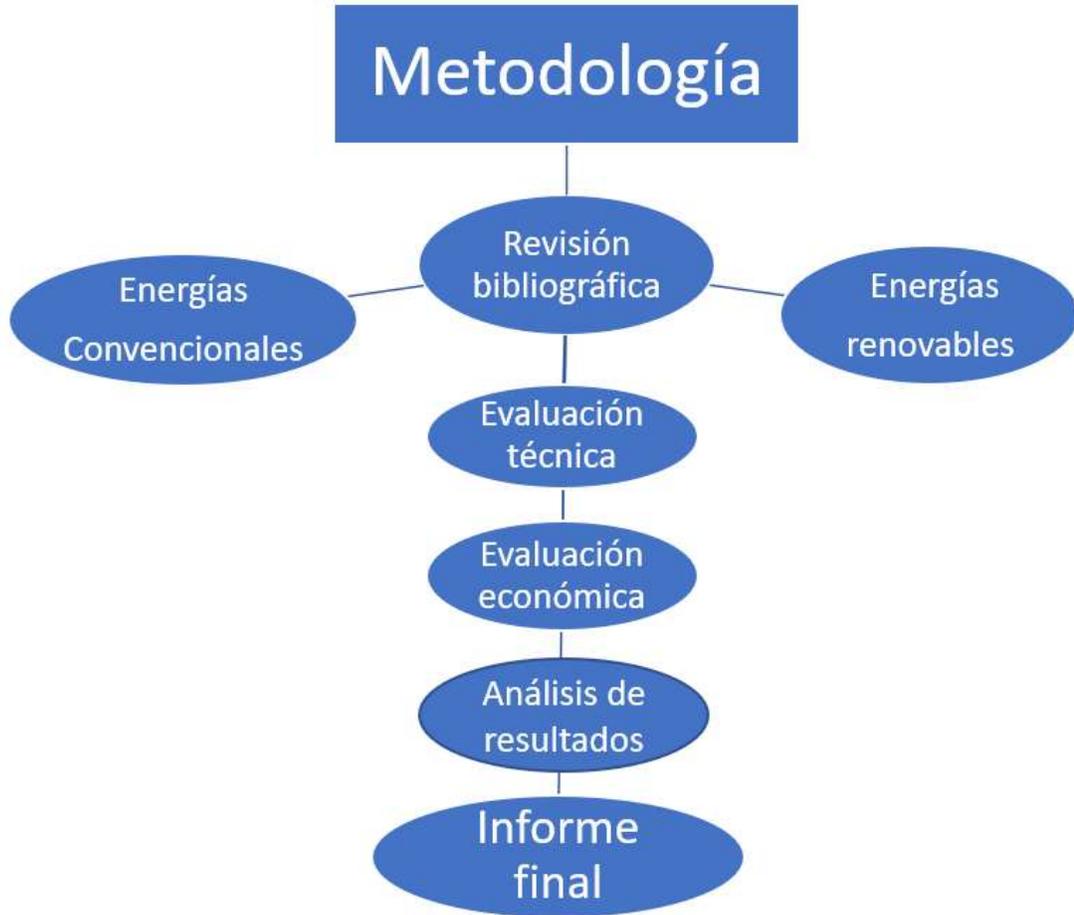


Figura 1.1 Esquema de metodología (Elaboración propia)

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El Sistema Eléctrico Nacional cuenta con una capacidad de generación instalada y operando de 23.905 Megawatt (MW). Del total generado la mayor fuente de energía es la térmica, representando un 57% de la capacidad nacional. Estas instalaciones termoeléctricas funcionan a partir de carbón, petróleo diesel y gas natural. A continuación, la energía hidroeléctrica con un 29% de la energía nacional. Esta última al provenir del agua, es una fuente limpia, por lo cual no emite contaminantes a diferencia de la anterior mencionada que queman combustibles fósiles. En menor cantidad le sigue la energía solar y la eólica con un 5% cada una y el restante 3,2% por centrales de biomasa, geotérmica y cogeneración. En la figura 2.1 se presenta el gráfico generación bruta del año 2017.

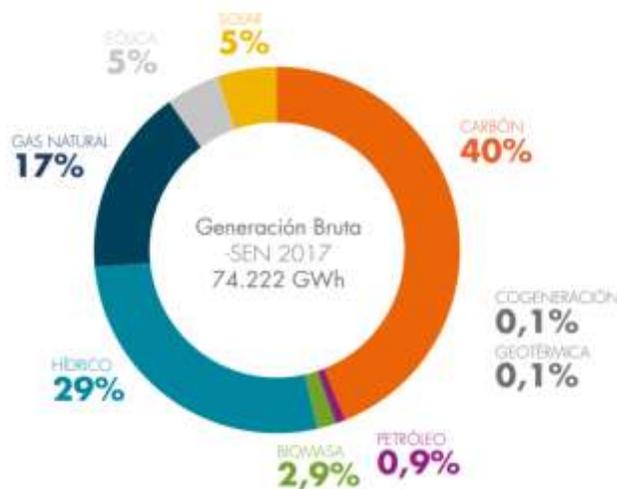


Figura 2.1 Generación Bruta (Generadoras de Chile, 2017)

2.2 Energías convencionales

Las energías dominantes en Chile son la térmica e hídrica, la primera tiene como desventaja que su funcionamiento parte por la quema de combustibles fósiles, el principal combustible es el carbón, considerado la forma más antigua y sucia de generación eléctrica. Actualmente, existen 27 termoeléctricas a carbón a lo largo del país las cuales se concentran en 5 comunas: Tocopilla, Mejillones, Huasco, Puchuncavi y Coronel. Estas comunas son llamadas zonas de sacrificio, por los altos índices de contaminación local, por lo que se decretaron como zonas saturadas. El principal impacto de la generación eléctrica a base de carbón es la gran cantidad de contaminantes que se liberan a la atmósfera, como: material particulado, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y metales pesados (mercurio, vanadio y níquel), los que afectan gravemente a la salud de la población y ecosistemas locales. Además, de liberar altos niveles de dióxido de carbono que incide en el calentamiento global (Fundación Terram, 2018).

Otro tipo de energía que juega un rol importante en el país es la hidroeléctrica que según lo indicado anteriormente aporta un 29% de la producción eléctrica nacional, siendo un componente fundamental para el Sistema Interconectado Central. Considerando que este recurso es uno de los principales elementos generadores de energía eléctrica, y que actualmente está en déficit, es necesario comenzar a prepararse para el impacto que tendrá el cambio climático en la generación de energía a partir del recurso hidroeléctrico a futuro.

Actualmente, existen cuencas bajo presión, en donde la demanda hídrica sobrepasa a la oferta. La oferta hídrica se define “como aquella porción de agua que, después de precipitar sobre la cuenca y satisfacer las cuotas de evapotranspiración e infiltración, escurre por los cauces de los ríos y demás corrientes superficiales”, y demanda hídrica como el conjunto de actividades socioeconómicas, las que se dividen en tres; derechos de aprovechamiento de

Capítulo 2: Marco Teórico

aguas, captación de aguas y consumo de aguas. En la figura 2.2 se muestra la brecha hídrica de 25 cauces de un total de 101 cuencas hidrográficas existentes a nivel nacional (Maureira, Acevedo, & Souza, 2018)

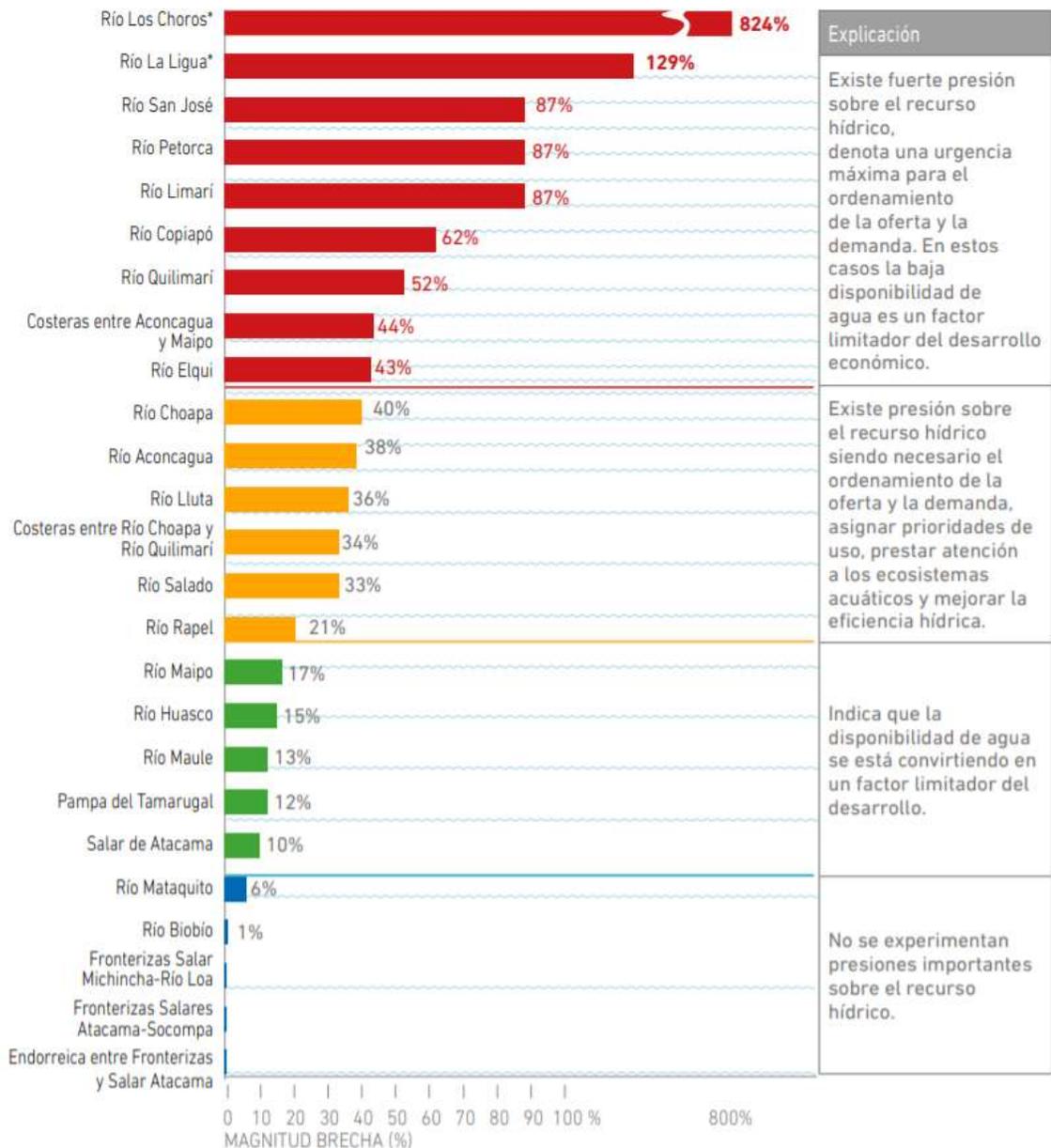


Figura 2.2 Brecha hídrica en cuencas (Maureira et al., 2018)

2.3 Energías renovables

2.3.1 Energía eólica

La energía eólica es aquella que proviene del movimiento de masas de aire o viento. Esta energía mueve aspas de molinos de viento transformándola a energía mecánica de rotación, estas palas están conectadas a un rotor y el eje de éste hace mover la máquina eléctrica o generador para producir un voltaje eléctrico, y así energía eléctrica. Cabe mencionar, que esta energía proviene indirectamente del Sol, debido a que las corrientes de aire son originadas por las distintas temperaturas que se calienta la superficie de la tierra. Sin embargo, para el desarrollo de proyectos eólicos es conveniente elegir zonas costeras, planicies interiores abiertas, valles y zonas montañosas debido a que existe un mayor potencial eólico (Santos & González, 2019).A continuación, se mencionan las ventajas y desventajas.

