

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE

Estudio técnico y económico para la instalación de
energía solar fotovoltaica residencial conectado a la
red de distribución.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

José Ignacio Delgado Montoya

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor Guía: Mg. Ing. Aeronáutica Eugenia Torres

Profesor Correferente: Mg. Ing. Mauricio Reyes

2021

Agradecimientos

Las personas más importantes de la vida de cada individuo cambian con el tiempo y la vivencias, aunque debo destacar que existe algunas personas cercanas que siempre han estado aquí a mi lado, guiándome y apoyándome en el camino y me han permitido aprender cosas muy importantes de la vida, como que la relación de sangre no tiene ni una importancia sin sentimientos que respalden su compañía. La persona más importante de mi vida y a la cual le debo todo lo que logrado y conseguido gracias a su presencia y apoyo constante es mi papá, te agradezco toda la ayuda y apoyo que me has dado y que aun hoy con casi 28 años de vida lo continúes haciendo, gracias papi.

Hay muchas personas importantes en la vida de cada uno, mis tatas, José Montoya y José Pérez, ambos apoyándome de distintas formas, ayudándome a crecer, mi abuelita, que en paz descanse, espero que estes orgullosa estes donde estes, gracias por siempre prepararme comidas ricas y cuidarme. Mi pareja Amy, que me soporto todo este tiempo y me ayudo a terminar este documento, ojalá que con el tiempo sigamos avanzando juntos. Mis amigos que de formas más sutiles me ayudaron a terminar, dando pequeños empujones que en muchas ocasiones era necesarios para seguir el trabajo.

A ambos profesores les estoy muy agradecidos, por ayudarme a construir este documento y presentarlo de la manera más profesional posible y espero que cuando termine todo este proceso podamos llamarnos colegas.

Por último, aunque no esté presente estos últimos años de mi vida por motivos fuera de mi comprensión o manejo a mi madre.

Dedicatoria

Esta memoria está dedicada a mi padre, a mis dos abuelos y a mi abuelita, que en paz descanse, también a mi pareja Amy que en este momento se encuentra a mi lado dándome los últimos empujones para terminar.

Siglas

ERNC	: Energía Renovable No Convencional
ERV	: Energía Renovables Variables
Fv	: Foto voltaico
EVA	: Ethylene Vinyl Acetate (etileno acetato de vinilo)
NREL	: The National Renewable Energy Laboratory (Laboratorio de energía renovable nacional)
CNE	: Comisión Nacional de Energía
GIZ	: Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad de cooperación internacional)
VAN	: Valor Actual Neto
PIB	: Producto Interno Bruto
IR	: Índice de Retorno

Simbología

mm	:	Milímetro
cm	:	Centímetro
m	:	Metro
m ²	:	Metros cuadrados
m ³	:	Metros cúbicos
kg	:	Kilogramo
V	:	Voltaje
V _n	:	Voltaje nominal
A	:	Amperaje
Ah	:	Amperes hora
ms	:	Milisegundos
hrs	:	Horas
Hz	:	Hertz
W	:	Watt
kW	:	Kilowatt
MW	:	Mega watt
Wh	:	Watt hora
kWh	:	Kilowatt hora
MWh	:	Mega watt hora
clp	:	Pesos chilenos
usd	:	Dólar Estadounidense

Capítulo 1: Resumen

Es importante considerar los efectos de las emisiones de contaminantes provocados por la actividad humana al medio ambiente, por esto, en la actualidad toma una gran relevancia el uso e integración de sistemas que no produzcan emisiones dañinas, siendo una de las opciones el uso de las energías renovables, donde encontramos las ERNC (Energías Renovables No Convencionales) o ERV (Energías Renovables Variables), en cuya categoría se encuentran las energías de fuente eólica, mareomotriz, mini hidroeléctrica, geotérmica, solar, entre otras. En este sentido, nace la necesidad y se encuentra la motivación para la redacción del presente documento, el cual aborda el proceso de estudio técnico y económico de la instalación de un sistema fotovoltaico en una residencia, cuyo objetivo es el de incorporar esta al sistema interconectado nacional, fomentando la generación y uso de energías limpias en el país. Se logra identificar que actualmente la utilización de esta tecnología a menor escala es más costosa de implementar, en contra posición a generadoras de gran volumen, esto provocado principalmente por un problema de economías de escala (costo unitario) lo cual decanta en una reducción del rendimiento económico del proyecto.

Chapter 1: Abstract.

It's important to consider the effects of the emissions of pollutants caused by human activity to the environment, for this reason, at present the use and integration of systems that don't produce harmful emissions is of great relevance, one of the options being the use of renewable energies, where we find the NCRE (Non-Conventional Renewable Energies) or ERV (Variable Renewable Energies), in which category are the energies from wind, tidal, mini-hydroelectric, geothermal, solar, among others. In this sense, the need arises and the motivation is found for the writing of this document, which addresses the process of technical and economic study of the installation of a photovoltaic system in a residence, whose objective is to incorporate it into the national interconnected system, promoting the generation and use of clean energy in the country. It's possible to identify that currently the use of this technology on a smaller scale is more expensive to implement, in contrast to large-volume generators, this mainly caused by a problem of economies of scale (unit cost) which leads to a reduction in the economic performance of the project.

Índice de contenidos

Agradecimientos	2
Dedicatoria	2
Siglas	3
Simbología	4
Capítulo 1: Resumen	5
Chapter 1: Abstract.	5
Índice de contenidos	6
Índice de figuras	8
Índice de tablas	10
Índice de gráficos	12
Índice de ecuaciones	13
Capítulo 2: Objetivos	14
Capítulo 2.1: Objetivos generales	14
Capítulo 2.2: Objetivos específicos	14
Capítulo 3: Antecedentes y requerimientos del proyecto	15
3.1: Potencia requeridas y estimadas para las residencias	18
Capítulo 4: Antecedentes de energía solar	22
4.1: Conceptos básico energía solar	24
4.2: Tecnología fotovoltaica	28
4.4: Mercado energía solar.	33
Capítulo 5: Legislación, normativa y reglamento en Chile sobre instalación de paneles solares en residencias	35
5.1: Legislación nacional	35
5.2: Reglamento	36
5.3: Normativa	39
Capítulo 6: Análisis técnico	41
6.1: Generalidades	41
6.2: Calculo de sombras	42
6.3: Calculo de potencia instalada	46
6.4: Calculo de excedentes a generar	48
6.4: Diseño de estructura de soporte	56
Capítulo 7: Análisis económico	61

7.1: Generalidades	61
7.2: Calculo de inversión general	62
7.3: Calculo de beneficios	66
7.4: Indicadores de rentabilidad del proyecto	69
7.5: Financiamiento	75
Capítulo 8: Conclusión.	77
Bibliografía	80
Anexos	85
Tipos de Celdas fotovoltaicas	85
Tablas con fracciones de consumo	89
Tablas con los beneficios asociados a los módulos fotovoltaicos	91
Tablas con datos importante de los sistemas con batería.	93
Tabla resumen para los módulos de prueba.	94

Índice de figuras

Figura 1:Primera residencia habitada.	16
Figura 2: Segunda residencia habitada.	17
Figura 3: Tercera residencia deshabitada.	17
Figura 4: Bodega a utilizar.	18
Figura 5: Concentrador cilíndrico parabólico.	23
Figura 6: Torre de concentración.	23
Figura 7: Disco Stirling.	23
Figura 8: Concentrador Lineal Fresnel.	23
Figura 9: Carta solar Santiago de Chile.	25
Figura 10: Carta solar, con la altura solar para Santiago de Chile y diferentes fechas.	25
Figura 11: Esquema de un sistema de seguimiento solar.	27
Figura 12: Concentrador solar fotovoltaico.	28
Figura 13: Celda fotovoltaica.	28
Figura 14: Panel fotovoltaico.	29
Figura 15: Se presenta la configuración más común para un panel solar fotovoltaico.	30
Figura 16: Panel fotovoltaico de celdas amorfas.	30
Figura 17: Panel fotovoltaico de celdas policristalino.	31
Figura 18: Panel fotovoltaico de celdas Monocristalinas.	32
Figura 19: Diagrama de conexión al sistema interconectado.	38
Figura 20: Ejemplo de panel fotovoltaico.	42
Figura 21: Trayectoria solar con la proyección del perfil de horizonte.	43
Figura 22: Representación gráfica de un sistema Fv en paralelo al techo, para M4, entregado por el programa PVSyst.	44
Figura 23: Representación gráfica de un sistema Fv aislado al techo, para M2, entregado por el programa PVSyst.	44
Figura 24: Imagen de referencia para el cálculo de sombras.	45
Figura 25: Imagen de referencia para el cálculo de la distancia d.	45
Figura 26: Representación gráfica de las pérdidas del sistema Fv.	53
Figura 27: Estructura de armadura de M1 utilizada en las simulaciones de Ansys.	56
Figura 28: Se presenta una referencia de la estructura para M1.	56
Figura 29: Segunda ilustración de referencia para la estructura.	57
Figura 30: Estructura de armadura de M2 utilizada en las simulaciones de Ansys.	57
Figura 31: Referencia de la instalación de la estructura en el módulo 2.	58
Figura 32: Extracto de la tabla para la carga básica de nieve de NCH 431.	58
Figura 33: Estructura de armadura de M2 utilizada en las simulaciones de Ansys.	59
Figura 34: Se presentan los gráficos entregados por Ansys, de la deformación del M4, a la izquierda se observa la deformación para M4 con la carga de nieve y a la derecha la deformación sin la carga de nieve.	59
Figura 35: Referencia de la instalación del módulo 4.	59