Ventajas

- Fuente inagotable de energía
- Fuente energética segura, constante y renovable
- Fuente energética limpia no causando impactos al medioambiente
- Es compatible con otras actividades (Agrícola y ganadera)

Desventajas

- El viento relativamente impredecible
- La energía eólica no se puede almacenar
- Afecta a las aves en sus migraciones
- Ruidos molestos por el movimiento de las aspas
- Impacto en el paisaje, son visibles desde largas distancias

2.3.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica aprovecha la energía solar para transformarla en energía eléctrica. Este proceso se realiza mediante materiales que tienen la cualidad de absorber fotones y emitir electrones, los que al ser capturados producen una corriente eléctrica que se puede utilizar como electricidad. Para la producción de esta corriente es necesario contar con células fotovoltaicas que forman módulos y luego paneles. Estos paneles generan una corriente continua que mediante un inversor de voltaje es transformada a corriente alterna que se adapta tanto en tensión e intensidad a la corriente de la red de transporte. A continuación, se mencionan las ventajas y desventajas.

Ventajas

- Fuente de energía inagotable
- No contaminante, no emana contaminantes a la atmosfera
- Para la fabricación de células fotovoltaicas se usa silicio elemento abundante en la Tierra
- No necesita combustibles u otro tipo de recursos
- No genera ruidos

Desventajas

- Se necesita un área considerable para poder operar
- No produce energía de forma continua
- Su rendimiento varía según la estación del año y condiciones climáticas (nubosidad)

2.3.3 Pequeñas centrales hidroeléctricas

Las pequeñas hidroeléctricas funcionan bajo los mismos principios de las hidroeléctricas a gran escala. Estas centrales desvían parte del caudal principal canalizándolo hacia las turbinas para así aprovechar su energía cinética. Estas turbinas extraen la energía cinética del agua, y mediante generadores producen energía eléctrica. El agua, luego es devuelta a su cauce natural, donde se busca minimizar el impacto ambiental que es producido por el desvío. Por ello, para que sea considerada una pequeña central hidroeléctrica la potencia debe ser menor a 10 MW. A continuación, se mencionan las ventajas y desventajas.

Ventajas

- Fuente de energía continua y limpia (no emite gases contaminantes)
- Costos de explotación bajos
- Trabaja a temperatura ambiente
- No alteran el ecosistema de manera significativa

Desventajas

- Su construcción y puesta en marcha requieren de grandes inversiones
- Existen pocos lugares que reúnan las condiciones para un buen funcionamiento
- Pueden afectar los cauces provocando erosión

2.4 Límite de invierno

El límite de invierno se normó en el decreto N°1T/2012, publicado en el diario oficial del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, con el fin de regular el consumo de electricidad en los meses de invierno. La iniciativa aplica cada vez que los consumos mensuales efectuados en el período comprendido entre los meses de abril a septiembre (ambos incluidos) sobrepasen los 430

Capítulo 2: Marco Teórico

kWh/mes, momento en el que aplica el cargo por “energía adicional de invierno” a los consumos que exceden el límite de invierno. Para conseguir este cálculo, las compañías de electricidad promedian el consumo en kWh del período comprendido entre el 1 de octubre del año anterior al de la aplicación el límite de invierno y el 31 de marzo (ambos incluidos), incrementando en un 20%, siendo su valor mínimo 350 kWh/mes. La Norma especifica que la medida solo se aplica a clientes con tarifa BT1, la más utilizada por usuarios residenciales (SEC, s.f).

CAPÍTULO 3 ALTERNATIVAS DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO

En este capítulo se identificarán las diferentes alternativas de energía renovable y la tecnología que hay disponible para el uso domiciliario.

3.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una buena alternativa debido a varias razones: en primer lugar, es la fuente más abundante de energía renovable, y el sol la emite a una tasa de $3,8 \times 10^{23}$ kW, de los cuales aproximadamente 1.8×10^{14} kW son interceptados por la Tierra. La energía solar llega a la Tierra de diferentes formas, como el calor y la luz. Estudios han concluido que la demanda global de energía se puede satisfacer utilizando la energía solar debido a que es abundante en la naturaleza y es una fuente de energía disponible sin costo alguno. En segundo lugar, es una fuente de energía prometedora porque no es agotable como las fósiles. La radiación solar y su intensidad son dos factores claves que determinan la eficiencia fotovoltaica. Estos dos parámetros son altamente variables en los países. En la figura 3.1 se muestra la radiación horizontal global. En tercer lugar, la utilización y el seguimiento de la energía solar no tiene ningún impacto perjudicial en el ecosistema en el que el equilibrio natural se mantiene constante para el mejoramiento de los organismos vivos.

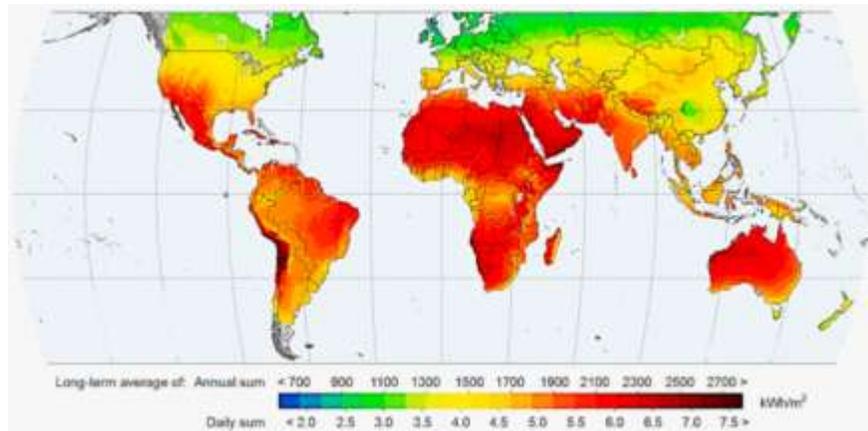


Figura 3.1 Mapa de irradiación horizontal global (Instituto de Energía Solar, 2018).

3.1.1 Paneles solares fotovoltaicos a base de silicio

Los paneles solares fotovoltaicos son superficies compuestas por celdas que convierten la luz en electricidad, lo cual se denomina “efecto fotovoltaico”. El principal componente presente en las celdas es el silicio, y alrededor del 90% de la tecnología se basa en el uso de alguna variación de este. El porcentaje de estos paneles destinados a uso doméstico es mayor.

El silicio usado en células fotovoltaicas puede tener varias formas. La mayor diferencia entre ellas es la pureza del silicio usado. Esto quiere decir, cuanto más puro es el silicio, mejor están alineadas sus moléculas y mejor convierte la energía solar a eléctrica. Por lo tanto, la eficiencia de los paneles solares va de la mano con la pureza del silicio, sin embargo, los procesos para aumentar la pureza son muy caros. La figura 3.2 muestra como aumentado la eficiencia de las células solares llegando a una eficiencia del 46% en el año 2016.

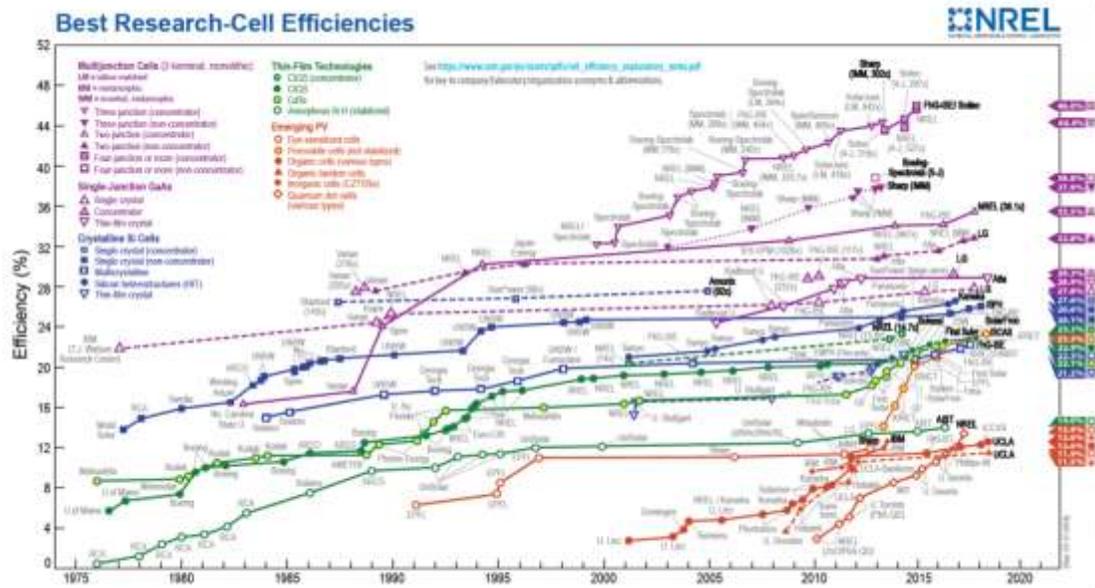


Figura 3.2 Estudio de células más eficientes (Instituto de Energía Solar, 2018)

A continuación, se mostrarán los diferentes tipos de células fotovoltaicas a base de silicio:

Células de silicio monocristalino

Ventajas

- Tienen las mayores tasas de eficiencia debido a que se fabrican con silicio de alta pureza. La eficiencia está por encima del 15% y en algunos casos supera el 21%
- La vida útil es más larga de hecho, muchos fabricantes ofrecen garantías de hasta 25 años
- Suelen funcionar mejor que paneles policristalinos de similares características similares

Desventajas

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

- Son más caros, para uso domiciliario resulta más ventajoso usar paneles policristalinos o capa fina
- Si el panel se cubre parcialmente por una sombra, suciedad o nieve el circuito entero puede averiarse
- Se derrocha gran cantidad de silicio en el proceso de fabricación

Células de silicio policristalino

Ventajas

- El proceso de fabricación es más simple, por lo que tiene un menor costo
- Se pierde menos silicio en el proceso de fabricación que en el monocristalino