Figura 36: Se presentan las características técnicas requeridas para realizar la cotización.	62
Figura 37: Grafico con el análisis estadístico de precios de sistemas Fv.	63
Figura 38: Grafico de la distribución de los costos de instalación fotovoltaica en Chile.	64
Figura 39: Grafico con el costo de la energía fotovoltaico por Watt de potencia instalada.	72
Figura 40: Panel solar de celda monocristalina flexible.	85
Figura 41: Panel solar bifacial para celdas monocristalinas.	86
Figura 42: Panel fotovoltaico de celdas orgánicas.	86
Figura 43: Paneles fotovoltaicos de celdas GaAs.	87
Figura 44: Se presentan las diferentes capas de un arreglo tándem trabajando en diferentes espectros.	87
Figura 45: Grafico donde podemos ver las diferentes eficiencias de celdas fotovoltaicas.	88

Índice de tablas

Tabla 1: Tabla resumen de los requerimientos del cliente.	21
Tabla 2: Resumen de los diferentes tipos de celdas con sus eficiencias teóricas y vida útil.	32
Tabla 3: Valor de la celda fotovoltaica por Watt de generación en dólares, con tres rangos de valores.	33
Tabla 4: Valores de panel fotovoltaico por Watt de generación en dólares, con tres rangos de valores.	34
Tabla 5: Valores de ajuste para la protección de la red e instalación.	40
Tabla 6: Resumen de la terminología.	41
Tabla 7: Tabla resumen con datos técnicos de los paneles Fv.	41
Tabla 8: Valores obtenidos para las distancias de sombra y distancia entre paneles, se presenta la orientación de los módulos respecto al norte.	46
Tabla 9: Se presentan las dimensiones de los diferentes módulos, la inclinación de los techos, su azimut respecto al norte y la distancia desde el inicio de una fila a la otra.	46
Tabla 10: Numero de filas y columnas de paneles para cada módulo y configuración.	47
Tabla 11: Numero de paneles y potencia instalada para cada módulo y configuración.	47
Tabla 12: Energía generada por los diferentes módulos, en las distintas configuraciones para junio.	48
Tabla 13: Energía generada para cada módulo en las distintas configuraciones durante un año.	49
Tabla 14: Resumen con el valor del factor R para los diferentes módulos.	50
Tabla 15: Se presentan las diferentes fracciones de la energía consumida por las residencias que provienen del sistema fotovoltaico para M4.	51
Tabla 16: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M4.	52
Tabla 17: Se presenta tabla resumen con las cantidades aproximadas de material estructural necesario para cada módulo.	60
Tabla 18: Resumen con diferentes valores para las distintas configuraciones del proyecto.	63
Tabla 19: Resumen de los precios de los diferentes materiales como referencia de costos.	64
Tabla 20: Resumen de valor por modulo para las estructuras de refuerzo.	64
Tabla 21: Valor para cada módulo por separado y todos juntos.	65
Tabla 22: Resumen con el valor de F para los diferentes módulos.	65
Tabla 23: Valor para cada módulo sumando las baterías y relación entre un módulo con batería y sin batería.	66
Tabla 24: Tabla resumen con los beneficios estimados para M4.	67
Tabla 25: Se presenta el beneficio anual obtenido por cada módulo por separado y todos juntos considerando el consumo y los excedentes.	68

Tabla 26: Comparación entre los beneficios generados por un sistema sin baterías y uno con baterías.	68
Tabla 27: Resumen con los indicadores de rentabilidad para sistemas con y sin baterías.	71
Tabla 28: Resumen de las mejores opciones económicas para sistemas Fv estudiados.	74
Tabla 29: Diferentes cofinanciamientos para las ERNC de pequeña escala.	75
Tabla 30: Se presentan los valores de cofinanciamiento según el rango de valor del AF.	76
Tabla 31: Resultados del análisis de sensibilidad para la inversión de M1.	79
Tabla 32: Resultados del análisis de sensibilidad para los beneficios anuales de M1.	79
Tabla 33: Se presentan las diferentes fracciones de la energía consumida que provienen del sistema Fv para M1, M2 y M4, cada uno por sí solo y la suma de todos	89
Tabla 34: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de M1.	90
Tabla 35: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de M2.	90
Tabla 36: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de todos los módulos sumados.	91
Tabla 37: Tabla resumen con los beneficios estimados para M1.	91
Tabla 38: Tabla resumen con los beneficios estimados para M2.	92
Tabla 39: Tabla resumen con los beneficios estimados para sistema completo.	92
Tabla 40: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M1 con baterías.	93
Tabla 41: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M2 con baterías.	93
Tabla 42: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M4 con baterías.	94
Tabla 43: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico completo con baterías.	94
Tabla 44: Resumen con los datos importantes para los módulos de prueba.	95

Índice de gráficos

Gráfico 1: Consumo mensual mayo 2019 a mayo 2020 y promedio del año.	19
Gráfico 2: Demanda aproximados a lo largo de un día para la casa 1.	19
Gráfico 3: Demanda aproximados a lo largo de un día, para la casa 2..	20
Gráfico 4: Demanda estimados a lo largo de un día, para día de semana y fin de semana para la casa 3.	20
Gráfico 5: Demanda aproximados a lo largo de un día de las tres casas mezcladas.	21
Gráfico 6: Radiación global horizontales y difuso horizontal para cada mes.	48
Gráfico 7: Valores de generaciones mensual para M1, M2 y M4.	55
Gráfico 8: Diferentes fracciones de la energía solar para M4 a lo largo del año.	67
Gráfico 9: Valores de la TIR y el IR para diferentes potencias instaladas.	73

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Formula para el cálculo del VAN.	69
Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de IR.	69
Ecuación 3: Formula para el cálculo de la TIR.	70

Capítulo 2: Objetivos

Para el trabajo en comento han sido definidos los siguientes objetivos presentados a continuación.

Capítulo 2.1: Objetivos generales

- Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica de la instalación de paneles fotovoltaicos en una residencia.

Capítulo 2.2: Objetivos específicos

- Estudiar el estado del arte de los diferentes tipos de energía fotovoltaica domiciliaria, sus características, leyes y normativas aplicables en el país.
- Definir y determinar el estado actual y requerimientos de la residencia.
- Seleccionar, dimensionar y especificar componentes para el sistema de paneles fotovoltaicos.
- Evaluar la factibilidad técnica del sistema de paneles fotovoltaicos.
- Estimar los costos-beneficio del sistema de paneles fotovoltaicos.

Capítulo 3: Antecedentes y requerimientos del proyecto

Considerando que los requerimientos del cliente son muy importantes cuando se diseña un proyecto, en esta ocasión, se indica que tiene dos casas que se encuentran habitadas y una tercera casa deshabitada, por ende, para realizar análisis o proyecciones, se requiere conocer los consumos energéticos para la implementación del Proyecto. El enfoque principal de la solución es la reducción del gasto en electricidad de estos hogares, lo cual se puede conseguir de dos formas, primero, reduciendo el consumo de corriente eléctrica de la red, y segundo, vendiendo el excedente de energía a la red de distribución. En este sentido, para lograr esta reducción de gasto energético, siendo un punto importante a la hora de analizar los requerimientos del cliente, es conocer la normativa y legislación vigente, ya que, si uno de estos requerimientos contradice la regulación legal nacional, el proyecto debe ser modificado.

Los requerimientos básicos a considerar para la elaboración y propuesta de este proyecto corresponden a los siguientes, en primera instancia debe ser un sistema fácil de armar o construir a nivel usuario, ya que la idea inicial es que sea factible que se realice la instalación de este sin la necesidad de contratar una empresa externa, siempre y cuando las leyes y normativas indiquen o permitan el desarrollo de esta premisa. En segundo lugar, el mantenimiento del proyecto debe ser simple, pues el mantenimiento será realizado por personal no entrenado, es decir, los dueños de las diferentes residencias. A partir de lo anterior nace el tercer requerimiento, el cual consiste en que el sistema no posea baterías.

Dado que se busca vender los excedentes de la energía generada a la red de distribución, se hace necesario la existencia de un sistema que logre generar más energía eléctrica de lo que se consume usualmente el cliente, para abastecer las tres casas que aborda el proyecto.

El cargo fijo de consumo en costos que hay en el conjunto de residencias es de aproximadamente \$70.000 [clp] mensuales, siendo el valor que se busca reducir, sumado al consumo propio de las residencias, a partir de la capacidad de vender excedentes mediante la energía eléctrica que se pueda generar mediante la implementación del proyecto, en que no se busca realizar una desconexión total a la red de distribución, ya que se conocen los riesgos, por ejemplo, la posibilidad de que en los días nublados o con lluvia el sistema fotovoltaico no sea capaz de entregar la energía necesitada por las residencias y sus habitantes, recordando además, que para que se realice la venta de energía eléctrica a la red de distribución, uno de los requerimientos básicos corresponde a estar conectado a esta red.

Si bien no existe un presupuesto determinado por el cliente, se propone que el costo total de sistema no puede ser muy elevado, ya que el cliente no corresponde a una empresa o una institución la cual posee grandes movimientos de facturación o manejo de grandes cantidades de dinero, sino un grupo de residencias, por ende, hay que mantener

los costos bajos para conseguir que el proyecto sea atractivo, con una ganancia acorde, y de ser factible, que este tipo de proyecto pueda ser replicado en esta pequeña escala, en otras residencias del país, considerando que Chile posee un potencial de energía solar que podría abastecer unas 60 veces todo el consumo de Chile y alrededor del 20% del consumo energético de todo el mundo¹.

Al mismo tiempo se deben considerar que dentro de las restricciones sobre el espacio a utilizar o el dimensionamiento del sistema a implementar, inicialmente, solo deberá ser considerado los espacios disponibles de las techumbres de las tres casas del cliente, aunque no hay que dejar de lado que en un futuro, dependiendo del desempeño del sistema, este pueda ser expandido, por lo que resulta importante entregar cierta modularidad a este, indicando que una de las ventajas de este tipo de implementación de sistemas es que la inversión inicial se divida en varias partes, abordando el desarrollo del Proyecto mediante etapas, donde la primera de estas sería la más alta, para luego continuar con las etapas subsiguientes, hasta finalizar el proyecto completo. Lo cual nos permitiría reducir el riesgo de pérdidas, y pueda ser coteado por el cliente, ya que, al iniciar el proyecto, podremos reducir los montos de inversión, permitiendo mayor flexibilidad en los pagos u adquisición de equipamientos.

El Proyecto a elaborar que constará de los requerimientos expuestos, será ubicado en la Comuna de San José de Maipo, Provincia Cordillera, Región Metropolitana, donde las tres casas del cliente se encuentran insertas en un predio en el cual están expuestas a luz solar natural todo el día, sin ser cubiertos por elementos antrópicos y otros, y poseen una despejada vista al cielo.

A continuación, son presentadas las siguientes figuras donde se esquematiza los diferentes espacios y áreas a ocupar para la implementación del Proyecto en las techumbres de las casas del cliente.



Figura 1:Primera residencia habitada.

1

En la figura 1, se muestra la primera residencia donde se utilizará solo una de las alas del techo, la cual es señalada en rojo, como se muestra en la fotografía. El área utilizable es de aproximadamente 130 [m²].



Figura 2: Segunda residencia habitada.

En la figura 2, se indica la segunda residencia en la cual solo se podrá utilizar el techo del segundo piso, el ala frontal de este, demarcada en rojo, ya que en el techo del primer piso se provocaría sombra, quitándole eficiencia el sistema. El área utilizable es de aproximadamente 70 [m²].



Figura 3: Tercera residencia deshabitada.

En la figura 3, es señalada la tercera residencia, en la cual solo se utilizará una de las aguas de la techumbre, siendo esta la central frontal, demarcada en la ilustración. El área utilizable es de aproximadamente 27 [m²].

Como apoyo adicional del sistema, el cliente ha indicado que dentro de su terreno también se encuentra un galpón techado, el cual al ser considerado sería un aporte sustancial al Proyecto, como es señalada en la figura 4.



Figura 4: Bodega a utilizar.

En la figura 4, la bodega, esta solo posee un agua la cual será utilizada en su totalidad, es demarcada en rojo en la figura. El área utilizable es de aproximadamente 72[m²].

De acuerdo a lo anterior se indica que existen aproximadamente 300 [m²] disponibles para la implementación del Proyecto, que corresponde al área utilizable que el cliente ha asignado, pero se requiere a continuación considerar el consumo de las dos residencias habitadas e incluir una predicción del consumo de la tercera casa actualmente deshabitada, para modelar la cantidad total de energía eléctrica requerida y de tal modo el equipamiento que se pueda implementar a modo de solventar esta necesidad.

3.1: Potencia requeridas y estimadas para las residencias

Considerando que los datos y antecedentes para la realización de este proyecto han sido recopilados a lo largo de un año, se ha obtenido el valor promedio mensual de consumo de las dos casas habitadas, el cual corresponde a 712 [kWh] mensual, tal y como se observa en el Gráfico 1, donde se muestran los datos con los cuales se calculó este promedio, en si se desea poder vender los excedentes de energía a la red, será necesario generar más que este valor indicado.

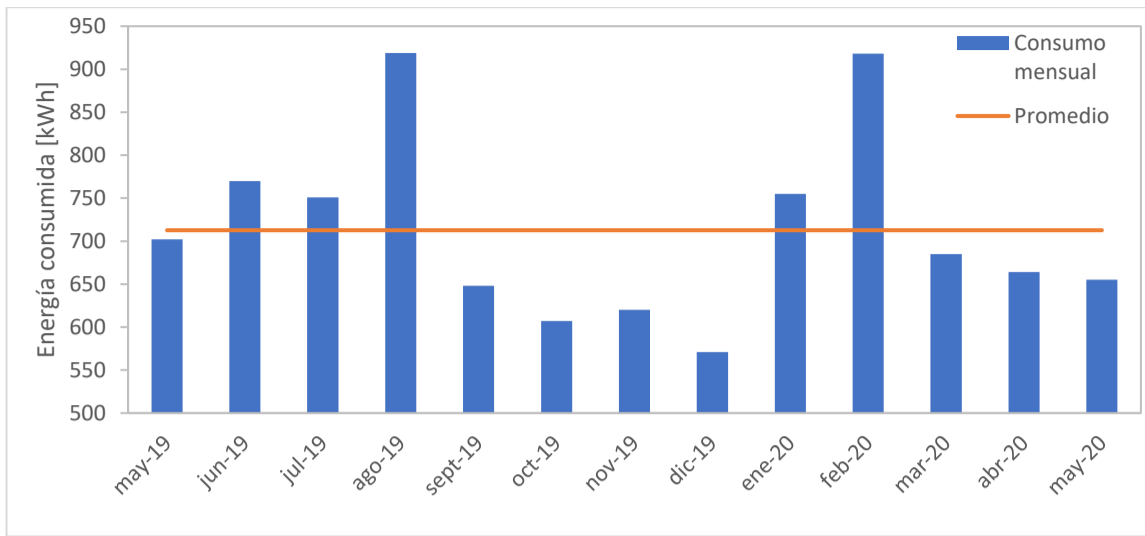


Gráfico 1: Consumo mensual mayo 2019 a mayo 2020 y promedio del año.²

Igualmente se debe incluir una tercera casa, la que por ahora se encuentra deshabitada, y en este sentido requiere estimar la demanda para esta en un futuro, donde se han tomado los valores de referencias de las casas anteriores, y a partir de los consumos aproximado de los diferentes equipos eléctricos, son presentado los resultados en el Gráfico 2, para la casa 1, habitada por 4 personas.

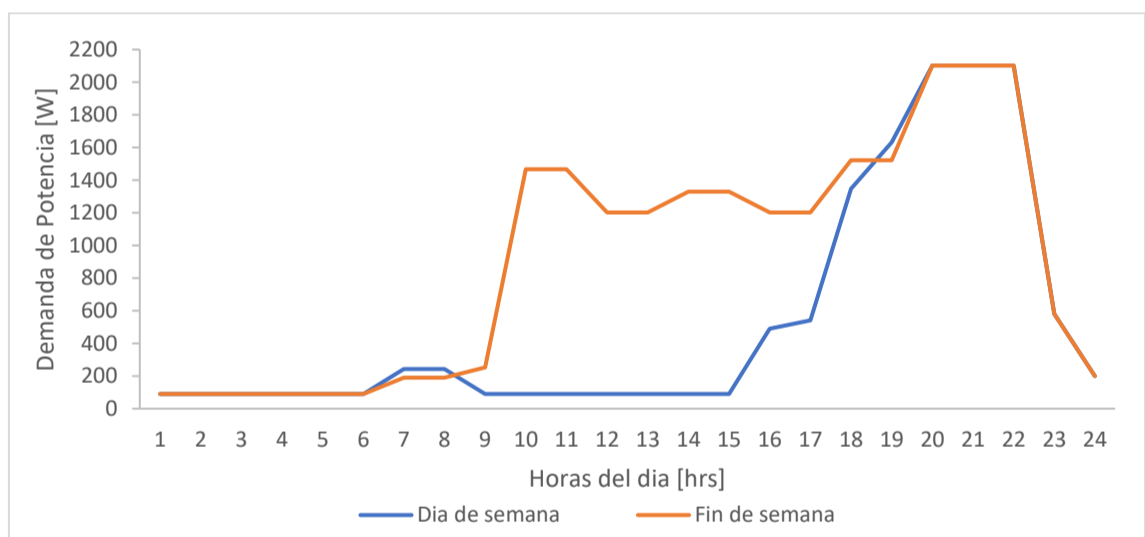


Gráfico 2: Demanda aproximados a lo largo de un día para la casa 1.³

Como se aprecia en el Gráfico 2, la demanda de energía eléctrica en los fines de semanas es más elevada que en la semana, lo cual es a raíz de que esta casa es habitada por dos adultos y dos adolescentes, quienes trabajan y estudian respectivamente, por lo que, durante la semana, hasta aproximadamente las 16 [hrs], la casa se encuentra deshabitada. A partir de se obtienen que el consumo mensual de esta casa es de aproximadamente 472 [kWh].