Desventajas

- Suelen tener menor resistencia al calor que los monocristalinos. El calor puede afectar la vida útil, acortándola
- La eficiencia de un panel policristalino ronda entre 13-16%, debido a que no tienen un silicio tan puro como los monocristalinos
- Necesitan mayor espacio para producir la misma energía que un monocristalino

Células de silicio amorfo o capa fina

Ventajas

- Se pueden fabricar de forma sencilla lo que hace que sean más baratos que los paneles cristalinos
- Tiene apariencia homogénea
- Pueden ser flexibles, permitiendo que se adapten a múltiples superficies
- El rendimiento no se ve afectado por las sombras y altas temperaturas

Desventajas

- Si bien, son más económicos presentan una eficiencia del 7-13%. Un panel monocristalino puede producir cuatro veces más electricidad que uno de capa fina por metro cuadrado
- Tienden a degradarse más rápido que los paneles cristalinos

- Se debe invertir más en estructuras y cableado al necesitar más paneles

3.1.2 Paneles solares a base de cadmio telurio (CdTe)

Recientemente, la tecnología de células solares CdTe alcanzó un nivel de alta tecnología capaz de realizar dispositivos que muestran eficiencias cercanas al 22%. El cadmio es un metal pesado tóxico considerado una sustancia peligrosa, es un desecho de la industria minera, por lo que su producción no depende de la demanda, éste normalmente se elimina en vertederos como desechos peligrosos. Considerando lo anterior, la fabricación de paneles solares es una buena alternativa de usar este material residual, dado que al combinarse con el telurio forma una red cristalina altamente estable y de varios órdenes de magnitud menos tóxica que el cadmio. Además, al encapsularse en módulos fotovoltaicos las capas de vidrio que lo rodean lo sellan herméticamente, no permitiendo la liberación de cadmio al ambiente. Otro punto a favor, es que su principal fabricante, First Solar, tiene un plan de reciclaje desde el 2005, donde recuperan hasta el 95% del material semiconductor y el 90% del vidrio para su reutilización en nuevos módulos fotovoltaicos (Bosio, Rosa, & Romeo, 2018).

3.1.3 Paneles solares híbridos

En el mercado existe una amplia variedad de paneles solares, que pueden producir energía térmica, energía eléctrica o ambas que se denominan paneles híbridos. Los paneles híbridos ofrecen la opción de producir tanto calor como electricidad a partir de un panel, las pruebas han demostrado que se pueden lograr mejoras de rendimiento eléctrica de hasta un 7% en comparación con los paneles fotovoltaicos convencionales. Este aumento en el rendimiento eléctrico se debe a la menor temperatura de las células fotovoltaicas causadas por la eliminación de calor, que es otro de los beneficios de usar paneles solares híbridos (Fine, Dworkin, & Friedman, 2019).

3.1.4 Tiempo de recuperación de energía y huella de carbono de los sistemas fotovoltaicos comerciales

El aumento en la escala de producción de módulos fotovoltaicos va de la mano con las economías de escala de fabricación y diseños optimizados. El tiempo de recuperación de la energía es significativamente más corto que el tiempo de vida esperado de 30 años, como se muestra en Figura 3.3. La huella de carbono de la electricidad fotovoltaica es de aproximadamente 25 g CO₂ -eq/kWh, como se muestra en la Figura 3.4, lo que es favorable en comparación con la huella de carbono de la electricidad basada en combustibles fósiles. La electricidad proveniente del carbón, lignito petróleo, gas natural tiene huellas de carbono de 1079, 1231, 885 y 642 g CO₂ -eq/kWh respectivamente (Mariska de Wild-Scholten, 2013).

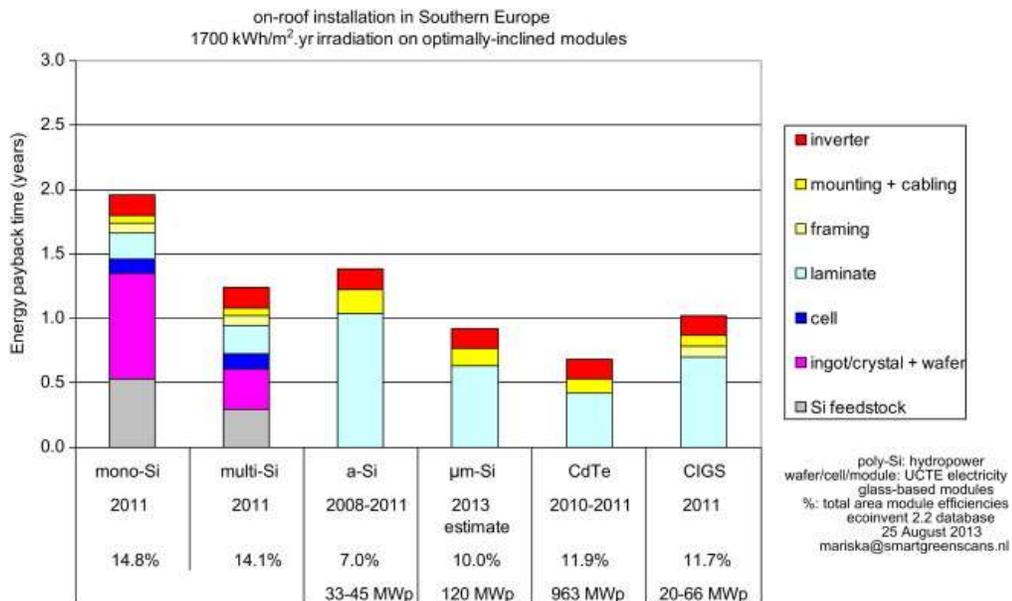


Figura 3.3 Tiempo de recuperación de la energía de los sistemas fotovoltaicos comerciales, irradiación 1700 kWh/m²/año (Mariska de Wild-Scholten, 2013).

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

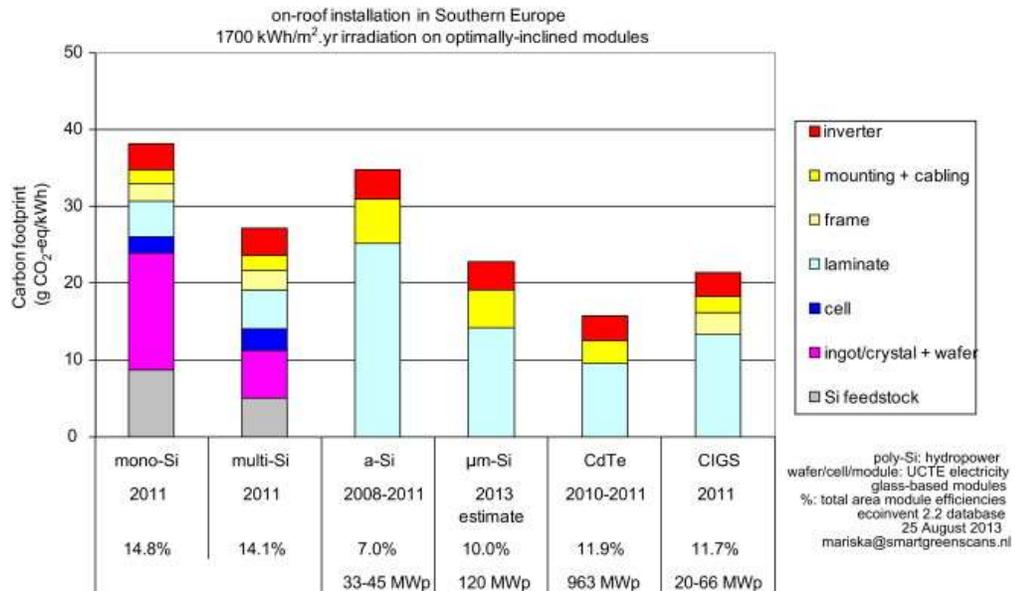


Figura 3.4 Huella de carbono de los sistemas fotovoltaicos comerciales, irradiación 1700 kWh/m²/año (Mariska de Wild-Scholten, 2013).

3.2 Pequeñas turbinas eólicas

El creciente interés en las energías renovables ha impulsado el uso de pequeñas turbinas eólicas para satisfacer parcialmente la demanda doméstica de electricidad.

El principio básico de cada aerogenerador es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica. Existen dos métodos diferentes para esta conversión, la resistencia aerodinámica fue la primera. Debido al simple principio de funcionamiento, algunos diseños modernos todavía dependen del arrastre. Este método presenta dos desventajas, primero surgen problemas de eficiencia, ya que el viento actúa no solo en la parte activa, sino también en la

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

parte pasiva del rotor. En segundo lugar, a medida que la turbina aumenta de velocidad de rotación, la velocidad relativa del viento disminuye. El otro mecanismo de conversión usa el mismo principio de los molinos de vientos de hace más de 700 años, que se basa en la elevación aerodinámica. En esta realización, el rotor de la turbina consiste en un conjunto de álabes con secciones transversales de forma aerodinámica. Los efectos físicos que ocurren son análogos a los encontrados en las hélices de aire, excepto por el hecho de que el proceso se invierte, es decir, el viento impulsa el rotor y no al revés (Bukala, Damaziak, Kroszczyński, Krzeszowiec, & Malachowski, 2015)

3.2.1 Aerogeneradores de velocidad variable

La tecnología de velocidad variable se ha convertido en una característica dominante en el diseño de aerogeneradores desde los años 70, para mejorar el rendimiento aerodinámico del rotor y reducir la emisión de ruido. Con viento de baja velocidad se baja la velocidad del rotor y su vez su carga mecánica, mientras con velocidades más altas aumenta la velocidad del rotor y carga mecánica, generando una mayor cantidad de energía. Esto permite que el rotor funcione constantemente independiente de las condiciones del viento. Para la construcción de turbinas de velocidad variable se necesita una mayor cantidad de componentes electrónicos, lo que trae como consecuencia un mayor costo general de la turbina. Para maximizar la extracción de energía, se requiere del seguimiento continuo de la producción de potencia máxima, el que en la mayoría de los casos está basado en curvas de operación predeterminadas. Para lograr esta tarea el sistema de control siempre debe poder operar el rotor bajo una curva óptima de rendimiento. Las ventajas de este tipo de aerogenerador es el incremento de energía capturada, la mejor calidad de la energía entregada y la reducción de cargas mecánicas (Battisti, Benini, Brighenti, Dell'Anna, & Raciti Castelli, 2018).