² Elaboración propia. Obtenido de cuentas de la luz.

³ Elaboración propia.

Por su parte, la segunda casa donde se repite la misma metodología, pero a diferencia del caso anterior, esta posee personas de forma permanente en su interior, donde residen dos adultos mayores (jubilados), por ende, el consumo es exactamente el mismo los días de semana y los fines de semanas como se observa en el Gráfico 3.

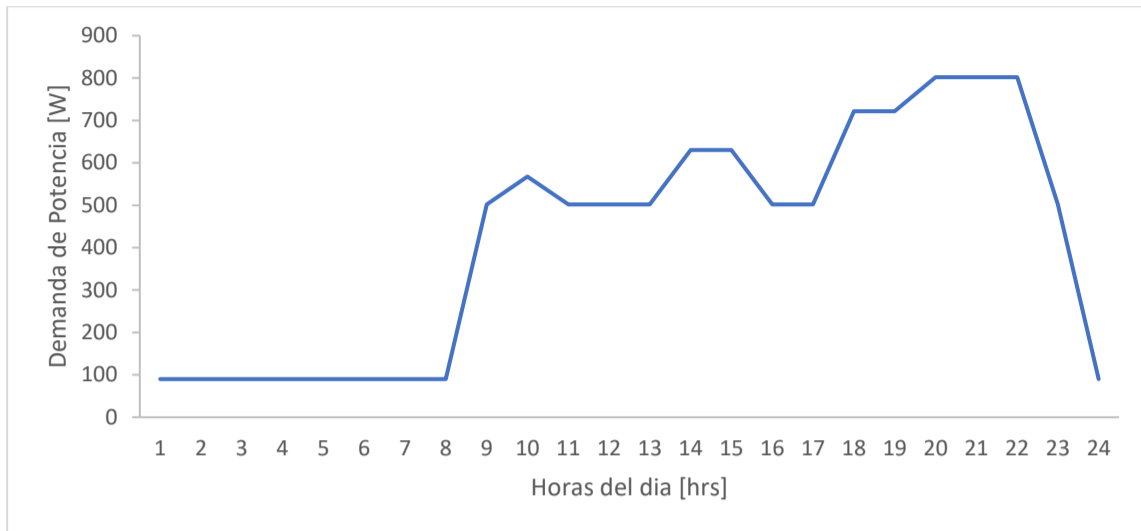


Gráfico 3: Demanda aproximados a lo largo de un día, para la casa 2.⁴

Para la segunda casa, a partir de las aproximaciones realizadas, el consumo mensual es de alrededor de 300 [kWh]. De acuerdo a los datos recopilados se obtiene un total de consumo eléctrico de 772 [kWh] mensual para ambas casas, estimado que es muy cercano al promedio mensual mencionado de 712[kWh], por esto, se utilizará el mismo método para calcular la tercera casa. En un principio, esta casa sería habitada por dos personas adultas, pero al igual que la primera, estará la mayor parte del tiempo desocupada dado el horario laboral de estas.

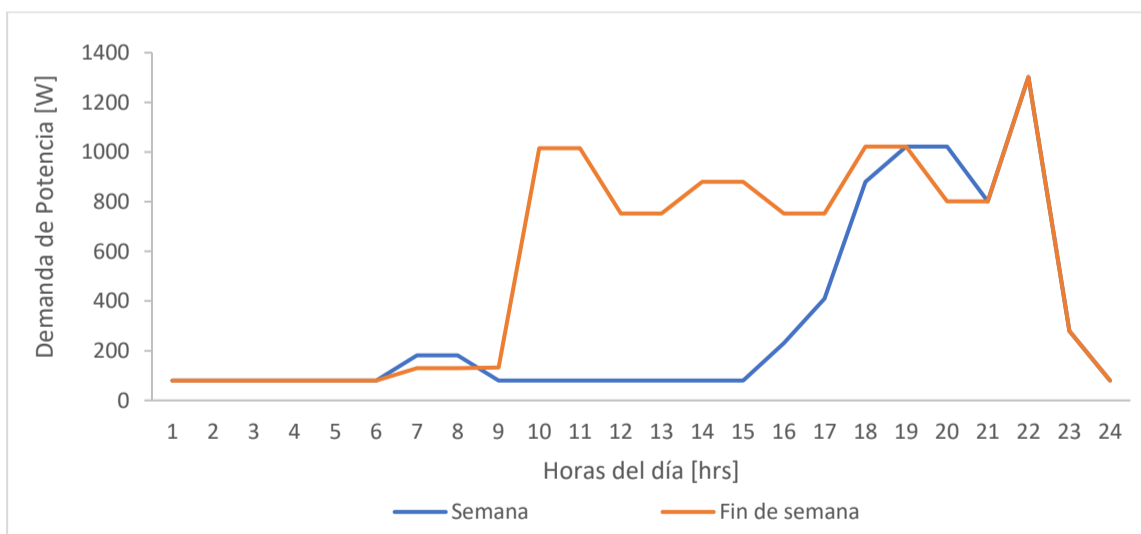


Gráfico 4: Demanda estimados a lo largo de un día, para día de semana y fin de semana para la casa 3.⁵

⁴ Elaboración propia.

⁵ Elaboración propia.

Con la estimación que se realizó se puede indicar que, el consumo mensual de la tercera casa es de aproximadamente 280 [kWh]. Por ende, el total de energía eléctrica requerida para las tres casas es de aproximadamente 1050 [kWh] al mes, donde se puede observar esta información de forma visual en el grafico 5.

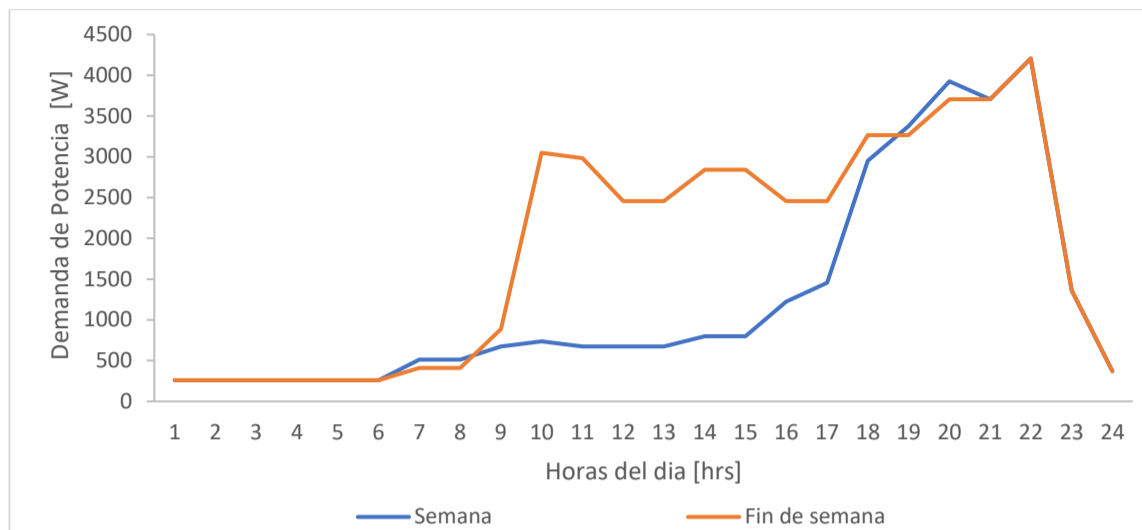


Gráfico 5: Demanda aproximados a lo largo de un día de las tres casas mezcladas.⁶

Desde un punto de vista predictivo, el grafico 5 resulta de utilidad para los cálculos de excedentes del sistema fotovoltaico, ya que permite observar cómo se comporta la demanda a lo largo de un día, para luego comparar esto con la potencia generada por el sistema fotovoltaico.

En este sentido, considerando que los requerimientos son vender excedentes generados a la red de distribución de manera de poder disminuir el costo, el diseño de un sistema modular que permita dividir la inversión, para que sea fácil de implementar y mantener, además de hacer uso de los espacios designados en las techumbres de las tres casas y el galpón expuestos anteriormente, donde siempre se considera una inversión lo más bajo posible, sin afectar el funcionamiento del sistema propuesto, se presenta la tabla 1 de resumen de requerimientos del cliente.

Tabla 1: Tabla resumen de los requerimientos del cliente.⁷

Requerimiento	Datos obtenidos
Energía generada mensual	Mínimo 1.050 [kWh]
Potencia máxima	4.000[W]
Numero de espacios	4
Área disponible	299[m ²]
Ubicación	-33,59° S; -70,38° N

⁶ Elaboración propia.

⁷ Elaboración propia.

Capítulo 4: Antecedentes de energía solar

Si bien el consumo energético sostiene las actividades socioeconómicas y el desarrollo de una nación, el tipo de energía que utilizará el país dependerá de los recursos naturales disponibles dentro de su territorio y las fuentes energéticas importadas, cuyo creciente consumo compromete la seguridad energética del país⁸.

A grosso modo se puede indicar que la electricidad se crea en centrales capaces de obtener energía eléctrica a partir de energías primarias, las cuales se encuentran subdivididas en dos tipos, las renovables y las no renovables⁹.

Las Energías Renovables son aquellas que no se consumen ni agotan, a escala humana, en sus procesos de transformación y aprovechamiento de energía útil, y generan impactos ambientales significativamente inferiores que aquellas producidas por las fuentes energéticas convencionales¹⁰, en este sentido Producir energía renovable significa utilizar el sol, la fuerza del viento o del agua y el calor de la tierra, presentes en la naturaleza de manera abundante y generalizada¹¹ y donde tal como indica el Ministerio de Energía¹², Chile posee la radiación solar más alta del mundo, lo que realza y priorizan las formas para la utilización de energía solar.

En el mercado existen diferentes opciones para aprovechar la energía del sol, donde se identifican dos divisiones principales, los paneles fotovoltaicos, los cuales transforman la energía de la radiación solar en energía eléctrica y los de tipo térmico, que transforman la radiación solar en energía térmica, que normalmente la traspasan a un fluido, como el agua.

Dentro de los sistemas solares térmicos, existen variados sistemas con la capacidad de generar energía eléctrica, aprovechando la energía térmica producida, por ejemplo, las torres de concentración¹³, los sistemas de concentración solar cilíndricos¹⁴ y los concentradores solares lineales Fresnel¹⁵, estos funcionan con sales, las cuales son fundidas y utilizadas para producir vapor para un sistema de turbinas de vapor. Pero debido a que las sales se deben calentar a aproximadamente 600 °C, se requiere una gran área ocupada por concentradores, para alcanzar estas temperaturas, por consiguiente, no es posible hacer uso de esta opción. También existen los discos Stirling, los cuales son reflectores parabólicos, que concentran la energía del sol en el punto focal, donde se calienta un fluido de trabajo entre los 250 y 700° C, para luego ser utilizados en un motor Stirling, el cual genera la energía eléctrica, estos son descartados por el tamaño, lo cual

⁸ (68)

⁹ (69)

¹⁰ (70)

¹¹ (71)

¹² (72)

¹³ (43)

¹⁴ (44)

¹⁵ (45)

contradice uno de los requerimientos del sistema, ser utilizados sobre los techos. Finalmente, el ultimo problema que poseen estos sistemas, en conjunto con el espacio que utilizan, es la temperatura a la que trabajan, que conllevan grandes riesgos al ser implementados en una zona residencial.



Figura 5: Concentrador cilíndrico parabólico.¹⁶



Figura 6: Torre de concentración.¹⁷



Figura 7: Disco Stirling.¹⁸



Figura 8: Concentrador Lineal Fresnel.¹⁹

Cuando se analizan los requerimientos de las residencias en estudio, se nota que el único tipo de sistema que puede cumplir con los requerimientos y genere energía desde el recurso solar, corresponde a los de tipo fotovoltaico, ya que estos podrán generar la energía eléctrica en los espacios determinados y cantidades requeridas.

En el caso de este documento para el cálculo de energía generada, excedentes y otros valores de interés para la generación de energía solar fotovoltaica, se utilizará el programa PVSyst, el cual posee bases de datos integradas con información importante para conseguir estimados realistas de los datos necesarios para este tipo de proyectos.

¹⁶ (39)

¹⁷ (39)

¹⁸ (12)

¹⁹ (30)

4.1: Conceptos básico energía solar

A la hora de realizar la instalación de un sistema aproveche la energía que entrega el sol, se deben tener ciertas consideraciones básicas para obtener el mayor provecho posible. Primero es necesario conocer cuál sería la correcta ubicación de un sistema de aprovechamiento solar, que orientación y ángulo debe tener, en que para esto es importante entender cómo se desplaza el sol con respecto la tierra, este movimiento es descrito a partir de dos ángulos, el azimut solar y el ángulo solar o altura solar. El azimut solar, es definido por la Real Academia de Ingeniería como.

Ángulo que forma con el sur (en hemisferio norte) o con el norte (en hemisferio sur), la proyección sobre el plano horizontal de la línea recta que une la posición del Sol con el punto de observación, medido en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido contrario en el sur, utilizando las proyecciones sobre el plano horizontal del punto de observación, y su valor es negativo durante la mañana (dirección Este), 0° ó 180° al mediodía (dependiendo de los valores relativos de la declinación solar y la latitud local), y positivo después del mediodía (dirección Oeste). (1).

Como lo explica la Real Academia de Ingeniería, la forma de medir el ángulo depende del hemisferio donde esté posicionado el sistema, este describe la posición relativa del sol respecto al norte o al sur, para el caso de Chile, respecto al norte. Con esta información, se recomienda que la dirección en la deben estar orientados los paneles fotovoltaicos debe ser en dirección norte.

En la Figura 9 podremos ver el comportamiento del azimut solar en Santiago de Chile, donde la trayectoria superior de la figura representa el solsticio de invierno, el día más corto del año y la línea inferior representa el solsticio de verano, el día más largo del año.

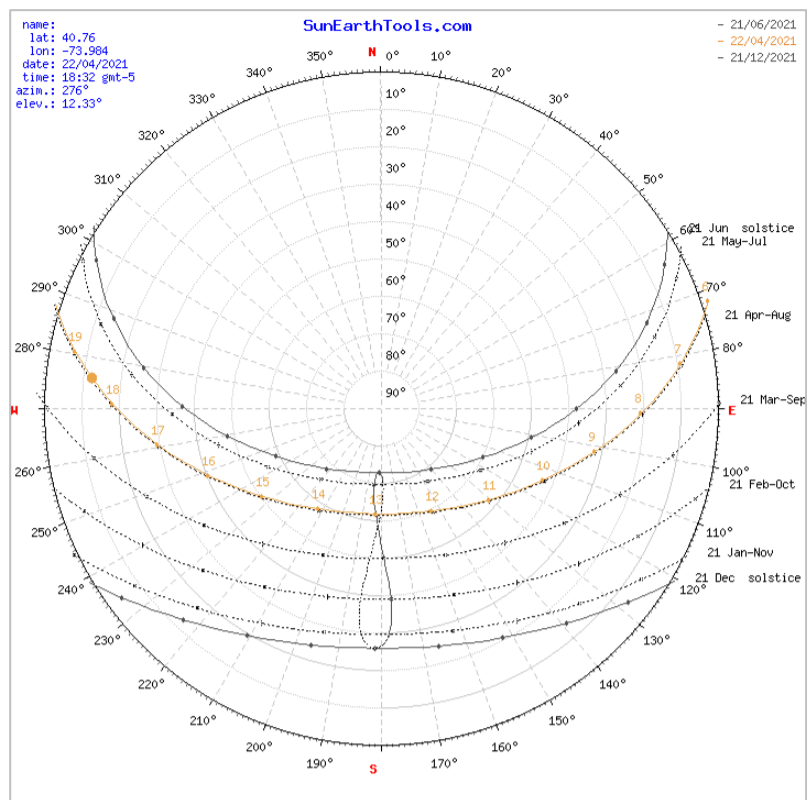


Figura 9: Carta solar Santiago de Chile.²⁰

Como se observa en la Figura 9, la posición del sol no solo depende de la ubicación geográfica, también del día del año y de la hora. Para el caso de la altura solar, esta se mide considerando un plano sobre la superficie de la tierra, tangencial a su circunferencia, desde el cual se mide el ángulo entre este plano y el sol, entregándonos una noción de su altura. El máximo y mínimo de este ángulo, depende de la latitud en la que se encuentre y la época del año, donde al medio día solar conseguimos el máximo de este ángulo cada día, para el solsticio de verano, se alcanza la altura máxima anual y para el solsticio de invierno la mínima, como se muestra en la figura 10.