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

Principalmente existe dos tipos de aerogeneradores de velocidad variable el primero trabaja mediante la entrada en pérdida aerodinámica, en la que las palas están sujetas al buje con un ángulo fijo. El diseño aerodinámico del rotor está optimizado para un determinado valor de velocidad de viento, de forma que cuando la velocidad del viento supera ese valor existe una baja de potencia, es decir, las palas pueden trabajar en un rango limitado de velocidad de viento. El segundo, consiste en la variación del ángulo de las palas o de paso variable, en el que las palas cambian de ángulo en caso de una velocidad demasiado alta o baja del viento, para lograr una eficiencia máxima. Este tipo de control mejora la potencia captada a velocidades de viento altas, además asiste durante la conexión del aerogenerador o en caso de parada de emergencia. La principal desventaja es la complejidad del mecanismo de movimiento de la pala y las mayores fluctuaciones de potencia en torno a la potencia nominal debido a las ráfagas de viento y a la reducida velocidad con la que el sistema es capaz de cambiar el ángulo de la pala.

3.2.2 Aerogeneradores con palas flexibles

Las pequeñas turbinas eólicas generalmente funcionan con palas de paso fijo, teniendo como inconveniente que no permiten la inclinación y ajuste de las palas para una eficiencia óptima. Lo que es especialmente desfavorable para los pequeños dispositivos de velocidad constante y paso fijo. Por otro lado, el control geométrico activo es costoso y complicado, por lo que no es justificable para este tipo de turbinas. Los recientes avances en el diseño de estructuras adaptativas dan lugar a un nuevo concepto de turbina, que emplea una forma continua de formas, lo que permite que la turbina se adapte de manera más efectiva a condiciones variables. El diseño ideal de estas palas de transformación incorpora cuchillas adaptadas aero-elásticamente para lograr la misma eficiencia máxima que las rígidas, las cuales son especialmente adecuadas para turbinas pequeñas. La cuchilla de transformación se fabrica

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

más curvada que la rígida dando una mayor sustentación y eficacia en el funcionamiento. Este diseño permite que las cuchillas rígidas y flexibles sean geométricamente idénticas en condiciones óptimas, dando como resultado un rendimiento equivalente a diferentes velocidades de viento. A altas velocidades del viento, los bordes traseros de las aspas flexibles se deforman en la dirección del flujo del aire, lo que resulta en una mayor sustentación y rendimiento debido a la disminución del ángulo de ataque. La eficiencia de las turbinas equipadas con palas flexibles aumenta hasta un 32,6% y el rango operativo aumenta un 34,5% en comparación a las palas rígidas (MacPhee & Beyene, 2019).

3.3 Inversores de voltaje

La eficiencia de los módulos fotovoltaicos es muy baja, entre un 15 a un 20%. Por otro lado, la producción de energía de pequeñas turbinas eólicas es baja. Debido a ello, la energía eléctrica generada no debe desperdiciarse empleando sistemas de conversión de energía ineficientes. Los inversores de voltaje son la interface entre los módulos fotovoltaicos o turbina eólica y la red. En el mercado existen principalmente tres tipos de inversores: inversores de onda cuadrada, onda modificada y onda pura.

3.3.1 Inversor de onda cuadrada

Son los inversores menos eficientes, pero también más baratos. Producen efectos adversos denominados “armónicos” que generan interferencias como calentamiento de circuitos o ruidos. No se pueden usar para cargas inductivas como motores, quedando fuera refrigerador, lavadoras, jugueras, entre otros. De ser utilizados en este tipo de artefacto se puede dañar el inversor como el

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

electrodoméstico. También, se utilizan generalmente para alimentar televisores, computadores o pequeños aparatos eléctricos.

3.3.2 Inversor de onda modificada

Más sofisticado y costoso que el anterior, utiliza la conmutación electrónica que modifica el ancho de pulso, obteniendo una onda modificada lo más cercano posible a una onda sinusoidal. La salida no es sinusoidal pura, pero se aproxima a ella. El contenido de armónicos es menor que en la onda cuadrada. Estos inversores tienen una mejor relación precio-calidad y se pueden utilizar para iluminación, computadores y televisores.

3.3.3 Inversores de onda sinusoidal pura

Estos equipos cuentan con una electrónica más elaborada que considera la incorporación de microprocesadores que permiten una eficiencia del 90% o más. Esta electrónica proporciona mejores prestaciones como medir la energía consumida, modalidades de bajo consumo, entre otros. La desventaja es su tamaño y principalmente la diferencia de costo en comparación a los antes mencionados. Estos inversores son adecuados para cargas inductivas como motores eléctricos o cargas que requieren una forma sinusoidal pura, tales como neveras, refrigeradores, máquinas de soldar, equipos amplificadores.

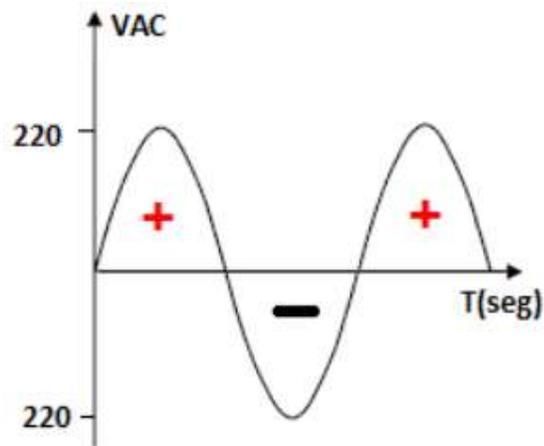


Figura 3.5 Onda pura (HIMELCO, s. f.).

3.4 Conexión domiciliar

3.4.1 Ley 20.571 de Generación Distribuida

Esta ley da derecho a los clientes regulados a vender sus excesos de generación hacia la red de distribución a un precio regulado, para esto debe cumplir los siguientes requisitos:

- Ser un cliente regulado con tarifa regulada
- La generación debe estar basada en energías renovables o cogeneración eficiente
- Capacidad de generación de hasta 100 kW
- Contar con un medidor bidireccional
- Módulos fotovoltaicos e inversores autorizados por SEC
- Instalación ejecutada e inscrita por un electricista autorizado por SEC

3.4.2 Trámites para pequeños proyectos fotovoltaicos

Capítulo 3: Alternativas de Energías Renovables Para Suministro Eléctrico

Para ser considerado un pequeño sistema fotovoltaico este debe tener una capacidad instalada de máximo 10 kW conectada a baja tensión (220 volt), y la potencia del sistema sumada a la de otros generadores conectados al mismo transformador no debe superar el 10% de la capacidad de este (Ministerio de Energía, 2017).

- Solicitud de conexión
- Respuesta solicitud de conexión (5 días)
- TE4
- Notificación de conexión (10 días)
- Protocolo de conexión (15 días)

CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN TÉCNICA

En este capítulo se evaluará técnicamente una instalación fotovoltaica. Cabe mencionar, que la alternativa eólica no se evaluará debido a la mayor complejidad del estudio, pues no se puede abarcar una zona extensa, dado que la velocidad del viento tiende a ser variable en las zonas residenciales. Otra desventaja es un costo más elevado, duplicando al del fotovoltaico en igual capacidad de generación, esto implica que el tiempo de recuperación de la inversión es el doble (Jara, 2016).

Para la evaluación fotovoltaica se utilizaron datos del Explorador Solar del Ministerio de Energía, esta herramienta permite realizar una evaluación preliminar del potencial energético sobre cualquier sitio definido por el usuario. Los datos son obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, así como también de la Corporación Nacional Forestal y la Universidad Austral de Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

4.1 Tipo de instalación

Como alternativa de suministro eléctrico se propone realizar una instalación conectada a la red (On-grid), esto quiere decir que no se necesitan baterías para almacenar la energía. Esto permite que en el día se inyecta la corriente generada por los paneles solares a la red y en las horas que no hay producción de energía eléctrica se usa la que proviene de la compañía eléctrica. En la figura 4.1 se muestra un esquema básico de una instalación fotovoltaica conectada a la red.



Figura 4.1 Sistema fotovoltaico conectado a la red (Hacesol, s. f.).

4.2 Posicionamiento de los paneles

El funcionamiento de los paneles solares se basa en la luz y energía proveniente del Sol, por lo que la energía eléctrica producida será proporcional a la cantidad de luz que reciba el panel. Por lo que, mientras mayor sea la energía irradiada sobre el panel, mayor será la cantidad de energía eléctrica que obtiene a su salida. Las condiciones ideales de funcionamiento de un panel fotovoltaico estarán dadas en días despejados, con alto nivel de irradiación directa, con la superficie captadora perpendicular al sol y sin objetos que interpongan en la trayectoria de los rayos de luz solar. Las células fotovoltaicas no necesitan luz solar directa para generar electricidad, por lo que en días nublados también la generan, pero para alcanzar una mayor eficiencia necesita presencia de luz solar plena y que el panel reciba perpendicularmente los rayos del sol.

4.3 Condiciones y características

La ciudad de Concepción se encuentra ubicada en la Octava Región del Bío-Bío, en los 36° 79' de latitud sur y 73° 10' de longitud oeste, a una altitud media de 12 metros sobre el nivel del mar promedio.

4.4 Radiación

Las siguientes tablas muestran la radiación global, directa y difusa sobre un plano horizontal (Tabla 4.1), y sobre un plano inclinado (Tabla 4.2) orientado hacia el norte, con una inclinación igual a la latitud del sitio (30°). La radiación promedio al año es de 4,84 kWh/m²/día, donde enero, noviembre y diciembre concentran los valores más altos 7,71; 7,24 y 7,84, respectivamente. En la Figura 4.2 se muestra el promedio mensual de la insolación diaria, en noviembre, diciembre y febrero la radiación solar en el plano horizontal es mayor a la del plano inclinado, mientras que en los meses de mayo, junio y julio ocurre lo contrario, por lo que el panel solar debe tener una inclinación óptima, ya que, al ser fijo debe captar la mayor cantidad de radiación durante el año.

Tabla 4.1 Radiación incidente en el plano horizontal (kWh/m²/día)

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 6,23 | 5,40 | 4,29 | 2,69 | 1,55 | 1,26 | 1,29 | 1,86 | 3,25 | 4,30 | 5,66 | 6,27 |
| Difusa | 1,48 | 1,34 | 1,11 | 0,97 | 0,81 | 0,73 | 0,79 | 0,99 | 1,20 | 1,44 | 1,58 | 1,57 |
| Global | 7,71 | 6,74 | 5,40 | 3,66 | 2,36 | 1,99 | 2,08 | 2,85 | 4,45 | 5,74 | 7,24 | 7,84 |

Explorador Solar

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Tabla 4.2 Radiación incidente en un plano con inclinación de 30° [kWh/m²/día]

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 5,39 | 5,36 | 5,19 | 4,07 | 2,89 | 2,64 | 2,56 | 3,04 | 4,24 | 4,55 | 5,12 | 5,23 |
| Difusa | 1,33 | 1,20 | 1,00 | 0,87 | 0,73 | 0,65 | 0,71 | 0,89 | 1,08 | 1,30 | 1,42 | 1,41 |
| Suelo | 0,19 | 0,16 | 0,13 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,11 | 0,14 | 0,17 | 0,19 |
| Global | 6,91 | 6,72 | 6,32 | 5,03 | 3,68 | 3,34 | 3,32 | 4,00 | 5,43 | 5,99 | 6,71 | 6,83 |

Explorador Solar

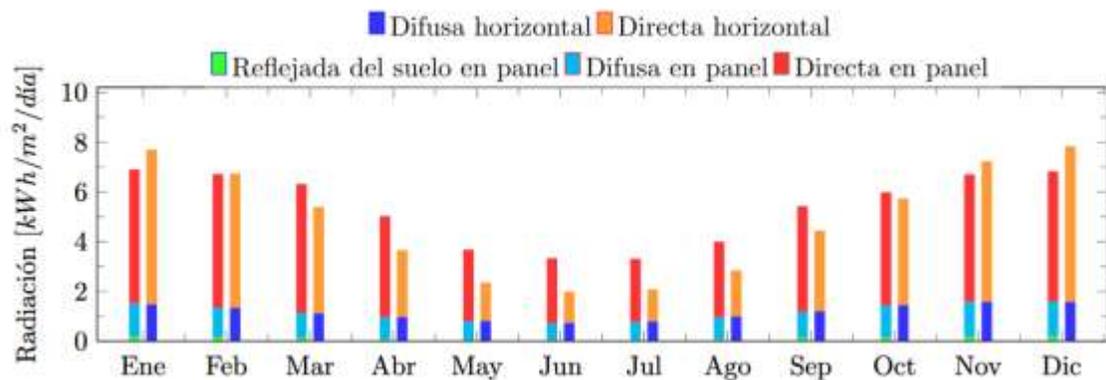


Figura 4.2 Promedio mensual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada del suelo (Explorador Solar)

4.4.1 Ciclo diario de radiación

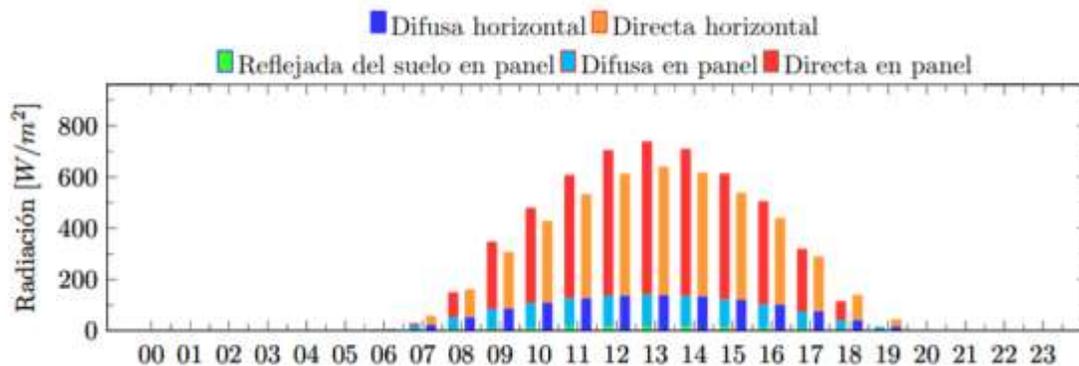


Figura 4.3 Promedio horario de la radiación global instantánea incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada en el suelo (Explorador Solar)

4.4.2 Variabilidad año a año

En las tablas 4.3 y 4.4 se muestra la radiación incidente en el plano horizontal y en el plano inclinado respectivamente, en la figura 4.4 se puede ver gráficamente las radiaciones anuales, donde no se observa una variación de los datos, lo que permite hacer una buena aproximación de los años futuros.

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Tabla 4.3 Radiación incidente en el plano horizontal ($kWh/m^2/día$)

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 3,53 | 3,62 | 3,66 | 3,66 | 3,68 | 3,75 | 3,75 | 3,65 | 3,52 | 3,71 | 3,73 | 3,57 |
| Difusa | 1,20 | 1,18 | 1,15 | 1,17 | 1,14 | 1,13 | 1,16 | 1,18 | 1,21 | 1,15 | 1,15 | 1,18 |
| Global | 4,73 | 4,80 | 4,81 | 4,83 | 4,82 | 4,88 | 4,88 | 4,83 | 4,73 | 4,86 | 4,88 | 4,75 |

Explorador Solar

Tabla 4.4 Radiación incidente en un plano con inclinación de 30° ($kWh/m^2/día$)

| Año | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Directa | 3,98 | 4,08 | 4,14 | 4,20 | 4,15 | 4,28 | 4,40 | 4,23 | 4,05 | 4,23 | 4,21 | 4,11 |
| Difusa | 1,07 | 1,06 | 1,04 | 1,05 | 1,03 | 1,01 | 1,04 | 1,06 | 1,09 | 1,03 | 1,04 | 1,06 |
| Suelo | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,11 |
| Global | 5,16 | 5,26 | 5,37 | 5,37 | 5,30 | 5,41 | 5,56 | 5,41 | 5,25 | 5,43 | 5,37 | 5,28 |

Explorador Solar

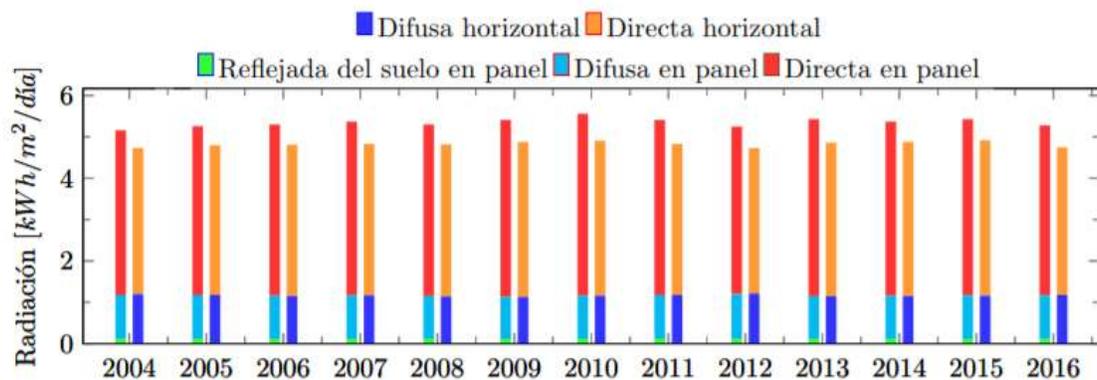


Figura 4.4 Promedio anual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado para cada año de simulación (Explorador Solar)

4.5 Nubosidad

La nubosidad es la componente atmosférica que remueve mayor cantidad de radiación incidente, a partir de imágenes del satélite geoestacionado GOES, el Explorador Solar calcula la frecuencia de nubosidad para cada hora y mes. Debido a que para la mayor parte del país se utilizan las imágenes del canal visible en la detección de nubosidad, el dato solo está disponible para las horas diurnas. La Tabla 4.5 muestra la frecuencia de nubosidad diurna mensual, mientras que la figura 4.5 muestra gráficamente el ciclo anual de frecuencia de nubosidad diurna, donde agosto presenta la mayor frecuencia.

Tabla 4.5 Frecuencia de nubosidad diurna mensual

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 10,01 | 9,75 | 8,49 | 12,20 | 13,86 | 12,58 | 14,72 | 16,76 | 13,24 | 14,60 | 13,31 | 11,76 |

Explorador Solar

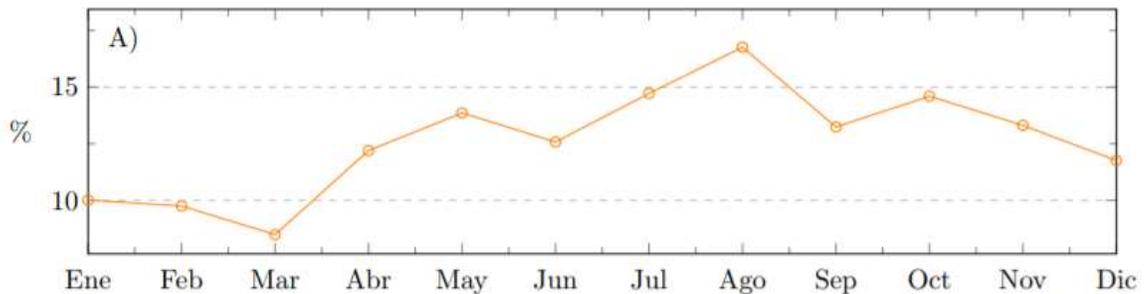


Figura 4.5 Ciclo anual de frecuencia de nubosidad diurna (Explorador Solar)

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Tabla 4.6: Porcentaje de nubosidad por hora. Los ceros corresponden a horas donde no hay datos de nubosidad

| | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
| % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,23 | 8,30 | 14,63 | 24,45 | 37,33 | 36,99 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| % | 34,59 | 33,24 | 31,94 | 31,96 | 23,10 | 16,74 | 9,51 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Explorador Solar

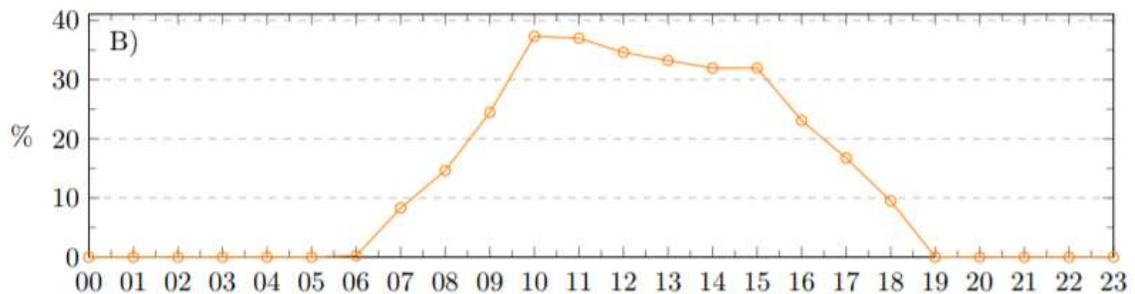


Figura 4.6Ciclo diario de frecuencia de nubosidad (Explorador Solar)

4.6 Temperatura

La temperatura ambiental afecta la eficiencia de las celdas fotovoltaicas. Las estimaciones de temperaturas que se muestran están basadas en los resultados del Explorador Eólico. A continuación, se evidencia el promedio mensual de temperatura (Tabla 4.7). En la figura 4.7 se muestra que enero y febrero tienen la mayor temperatura mensual lo que baja la eficiencia del panel fotovoltaico.