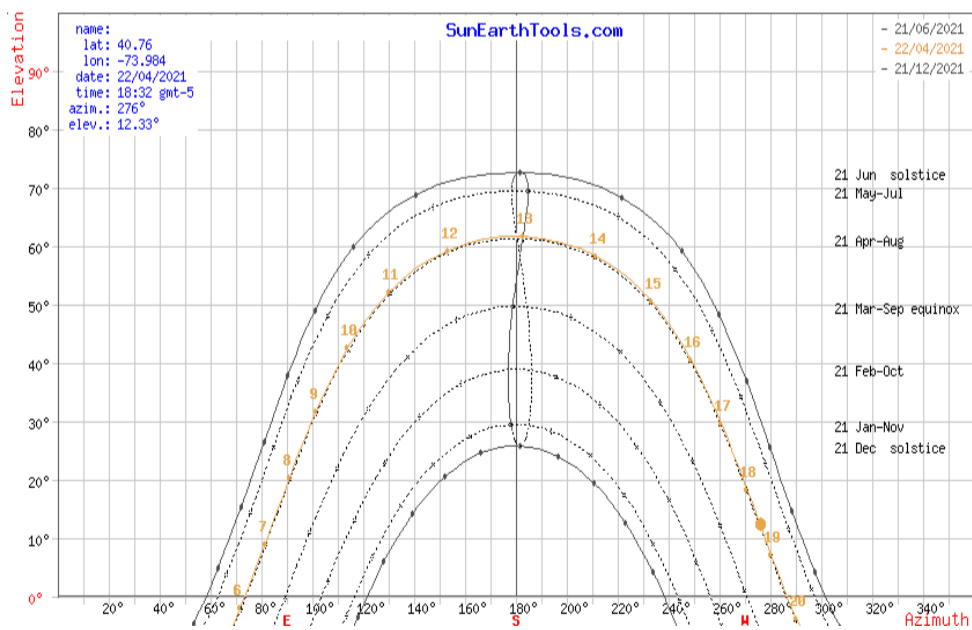


Figura 10: Carta solar, con la altura solar para Santiago de Chile y diferentes fechas.²¹

²⁰ (46)

²¹ (46)

El objetivo de estudiar esto es aprovechar de la mejor forma la radiación solar, la cual se divide en tres partes, la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada, esta última representa la energía que rebota en diferentes superficies circundantes al área de interés, la radiación difusa es hemisférica en todas las direcciones producto de atenuaciones atmosféricas e interacción con nubes u otros elementos atmosféricos. La mayor parte de la energía se obtiene de la radiación directa²², aunque esta aseveración está asociada con la ubicación de la instalación, por esto es necesario poder conocer la posición del sol durante el año y a lo largo del día para la instalación de un sistema de generación de energía solar, para alcanzar el mayor provecho de la radiación directa. Por lo que resulta muy importante tener conocimiento de los movimientos y las posiciones del sol a lo largo de un día y un año, para poder cuantificar y optimizar la dirección en la cual se orientaran los diferentes sistemas de captación de energía solar, asimismo es necesario considerar cómo afecta la geografía y estructuras cercanas a los paneles fotovoltaicos.

Gracias a estos datos se conoce cuál es la mejor forma de instalar el sistema de aprovechamiento de energía solar, donde este debe apuntar hacia el norte y con un ángulo de inclinación óptimo, en lo posible de la instalación, el cual aprovecha la energía solar directa de mejor manera a lo largo del año, para el caso de Santiago, este ángulo se encuentra entre los 27-33°²³. El ángulo de inclinación mientras más al sur nos encontramos aumenta y disminuye hacia el norte, por ejemplo, en la línea del ecuador, el ángulo óptimo para aprovechar de mejor forma la energía directa del sol, es de 0° o, en otras palabras, que se instale el panel en posición horizontal.

Al mismo tiempo, existe otra consideración necesaria para la instalación de un sistema de aprovechamiento de energía solar, en conjunto a la posición correcta del panel, se debe estudiar los efectos de las sombras, ya sean por las nubes (clima), la geografía o estructuras cercanas (montañas, cerros o edificios) y la sombra que los mismos paneles pueden producir entre sí, ya que esto en teoría reduce el área de aprovechamiento de energía, por esto, al conocer el desplazamiento del sol, se vuelve posible calcular la distancia mínima entre paneles para evitar que exista sombreado y estimar los efectos provocados por la geografía y estructuras cercanas. Para el caso del clima, las diferentes bases de datos toman en consideración sus efectos en la radiación directa y difusa.

Considerando que la posición del sol varía durante el día y a lo largo del año, existe la posibilidad de que se instale un sistema de seguimiento solar, el cual permite que la radiación directa siempre impacte de forma normal la superficie de los paneles, sean solares o térmicos, la instalación de este sistema aumenta de forma importante el aprovechamiento de la radiación solar, aproximadamente entre un 25-30%²⁴, pero solo se justifica cuando se requiere una mayor eficiencia en el aprovechamiento de energía, ya

²² (18)

²³ (47)

²⁴ (49)

que este eleva de manera considerable el costo total del sistema, para el caso de sistemas de pequeña escala un 400%²⁵.

Existen dos tipos de sistemas de seguimiento, en un eje y en dos ejes presentado en la Figura 11, uno de estos ejes, es el que mueve el panel solar de dirección este-oeste o que lo desplaza en el sentido del azimut solar, el segundo eje mueve el panel en la dirección del ángulo de altura solar. El sistema de dos ejes es uno de seguimiento completo (full tracker), ya que siempre logra que la radiación directa impacte de forma normal sobre la superficie del panel.

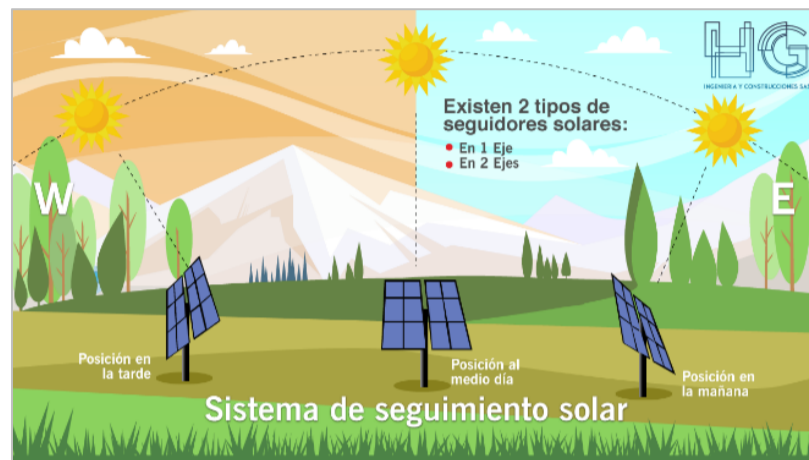


Figura 11: Esquema de un sistema de seguimiento solar.²⁶

Otra forma en la que se aprovecha la energía del sol, es la utilización de lentes de concentración presentados en la Figura 12, lo cual consigue que la energía directa y difusa se concentren, consiguiendo mayores eficiencias. Este método se puede utilizar para el caso de paneles fotovoltaicos y de paneles térmicos, se obtiene una ganancia importante en la generación de energía, pero solo si la eficiencia de la celda o el panel es lo suficientemente alta para justificar la concentración, pues utilizando celdas de menor tamaño, es posible aprovechar un área de radiación mayor, gracias a los concentradores. Ahora bien, este método es necesario complementarlo con un sistema full tracker o de dos ejes, ya que la lupa o concentrador debe estar correctamente alineado con el sol y la celda. En este sentido, el uso de concentradores eleva más aun el costo total, ya que no solo se debe implementar el sistema de seguimiento (full tracker), es necesaria la instalación de los concentradores y la estructura que esto conlleva²⁷.

²⁵ (49)

²⁶ (21)

²⁷ (50)



Figura 12: Concentrador solar fotovoltaico.²⁸

4.2: Tecnología fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas son los componentes esenciales de la tecnología fotovoltaica, estas tienen la capacidad de transformar la radiación solar en energía eléctrica, en la figura 13 se muestra una imagen referencial de estas celdas, cuyo principal uso se les da es a través de paneles solares, los cuales son un conjunto de celdas, que en grandes números son capaces de generar una mayor cantidad de potencia eléctrica.

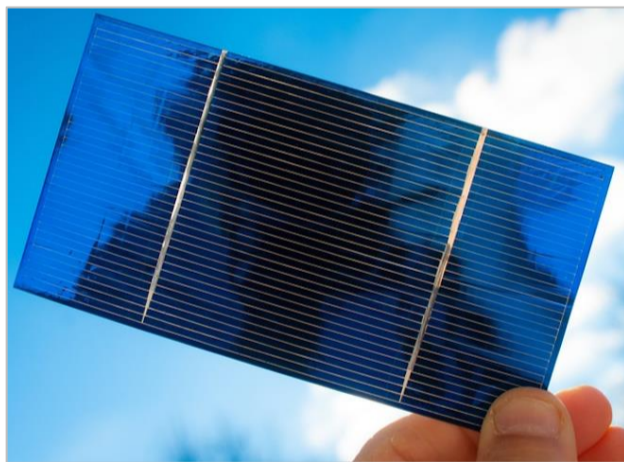


Figura 13: Celda fotovoltaica.²⁹

Se estima que, del total de la radiación incidente en nuestro planeta proveniente del sol, aproximadamente $1366[\text{W}/\text{m}^2]$ ³⁰, alcanzan la atmósfera superior de la tierra, gracias al propio campo magnético de la tierra y los efectos de la atmósfera, a la superficie terrestre llega una cantidad menor de radiación, esto entregando un límite claro de lo que es posible aprovechar.

Las celdas fotovoltaicas están construidas básicamente como un arreglo de capas de materiales semiconductores, donde se tiene una capa de material tipo P o con carga

²⁸ (16)

²⁹ (13)

³⁰ (42)

positiva y una capa de material tipo N o con carga negativa. Los electrones, gracias al estímulo provocado por los fotones de la radiación solar, son arrancados de sus orbitas, transformándose en electrones libres, los cuales buscan rellenar un hueco dejado por otro electrón dentro del mismo material, para evitar que este ocurra, entra en juego el arreglo de materiales P-N, donde se provoca un campo magnético permanente en la unión de ambos materiales, con dirección de N a P, generado por la diferencia de cargas de estos, gracias a este campo magnético los electrones tienden a viajar entre las dos capas de material, creando una diferencia de potencial, que finalmente se traduce en una corriente eléctrica. La diferencia de potencial mencionada depende esencialmente de los materiales utilizados, pero como generalmente se utiliza silicio, esta diferencia de potencial es aproximadamente de 0.5 [V].