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Tabla 4.7: Temperatura promedio mensual

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °C | 16,05 | 16,65 | 15,82 | 14,28 | 11,96 | 12,67 | 11,19 | 10,99 | 11,25 | 12,16 | 12,46 | 14,62 |

Explorador Solar

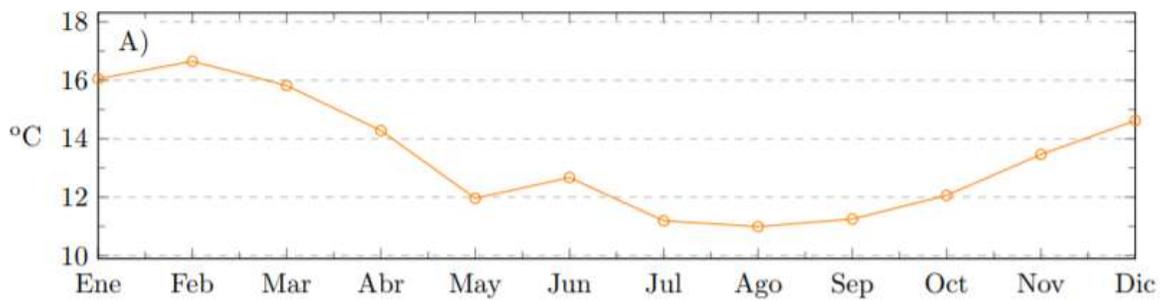


Figura 4.7 Ciclo diario de la temperatura media (Explorador Solar)

A continuación, se evidencia la temperatura promedio horaria (Tabla 4.8). En la figura 4.8 se muestra que entre las 11:00 y 18:00 hrs. hay una mayor temperatura horaria lo que es coincidente con la mayor radiación que recibe el panel solar.

Tabla 4.8: Temperatura promedio para cada hora

| | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
| °C | 11,33 | 10,96 | 10,58 | 10,24 | 9,89 | 9,55 | 9,38 | 10,01 | 11,02 | 12,52 | 14,15 | 15,84 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| °C | 16,96 | 18,80 | 18,41 | 18,16 | 17,59 | 16,82 | 15,62 | 14,53 | 13,57 | 12,76 | 12,13 | 11,71 |

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Explorador Solar

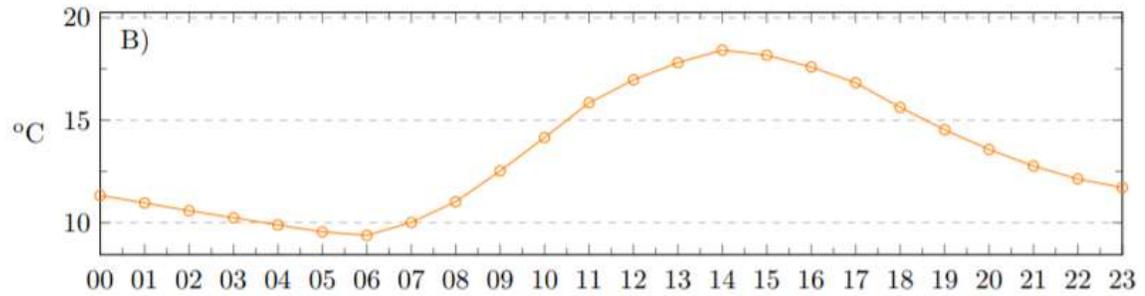


Figura 4.8 Ciclo anual de la temperatura media (Explorador Solar)

4.7 Viento

La velocidad del viento interviene en el enfriamiento de las celdas fotovoltaicas, y por lo tanto en su eficiencia, además puede afectar la integridad del montaje de los paneles. Las estimaciones de viento corresponden a resultados del Explorador Eólico para una altura de 5,5 metros. A continuación, se evidencia el promedio mensual de la magnitud de viento (Tabla 4.9). En la figura 4.9 se muestra que en noviembre, diciembre y enero tiene la mayor magnitud de viento presentando una mejor eficiencia para las celdas fotovoltaicas al funcionar como refrigerante.

Tabla 4.9: Promedio mensual de la magnitud de viento

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| m/s | 2,81 | 2,39 | 1,93 | 1,92 | 1,92 | 2,65 | 2,83 | 2,74 | 2,08 | 2,14 | 3,01 | 2,95 |

Explorador Solar

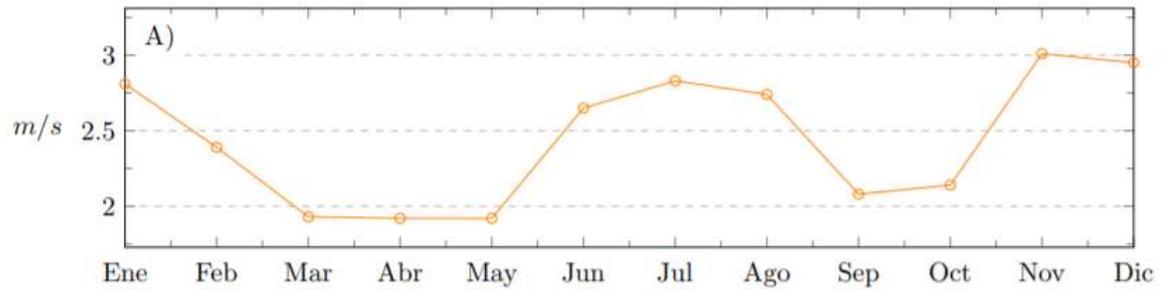


Figura 4.9 Ciclo diario de la magnitud de viento (Explorador Solar)

4.8 Inclinación óptima

Para lograr una incidencia directa de radiación solar la superficie del panel debe tener una inclinación de 30° , debido a esto se deben instalar estructuras metálicas para compensar la inclinación de la cubierta de la vivienda.

4.9 Generación eléctrica fotovoltaica

Para el cálculo de la potencia generada por las alternativas es necesario estimar las horas de sol equivalente, estas horas son el tiempo equivalente de radiación solar que incide sobre la superficie del panel de diseño de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Así pues, las horas de sol equivalente tienen el mismo valor de la radiación solar medida en kWh/m^2 . En la tabla 4.10 se muestran las radiaciones medias mensuales y la energía producida por mes para una instalación de 1 kW. En la figura 4.10 se ve el ciclo anual de generación fotovoltaica teniendo una gran baja en los meses de mayo, junio y julio.

Capítulo 4: Evaluación Técnica

Tabla 4.10 Promedio de la generación total en cada mes

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| HSe | 6,91 | 6,72 | 6,32 | 5,03 | 3,68 | 3,34 | 3,32 | 4,00 | 5,43 | 5,99 | 6,71 | 6,83 |
| kWh | 167,9 | 143,6 | 146,1 | 111,6 | 85,1 | 74,9 | 77,5 | 94,2 | 123,8 | 144,3 | 159,3 | 167,1 |

Explorador Solar

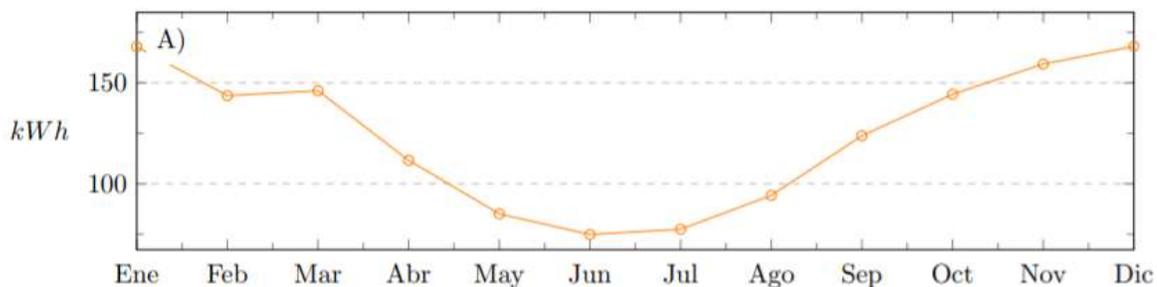


Figura 4.10 Ciclo anual de la generación fotovoltaica (Explorador Solar)

A continuación, se evidencia la generación para cada hora (Tabla 4.11). En la figura 4.11 se muestra el ciclo diario de generación alcanzando su máximo a las 13:00 hrs.

Tabla 4.11 Promedio de la generación para cada hora

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hora | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 |
| kWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,09 | 0,25 | 0,36 | 0,46 |
| Hora | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| kWh | 0,53 | 0,56 | 0,54 | 0,48 | 0,42 | 0,27 | 0,10 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Explorador Solar

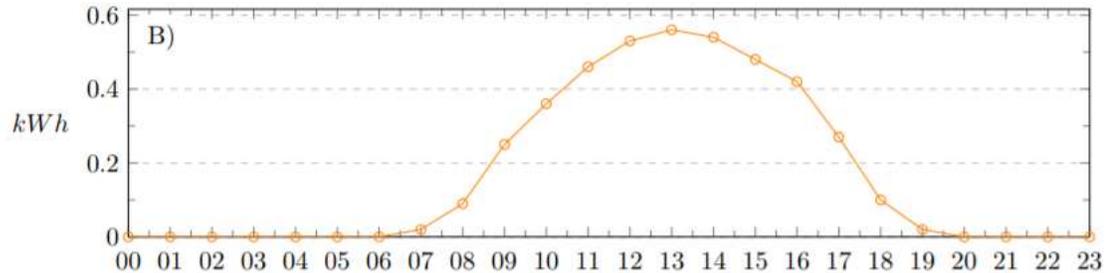


Figura 4.11 Ciclo diario de generación (Explorador Solar)

4.10 Estudio de generación por cada alternativa

Para este estudio se proponen tres alternativas fotovoltaicas en la que solo cambia la capacidad instalada. La principal restricción es el área disponible para la instalación de los paneles, esta debe tener radiación directa. Para el cálculo de la energía diaria producida se utilizará la ecuación 1, para la energía mensual producida la ecuación 2 y para la producción anual la ecuación 3.

$$E. \text{ diaria producida} = HSe \times \text{Potencia instalada} \text{ (kWh/día)}$$

Donde:

HSe = Hora solar equivalente

$$E. \text{ mensual producida} = E. \text{ diaria instalada} \times \text{Nro. días mes} \text{ (kWh/mes)}$$

4.10.1 Alternativa 1 2kW instalados

Para la alternativa 1 se considera la instalación de 6 paneles fotovoltaicos de 320 kW obteniendo una potencia de 1.92 kW. Para realizar esta instalación se necesitan 12 m² de superficie disponible con radiación solar directa. En la tabla 13 se muestra el promedio de generación mensual para una eficiencia del 100%. En la Tabla 4.12 se indica la generación eléctrica anual en 25 años, la eficiencia de los paneles baja linealmente hasta un 80% en el último año

Capítulo 4: Evaluación Técnica

estudiado, esto implica un descenso de la producción de electricidad de 598 kWh.