En cuanto a la composición de los paneles fotovoltaicos, estos son arreglos de celdas, dispuestas en serie, para aumentar el voltaje y luego en paralelo, para aumentar la corriente. Por ejemplo, en la Figura 14, se presenta un arreglo de 48 celdas, 2 grupos de celdas en paralelo, en cada grupo hay 24 celdas en serie, consiguiendo un panel de 12 [V].



Figura 14: Panel fotovoltaico.³¹

Estos paneles solares que incluyen los conjuntos de celdas fotovoltaicas, que corresponden a elementos pequeños y bastante frágiles, los cuales requieren ser protegidos con diferentes capas de materiales, que deben cumplir con ciertas condiciones, como por ejemplo no reducir de manera notable la radiación que impacta las celdas, ser resistentes a la radiación solar, para evitar que estos se degraden o deterioren, afectando la eficiencia de cada celda y al mismo tiempo entregar protección a las celdas contra desgaste e impactos. Básicamente, un panel solar se compone de celdas, un protector directo que también se encarga de aislar eléctricamente las celdas, evitando descargas no deseadas, generalmente acrílicos, siliconas, Tedlar (Tedlar-Poliéster-Tedlar) o EVA (Etileno-Vinil-Acetato), un vidrio protector superior y un marco, como es señalado en la Figura 15.

³¹ (19)

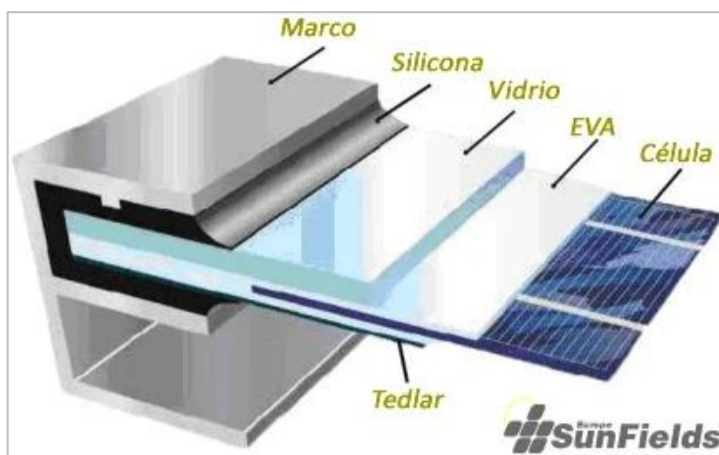


Figura 15: Se presenta la configuración más común para un panel solar fotovoltaico.³²

Aunque hoy en día, los paneles son diseñados de formas distintas dependiendo de la aplicación, donde podemos encontrar paneles sin marcos, los componentes básicos continúan siendo los mismos, a continuación, se presentan los diferentes tipos de celdas que existen, donde se encuentran dos grupos principales, las más comunes y utilizadas echas en base a cristal de silicio y las que no están fabricadas en base a silicio.

I.- Amorfas o capa fina (Thin Film): Celdas fabricadas en base a silicio cristalino bruto sin pulir o purificar y otros elementos como cobre, indio, selenio, galio, etc. Son de un costo reducido y fáciles de fabricar, son encontradas comúnmente en la vida diaria, por ejemplo, en las calculadoras más antiguas o en las lámparas solares. Debido a su baja eficiencia, entre un 7% y un 9%, no son utilizadas en sistemas fotovoltaicos de alta potencia, pero gracias a su mayor resistencia y flexibilidad, se utilizan en aplicaciones de pequeña escala. Estas poseen un color gris, casi negro y actualmente se están utilizando como un panel semi transparente, en ventanas o vidrios, para poder aprovechar de generar energía eléctrica en los edificios, ya que permiten el paso de la luz solar, con un pequeño efecto de polarizado y generan energía eléctrica en un espacio que estaría ocupado por un vidrio normal. Tienen una vida útil de 20-25 años³³³⁴.



Figura 16: Panel fotovoltaico de celdas amorfas.³⁵

³² (35)

³³ (37)

³⁴ (51)

³⁵ (37)

II.- Policristalinas: Fabricadas principalmente de silicio, poseen una coloración azul, y mayor eficiencia que los paneles de estructura amorfa, entre un 13% y un 15%, su costo de producción es más elevado, debido a que se le quita una parte de las impurezas dentro del silicio, pero poseen muy buen comportamiento a altas temperatura, siendo una muy buena opción para paneles fotovoltaicos. Estas son las más comunes en los sistemas de generación eléctrica fotovoltaicas, debido a su bajo precio, simple fabricación y elevada eficiencia. Tienen una vida útil de 20-25 años³⁶.

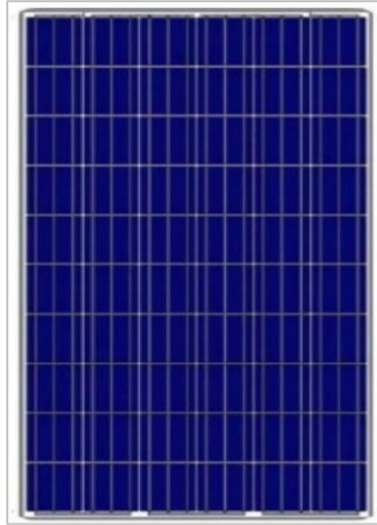


Figura 17: Panel fotovoltaico de celdas policristalino.³⁷

III.- Monocristalinos: Celdas construidas de un solo cristal de silicio, por ende, no tienen impurezas, esto permite alcanzar niveles de eficiencias de entre un 17% a un 20%, debido al proceso de fabricación, poseen una coloración negra y las celdas tienen sus esquinas redondeadas. Su valor es un poco mayor que las celdas de tipo policristalino, pero gracias a su mayor eficiencia y características de fabricación poseen mejor comportamiento con la radiación difusa. Utilizado en sistemas de generación fotovoltaico donde la eficiencia de cada panel es importante. Tienen una vida útil de 20-25 años³⁸.

³⁶ (37)

³⁷ (37)

³⁸ (37)

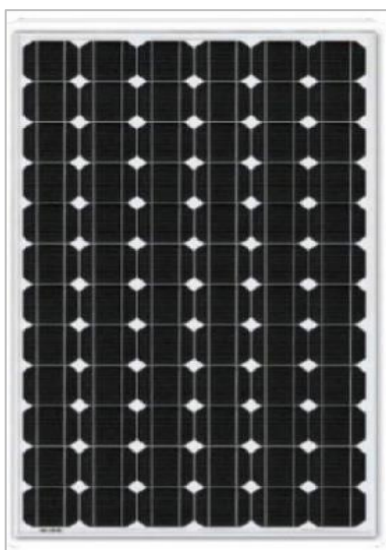


Figura 18: Panel fotovoltaico de celdas Monocristalinas.³⁹

A continuación, es presentada la Tabla 2 de resumen con la principal información referida a las celdas para obtención de energía solar.

Tabla 2: Resumen de los diferentes tipos de celdas con sus eficiencias teóricas y vida útil.⁴⁰

Material base	Celdas	Eficiencia teórica	Vida útil
Celdas Silicio	I.- Amorfos	7-9%	20-25 años
	II.- Policristalinas	13-15%	20-25 años
	III.-Monocristalinas	17-20%	20-25 años
	IV.- Flexibles	7-20%	20-25 años
	V.- Panel Bifacial	Hasta 25%	20-25 años
Celdas bajo o nulo contenido de silicio	VI.- Celdas orgánicas	3-11% hasta 26.6%	Corta
	VII.- Celda GaAs	25-30%	20-25 años
	VIII.- Celdas Tandem	46%	20-25 años

Como se observa en la tabla 2, la vida útil y la eficiencia puede variar dependiendo mucho del tipo de celda, como es el caso de las celdas tándem y GaAs, debido a la dificultad que conlleva fabricarlas, no se utilizan de forma comercial aún, y su uso se remite principalmente para investigación y en la industria aeroespacial, gracias a su muy alta eficiencia. Para el caso de las celdas orgánicas, su uso en la generación de grandes volúmenes de energía es muy restringido, principalmente por su alto costo de fabricación, comparado a las celdas de silicio, sumado también a su baja vida útil, ya que al estar fabricadas de material orgánico se degradan mucho más rápido que las celdas de silicio.

En el presente Proyecto se hará uso de las celdas de silicio, con enfoque en las celdas monocristalinas, por su alta eficiencia y bajo costo de producción. Si se desea una descripción de las celdas faltantes, en los anexos en la sección “Tipos de Celdas fotovoltaicas” se encuentra información más detallada, enumeradas con una descripción

³⁹ (37)

⁴⁰ Elaboración propia.

breve, un gráfico desarrollado por la NREL (National Renewable Energy Laboratory), donde se puede observar los rangos de eficiencia para las diferentes tecnologías en investigación (Figura 45 en los anexos).