Tabla 4.12: Promedio de generación para una instalación de 2kW

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HSe | 6,9 | 6,7 | 6,3 | 5,0 | 3,7 | 3,3 | 3,3 | 4,0 | 5,4 | 6,0 | 6,7 | 6,8 |
| kWh | 167,9 | 143,6 | 146,1 | 111,6 | 85,1 | 74,9 | 77,5 | 94,2 | 123,8 | 144,3 | 159,3 | 167,1 |
| kWh | 335,8 | 287,3 | 292,1 | 223,2 | 170,2 | 149,7 | 154,9 | 188,5 | 247,5 | 288,7 | 318,6 | 334,2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13 Generación eléctrica anual en 25 años

| | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Eficiencia | 100% | 99% | 98% | 98% | 97% | 96% | 95% | 94% | 93% |
| kWh | 2.991 | 2.966 | 2.941 | 2.916 | 2.891 | 2.866 | 2.841 | 2.816 | 2.791 |
| Año | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Eficiencia | 93% | 92% | 91% | 90% | 89% | 88% | 88% | 87% | 86% |
| kWh | 2.766 | 2.741 | 2.716 | 2.692 | 2.667 | 2.642 | 2.617 | 2.592 | 2.567 |
| Año | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | |
| Eficiencia | 85% | 84% | 83% | 83% | 82% | 81% | 80% | | |
| kWh | 2.542 | 2.517 | 2.492 | 2.467 | 2.442 | 2.417 | 2.393 | | |

Fuente: Elaboración propia

4.10.2 Alternativa 2 5kW instalados

Para la alternativa 2 se considera la instalación de 16 paneles fotovoltaicos de 320 kW obteniendo una potencia de 5.12 kW. Para realizar esta instalación se necesitan 31m² de superficie disponible con radiación solar directa. En la tabla 4.14 se muestra el promedio de generación mensual para una eficiencia del 100%. En la Tabla 4.15 se indica la generación eléctrica anual en 25 años, la eficiencia de los paneles baja linealmente hasta un 80% en el último año estudiado, esto implica un descenso de la producción de electricidad de 1496 kWh.

Tabla 4.14 Promedio de generación para una instalación de 5kW

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HSe | 6,9 | 6,7 | 6,3 | 5,0 | 3,7 | 3,3 | 3,3 | 4,0 | 5,4 | 6,0 | 6,7 | 6,8 |
| kWh | 167,9 | 143,6 | 146,1 | 111,6 | 85,1 | 74,9 | 77,5 | 94,2 | 123,8 | 144,3 | 159,3 | 167,1 |
| kWh | 839,6 | 718,2 | 730,4 | 558,0 | 425,4 | 374,3 | 387,4 | 471,2 | 618,8 | 721,7 | 796,4 | 835,5 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.15 Generación eléctrica anual en 25 años

| | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Eficiencia | 100% | 99% | 98% | 98% | 97% | 96% | 95% | 94% | 93% |
| kWh | 7.477 | 7.414 | 7.352 | 7.290 | 7.227 | 7.165 | 7.103 | 7.040 | 6.978 |
| Año | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Eficiencia | 93% | 92% | 91% | 90% | 89% | 88% | 88% | 87% | 86% |
| kWh | 6.916 | 6.854 | 6.791 | 6.729 | 6.667 | 6.604 | 6.542 | 6.480 | 6.417 |
| Año | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | |
| Eficiencia | 85% | 84% | 83% | 83% | 82% | 81% | 80% | | |
| kWh | 6.355 | 6.293 | 6.231 | 6.168 | 6.106 | 6.044 | 5.981 | | |

Fuente: Elaboración propia

4.10.3 Alternativa 3 10kW instalados

Para la alternativa 2 se considera la instalación de 32 paneles fotovoltaicos de 320 kW obteniendo una potencia de 5.12 kW. Para realizar esta instalación se necesitan 62m² de superficie disponible con radiación solar directa. En la tabla 4.16 se muestra el promedio de generación mensual para una eficiencia del 100%. En la Tabla 4.17 se indica la generación eléctrica anual en 25 años, la eficiencia de los paneles baja linealmente hasta un 80% en el último año estudiado, esto implica un descenso de la producción de electricidad de 2990 kWh.

Tabla 4.16 Promedio de generación para una instalación de 10kW

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| HSe | 6,9 | 6,7 | 6,3 | 5,0 | 3,7 | 3,3 | 3,3 | 4,0 | 5,4 | 6,0 | 6,7 | 6,8 |
| kWh | 167,9 | 143,6 | 146,1 | 111,6 | 85,1 | 74,9 | 77,5 | 94,2 | 123,8 | 144,3 | 159,3 | 167,1 |
| kWh | 1679 | 1436 | 1460 | 1116 | 850 | 748 | 774 | 942 | 1237 | 1443 | 1592 | 1670 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17 Generación eléctrica anual en 25 años

| | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Eficiencia | 100% | 99% | 98% | 98% | 97% | 96% | 95% | 94% | 93% |
| kWh | 14.953 | 14.829 | 14.704 | 14.579 | 14.455 | 14.330 | 14.206 | 14.081 | 13.956 |
| Año | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Eficiencia | 93% | 92% | 91% | 90% | 89% | 88% | 88% | 87% | 86% |
| kWh | 13.832 | 13.707 | 13.582 | 13.458 | 13.333 | 13.209 | 13.084 | 12.959 | 12.835 |
| Año | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | |
| Eficiencia | 85% | 84% | 83% | 83% | 82% | 81% | 80% | | |
| kWh | 12.710 | 12.586 | 12.461 | 12.336 | 12.212 | 12.087 | 11.963 | | |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se muestra la evaluación económica de las tres alternativas fotovoltaicas, mostrando los costos de la inversión y el análisis costo beneficio de cada uno de ellos.

5.1 Costos

Para este proyecto se cotizaron 3 kits fotovoltaicos On grid, como se muestra en la Tabla 5.1. Estos precios incluyen paneles, inversores, cables, medidor bidireccional, estructura para los paneles, instalación y tramites de conexión.

Tabla 5.1 Cotización (Elaboración propia).

| Ítem | Descripción | Precio |
|------|-----------------------|--------------|
| 1 | Kit fotovoltaico 2 kW | \$ 2.003.100 |
| 2 | Kit fotovoltaico 5 kW | \$ 3.682.800 |
| 3 | Kit fotovoltaico 10kW | \$ 7.279.800 |

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Enfoque costo beneficio

El análisis costo beneficio se enfoca en el retorno de la inversión. Cuando este indicador es mayor a 1 representa que el proyecto es rentable. Para los cálculos se usará una tasa social de descuento de un 6% obtenida del Sistema Nacional de Inversiones. La evaluación económica se realizó a 25 años, dado que el

Capítulo 5: Evaluación Económica

fabricante garantiza el 80% de eficiencia en sus paneles fotovoltaicos transcurridos esos años.

5.2.1 Alternativa 1

La alternativa N°1 tiene una inversión de \$2.300.100, más un mantenimiento de \$50.000 cada 5 años, como se muestra en la Tabla 5.2, esta tabla es un resumen del flujo de caja. En el anexo 1 se puede ver el flujo de caja completo.

Tabla 5.2 Resumen flujo de caja.

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 25 |
|---------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ahorro | 0 | 413.937 | 410.488 | 407.039 | 403.589 | 400.140 | 331.150 |
| Mantenimiento | 0 | - | - | - | - | -50.000 | - |
| Inversión | -2.300.100 | | | | | | |
| Flujo de caja | -2.300.100 | 413.937 | 410.488 | 407.039 | 403.589 | 350.140 | 331.150 |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.3 se muestran los indicadores de la evaluación económica, teniendo un costo beneficio de 2.04 lo que dice que el beneficio es el doble del costo, y que el kWh tiene un costo de \$35.7CLP.

Capítulo 5: Evaluación Económica

Tabla 5.3 Indicadores.

| Indicador | Valor |
|------------------|-----------------|
| Inversión | \$-2.300.100 |
| VAN | \$2.489.626,99 |
| Beneficio actual | \$4.891.463,13 |
| Costo actual | \$-2.401.836,14 |
| Beneficio anual | \$382.643,11 |
| Costo anual | \$187.887,76 |
| B/C | 2,04 |
| \$/kWh | \$35,7 |

Fuente: Elaboración propia

Alternativa 2

La alternativa N°2 tiene una inversión de \$3.682.800 más un mantenimiento de \$90.000 cada 5 años, como se muestra en la Tabla 5.4, esta tabla es un resumen del flujo de caja. En el anexo 2 se puede ver el flujo de caja completo.

Tabla 5.4. Resumen flujo de caja

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 25 |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Ahorro | 0 | 1.034.844 | 1.026.220 | 1.017.596 | 1.008.973 | 1.000.349 | 827.875 |
| Mantenimiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -90.000 | 0 |
| Inversión | -3.682.800 | | | | | | |
| Flujo de caja | -3.682.800 | 1.034.844 | 1.026.220 | 1.017.596 | 1.008.973 | 910.349 | 827.875 |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.5 se muestran los indicadores de la evaluación económica, teniendo un costo beneficio de 3.16 lo que dice que el beneficio es el triple del costo, y que el kWh tiene un costo de \$22.98CLP.

Capítulo 5: Evaluación Económica

Tabla 5.5 Indicadores (Elaboración propia).

| Indicador | Valor |
|------------------|-----------------|
| Inversión | \$-3.682.800 |
| VAN | \$8.362.732,77 |
| Beneficio actual | \$12.228.657,82 |
| Costo actual | \$-3.865.925,05 |
| Beneficio anual | \$956.607,77 |
| Costo anual | \$302.418,63 |
| B/C | 3,16 |
| \$/kWh | \$22,98 |

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Alternativa 3

La alternativa N°1 tiene una inversión de \$7.279.800 más un mantenimiento de \$150.000 cada 5 años, como se muestra en la Tabla 5.6, esta tabla es un resumen del flujo de caja. En el anexo 3 se puede ver el flujo de caja completo.

Tabla 5.6 Resumen flujo de caja (Elaboración propia).

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 25 |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ahorro | 0 | 2.069.687 | 2.052.440 | 2.035.193 | 2.017.945 | 2.000.698 | 1.655.750 |
| Mantenimiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -150.000 | 0 |
| Inversión | -7.279.800 | | | | | | |
| Flujo de caja | -7.279.800 | 2.069.687 | 2.052.440 | 2.035.193 | 2.017.945 | 1.850.698 | 1.655.750 |

En la Tabla 5.7 se muestran los indicadores de la evaluación económica, teniendo un costo beneficio de 3.22 lo que dice que el beneficio es el doble del costo, y que el kWh tiene un costo de \$22.54CLP.

Capítulo 5: Evaluación Económica

Tabla 5.7 Indicadores

| Indicador | Valor |
|------------------|-----------------|
| Inversión | \$-7.279.800 |
| VAN | \$16.872.307,22 |
| Beneficio actual | \$24.457.315,63 |
| Costo actual | \$-7.585.008,41 |
| Beneficio anual | \$1.913.215,54 |
| Costo anual | \$593.350,32 |
| B/C | 3,22 |
| \$/kWh | \$22,54 |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Finalizando el estudio, se determinó que la mejor alternativa de suministro eléctrico es la fotovoltaica, debido a que presenta más ventajas que la solución eólica, su implementación no solo es más factible técnicamente en viviendas, sino además es más económica y no afecta visualmente al entorno. Existe una limitación técnica a la hora de proyectar esta solución, se debe considerar el espacio disponible para la instalación de paneles solares en viviendas. Se presentaron 3 alternativas de distintas potencias, a mayor espacio disponible se pueden instalar más paneles, generando más energía eléctrica. Siempre teniendo en consideración la norma actual, la cual permite instalaciones fotovoltaicas de hasta 10 kW para usuarios de baja tensión y que no sobrepasen el 10% de capacidad del transformador de distribución al que esté conectado.

Ambientalmente la alternativa fotovoltaica presenta una recuperación de la energía gastada en la fabricación de sus componentes de aproximadamente un año y medio, lo que es favorable, considerando que tiene una vida útil que ronda los 25 años. Mientras que la huella de carbono es tan solo de 25g CO₂ -eq/kWh en comparación a un estimado de 1000 g CO₂ -eq/kWh cuando de usan energías fósiles. La instalación de paneles solares por lo general se realiza en las cubiertas de las viviendas, por lo que no produce una contaminación visual del entorno.

Económicamente el proyecto tiene una recuperación de la inversión que ronda los 4 a 6 años, dependiendo de la capacidad instalada, si bien es una inversión importante, los beneficios están encima de los costos. El kWh producido por la instalación fotovoltaica tiene un costo de \$23, mientras que la compañía eléctrica lo vende a un precio de \$138 (Valor correspondiente a la empresa distribuidora CGE para Concepción en junio 2019, para clientes BT1).

REFERENCIAS

- Battisti, L., Benini, E., Brighenti, A., Dell'Anna, S., & Raciti Castelli, M. (2018). Small wind turbine effectiveness in the urban environment. *Renewable Energy*, 129, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.062>
- Bosio, A., Rosa, G., & Romeo, N. (2018). Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*, 175, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.018>
- Bukala, J., Damaziak, K., Kroszczyński, K., Krzeszowiec, M., & Malachowski, J. (2015). Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.06.017>
- Fine, J. P., Dworkin, S. B., & Friedman, J. (2019). A methodology for predicting hybrid solar panel performance in different operating modes. *Renewable Energy*, 130, 1198-1206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.082>
- Fundación Terram. (2018). *Termoelectricidad a carbón y las normativas de emisión y calidad del aire en Chile*.
- Generadoras de Chile. (2017). *Reporte anual 2017 asociación de generadoras de Chile*. Recuperado de <http://generadoras.cl/media/page-files/526/Reporte%20Anual%20Generadoras%20de%20Chile%202017.pdf>
- Hacesol. (s. f.). *Sistema On Grid (Sistema conectado a la red eléctrica)*. Recuperado de <http://www.hacesol.cl/index.php/proyectos/>

- HIMELCO. (s. f.). *Tipos de Inversores*. Recuperado de <https://himelco.cl/inversor-de-voltaje/tipos-de-inversores/>
- Intituto de Energia Solar. (2018). *Gráficos significativos energía solar fotovoltaica*. Recuperado de https://www.ies.upm.es/sfs/IES/IES-UPM/Portada/2018_PV_Espa%C3%B1a.pdf
- Jara, B. (2016). *Analizar por medio de técnicas de evaluación social la factibilidad de aplicar energías alternativas para uso domiciliario en comunidades críticas de la comuna de Florida*.
- MacPhee, D. W., & Beyene, A. (2019). Performance analysis of a small wind turbine equipped with flexible blades. *Renewable Energy*, 132, 497-508. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.014>
- Mariska de Wild-Scholten, M. J. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037>
- Maureira, H., Acevedo, R., & Souza, R. (2018). *RESUMEN ESTRATÉGICO RADIOGRAFÍA DEL AGUA Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. 38.
- Ministerio de Energía. (2017). *Ley de Generación Distribuida*. Recuperado de http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SEC2005/ELECTRICIDAD_SEC/ERNC/GENERACION_DISTRIBUIDA/DOCUMENTACION/TAB6121713/1%20PRESENTACION%20LEY%2020571.PDF
- Santos, M., & González, M. (2019). Factors that influence the performance of wind farms. *Renewable Energy*, 135, 643-651. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.033>

ANEXOS

Anexo A – Flujo de caja alternativa 1

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Ahorro | 0 \$ | 413.937 \$ | 410.488 \$ | 407.039 \$ | 403.589 \$ |
| Mantención | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Inversión | \$ -2.300.100 | | | | |
| Flujo de caja | \$ -2.300.100 | \$ 413.937 | \$ 410.488 | \$ 407.039 | \$ 403.589 |
| Flujo de caja acum. | \$ -2.300.100 | \$ -1.917.457 | \$ -1.534.814 | \$ -1.152.171 | \$ -769.528 |

| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 400.140 | \$ 396.690 | \$ 393.241 | \$ 389.791 | \$ 386.342 | \$ 382.892 | \$ 379.443 |
| -50.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | -50.000 | 0 |
| \$ 350.140 | \$ 396.690 | \$ 393.241 | \$ 389.791 | \$ 386.342 | \$ 332.892 | \$ 379.443 |
| \$ -386.884 | \$ -4.241 | \$ 378.402 | \$ 761.045 | \$ 1.143.688 | \$ 1.526.331 | \$ 1.908.974 |

| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 375.993 | \$ 372.544 | \$ 369.094 | \$ 365.645 | \$ 362.195 | \$ 358.746 |
| 0 | 0 | 0 | -50.000 | 0 | 0 |
| \$ 375.993 | \$ 372.544 | \$ 369.094 | \$ 315.645 | \$ 362.195 | \$ 358.746 |
| \$ 2.291.617 | \$ 2.674.260 | \$ 3.056.904 | \$ 3.439.547 | \$ 3.822.190 | \$ 4.204.833 |

| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 355.296 | \$ 351.847 | \$ 348.397 | \$ 344.948 | \$ 341.498 | \$ 338.049 |
| 0 | 0 | -50.000 | 0 | 0 | 0 |
| \$ 355.296 | \$ 351.847 | \$ 298.397 | \$ 344.948 | \$ 341.498 | \$ 338.049 |
| \$ 4.587.476 | \$ 4.970.119 | \$ 5.352.762 | \$ 5.735.405 | \$ 6.118.048 | \$ 6.500.691 |

| 24 | 25 |
|--------------|--------------|
| \$ 334.599 | \$ 331.150 |
| 0 | 0 |
| \$ 334.599 | \$ 331.150 |
| \$ 6.883.335 | \$ 7.265.978 |

Anexo B – Flujo de caja alternativa 2

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|-----------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | | \$ | \$ | | | |
| Ahorro | 0 | 1.034.844 | 1.026.220 | \$1.017.596 | \$1.008.973 | \$1.000.349 |
| Mantención | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -90.000 |
| Inversión | \$ - | | | | | |
| | 3.682.800 | | | | | |
| | \$ - | \$ | \$ | | | \$ |
| Flujo de caja | 3.682.800 | 1.034.844 | 1.026.220 | \$1.017.596 | \$1.008.973 | 910.349 |
| Flujo de caja | \$ - | | | \$ - | | \$ |
| acum. | 3.682.800 | \$-2.909.317 | \$-1.952.710 | 996.102 | \$ -39.494 | 917.114 |

| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| \$ | 991.725 | \$ 983.101 | \$ 974.478 | \$ 965.854 | \$ 957.230 | \$ 948.607 | \$ 939.983 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | -90.000 | 0 | 0 |
| \$ | 991.725 | \$ 983.101 | \$ 974.478 | \$ 965.854 | \$ 867.230 | \$ 948.607 | \$ 939.983 |
| \$ | 1.873.722 | \$2.830.329 | \$3.786.937 | \$4.743.545 | \$5.700.153 | \$6.656.760 | \$ 7.613.368 |

| | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ | 931.359 | \$ 922.736 | \$ 914.112 | \$ 905.488 | \$ 896.865 | \$ 888.241 | \$ 879.617 |
| | 0 | 0 | -90.000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \$ | 931.359 | \$ 922.736 | \$ 824.112 | \$ 905.488 | \$ 896.865 | \$ 888.241 | \$ 879.617 |
| \$ | 8.569.976 | \$9.526.584 | \$10.483.191 | \$11.439.799 | \$12.396.407 | \$13.353.015 | \$14.309.623 |

| | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ | 870.993 | \$ 862.370 | \$ 853.746 | \$ 845.122 | \$ 836.499 | \$ 827.875 |
| | -90.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \$ | 780.993 | \$ 862.370 | \$ 853.746 | \$ 845.122 | \$ 836.499 | \$ 827.875 |
| \$ | 15.266.230 | \$16.222.838 | \$17.179.446 | \$18.136.054 | \$19.092.661 | \$20.049.269 |

Anexo C – Flujo de caja alternativa 3

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| | \$ | \$ | \$ | \$ | \$ | |
| Ahorro | 0 2.069.687 | 2.052.440 | 2.035.193 | 2.017.945 | 2.000.698 | - |
| Mantenimiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 150.000 |
| Inversión | \$ - 7.279.800 | | | | | |
| Flujo de caja | \$ - 7.279.800 | \$ 2.069.687 | \$ 2.052.440 | \$ 2.035.193 | \$ 2.017.945 | \$ 1.850.698 |
| Flujo de caja ac. | \$ - 7.279.800 | \$ -5.210.113 | \$ -3.157.673 | \$ -1.122.480 | \$ 895.465 | \$ 2.746.163 |

| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 1.983.450 | \$ 1.966.203 | \$ 1.948.956 | \$ 1.931.708 | \$ 1.914.461 | \$ 1.897.213 | \$ 1.879.966 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | -150.000 | 0 | 0 |
| \$ 1.983.450 | \$ 1.966.203 | \$ 1.948.956 | \$ 1.931.708 | \$ 1.764.461 | \$ 1.897.213 | \$ 1.879.966 |
| \$ 4.729.613 | \$ 6.695.816 | \$ 8.644.772 | \$10.576.480 | \$12.340.941 | \$14.238.154 | \$16.118.120 |

| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 1.862.719 | \$ 1.845.471 | \$ 1.828.224 | \$ 1.810.976 | \$ 1.793.729 | \$ 1.776.482 | \$ 1.759.234 |
| 0 | 0 | -150.000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \$ 1.862.719 | \$ 1.845.471 | \$ 1.678.224 | \$ 1.810.976 | \$ 1.793.729 | \$ 1.776.482 | \$ 1.759.234 |
| \$17.980.839 | \$19.826.310 | \$21.504.534 | \$23.315.510 | \$25.109.240 | \$26.885.721 | \$28.644.955 |

| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| \$ 1.741.987 | \$ 1.724.739 | \$ 1.707.492 | \$ 1.690.245 | \$ 1.672.997 | \$ 1.655.750 |
| -150.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \$ 1.591.987 | \$ 1.724.739 | \$ 1.707.492 | \$ 1.690.245 | \$ 1.672.997 | \$ 1.655.750 |
| \$30.236.942 | \$31.961.682 | \$33.669.174 | \$35.359.419 | \$37.032.416 | \$38.688.166 |