A la par de los propios paneles, es necesario tener un sistema de cableado eléctrico que interconecte los diferentes paneles a un regulador, luego a un inversor, el cual se encargaría de transformar la corriente generada por los paneles a corriente de 220 [V] alterna, para que esta pueda ser utilizada en las residencias, en algunos casos se incluyen un grupo de baterías las cuales permiten tener energía eléctrica durante los momentos que el sistema no está generando o no de abasto, como en la noche o las tardes, estas baterías son conocidas como baterías de ciclo profundo, las cuales tienen la capacidad de descargarse totalmente, para luego volver a cargarse al máximo sin sufrir penalidades a su eficiencia general junto a estas baterías, es necesario incluir un inversor de carga y uno de descarga, finalmente, para poder inyectar la energía sobrante al sistema interconectado, es necesario incluir al sistema un medidor eléctrico bidireccional otorgado por la empresa eléctrica.

4.4: Mercado energía solar.

Durante los últimos años, las energías renovables han ganado preponderancia dentro de los mercados de generación eléctrica a nivel mundial, y en el contexto nacional, esta realidad ha quedado evidenciada en la medida que nuevos actores, tecnologías y proyectos han sido objeto de evaluación ambiental⁴¹.

Es por ello, que siempre se debe considerar que se requiere una cotización directa con diferentes empresas para realizar la instalación y conocer el precio final, identificando aquellos que se ajusten más al presupuesto base o las necesidades a solventar. Para el caso del mercado fotovoltaico son presentados datos de valores de celdas fotovoltaicas en la Tabla 3.

Tabla 3: Valor de la celda fotovoltaica por Watt de generación en dólares, con tres rangos de valores.⁴²

Tipo de celda	Alto [USD]	Medio [USD]	Bajo [USD]	Eficiencia
Policristal silicio	0.115	0.080	0.079	18.6%
Monocristal silicio	0.107	0.105	0.102	20%
Monocristal alta eficiencia	0.120	0.118	0.112	21%
Monocristal eficiencia superior	0.165	0.130	0.120	22%

En la Tabla 3 el valor de cada celda es dependiente de la eficiencia de cada una de estas, donde solo se presentan celdas en base a silicio ya que son las más comercializadas

⁴¹ (73)

⁴² (17)

y de las cuales mayor número de datos existen. Pero se vuelve importante conocer el valor por el panel solar completo.

Tabla 4: Valores de panel fotovoltaico por Watt de generación en dólares, con tres rangos de valores.⁴³

Rango generación del panel	Alto [USD]	Medio [USD]	Bajo [USD]
Panel 275W-280 W	0.229	0.203	0.195
Panel 305W-310W	0.395	0.313	0.298
Panel 315W-320W	0.340	0.284	0.229
Panel 325W-330W	0.220	0.218	0.198
Panel 320W o mayor	0.390	0.258	0.228

De la Tabla 4 recién expuesta, los valores son muy variados, por ende, escoger que tipo de panel usar no es tan simple, por lo que se recomienda la cotización a diferentes empresas. Se encontró en el sitio web Alibaba⁴⁴, empresa que se encarga de vender productos al por mayor para empresas y personas, que el valor de cada Watt es de 0.29[USD], esto para un modelo de panel de 440 [W], lo cual coincide con los valores que podemos ver en la Tabla 4.

⁴³ (17)

⁴⁴ (6)

Capítulo 5: Legislación, normativa y reglamento en Chile sobre instalación de paneles solares en residencias

En el presente capítulo se presenta la legislación, las distintas normativas y reglamentos que pueden afectar el desarrollo de un proyecto e instalación de paneles fotovoltaicos en una residencia.

5.1: Legislación nacional

El 22 de marzo del año 2012 se publicó la ley 20.571 que regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales, que en su artículo 149 bis determina lo siguiente.

Artículo 149 bis.- Los usuarios finales sujetos a fijación de precios, que dispongan para su propio consumo de equipamiento de generación de energía eléctrica por medios renovables no convencionales o de instalaciones de cogeneración eficiente, tendrán derecho a inyectar la energía que de esta forma generen a la red de distribución a través de los respectivos empalmes. (2).

Como se indica en el texto, se permite que las residencias y hogares puedan inyectar energía eléctrica a la red, generada a partir de energías renovables no convencionales, al sistema interconectado, utilizando los empalmes que ya están instalados. La ley determina la potencia máxima instalada para las residencias, que es de 100 [kW], esto por temas de seguridad principalmente. La ley también valoriza la energía inyectada por la residencia, obligando a la empresa distribuidora a descontar de la cuenta del mes, este valor, en caso de que queden excedentes, estos se traspasaran a la boleta del siguiente mes y en caso de que al final de periodo o año, aun queden excedentes a favor del cliente, la empresa deberá pagar estos al cliente por los medios determinados. El año 2018, la ley 20.571 es modificada por la ley 21.118, la cual aumenta la capacidad instalada de generación de 100 [kW] a 300 [kW], permite que los descuentos mencionados ahora sean aplicables a todos los cargos de suministro (no solo sobre el consumo de energía).⁴⁵

El año 2008, se aprueba la ley 20.257 la cual propicia la ampliación de la matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales, la cual obliga a las empresas, en el artículo 150 bis⁴⁶, a que las empresas que realicen retiros al sistema eléctrico con una capacidad instalada de más de 200 [MW], deberán acreditar que una cantidad equivalente al 10% de sus retiros en cada año calendario haya sido inyectada a cualquiera de dichos sistemas, por medios de generación renovables no convencionales, propios o contratados.

⁴⁵ (26)

⁴⁶ (24)

Esto obliga a que el sistema de generación eléctrica en Chile comience a integrar un mayor número de generadoras de energía renovable, luego el año 2013 la Ley 20.698, aumenta esta meta del 10% a un 20%⁴⁷, para el año 2025, meta que para el año 2019 se cumplió. Esto comenzó a marcar el camino para diferentes leyes o reglamentos con el objetivo de que el sistema interconectado posea un mayor porcentaje de generación a partir de energías renovable, esto complementando las leyes 20.571 y 21.118, ya que, se permite que las empresas puedan acreditar, con la inyección de las residencias, que un 10% de sus retiros son generados desde energía renovables.

Estas leyes presentadas entregan un claro indicio de la dirección que está tomando el gobierno respecto a la generación de energía del país, buscan un sistema de generación más limpio, con el principal enfoque en las energías renovables no convencionales, lo cual se alinea a la perfección con este proyecto.

5.2: Reglamento

Dentro de la ley 20.571, se explica que, para poder realizar la integración al sistema interconectado, se debe cumplir con el reglamento presentado en el diario oficial como decreto supremo número 71 del 6 de septiembre del año 2014⁴⁸. La ley habla de un límite máximo de inyección de 300 [kW], pero en el reglamento se explica que este límite depende principalmente de las condiciones técnicas del empalme a utilizar, en otras palabras, el límite máximo de inyección está determinado por condiciones técnicas asociadas al transformador y a la red de conexión, información, que como se explica en el decreto, la empresa que presta el servicio está obligada a entregar.

Aun así, en el caso de que la potencia instalada generada a partir de energía renovables sea mayor a la máxima que determino la empresa distribuidora, la empresa está obligada a entregar información del valor de las obras o trabajos extras a realizar, para poder inyectar la energía determinada por el cliente, para que luego el cliente tenga la opción de integrarse al sistema como lo había determinado o de retractarse y modificar el valor de la potencia instalada para que este sea menor al determinado inicialmente y de esta forma ahorrarse el costo extra. Dentro del reglamento, paralelamente se explica que toda la instalación del sistema de generación debe ser realizado por instaladores eléctricos autorizados por la superintendencia de electricidad y combustible (SEC), lo cual elimina la idea de realizar la instalación de forma personal.

Por último, el valor que la empresa tendrá que pagar por la energía inyectada por la residencia, como se indica en el reglamento del decreto supremo n° 71 del año 2014 en el título IV, capítulo primero, titulado “*De la medición y valorización de las inyecciones*”, este valor es igual al precio nudo de energía que esta empresa traspasa al cliente, Valor

⁴⁷ (25)

⁴⁸ (7)

determinado semestralmente por la CNE (Comisión nacional de energía), el cual generalmente es cercano a un 50% del costo final de la energía.

Tanto la ley como el reglamento benefician principalmente al cliente que desea inyectar los excedentes de la energía generada de forma renovable, ya que obligan a la empresa distribuidora a acomodarse a las condiciones del cliente, traspasando, además, los costos de la instalación y modificación al mismo.

De acuerdo a lo expuesto, es muy probable que la residencia deba acarrear con el costo del sistema de generación más el costo de las modificaciones necesarias, esto elevando el valor final del proyecto, pero, existen diferentes fondos a los cuales se puede acceder, para poder reducir el valor de la inversión. Para que se entienda el proceso de forma más clara, se recomienda leer el decreto supremo número 71 del año 2014 y el decreto supremo número 103 del año 2016, podemos observar de forma resumida como se realiza la conexión a la red de distribución en la Figura 19.

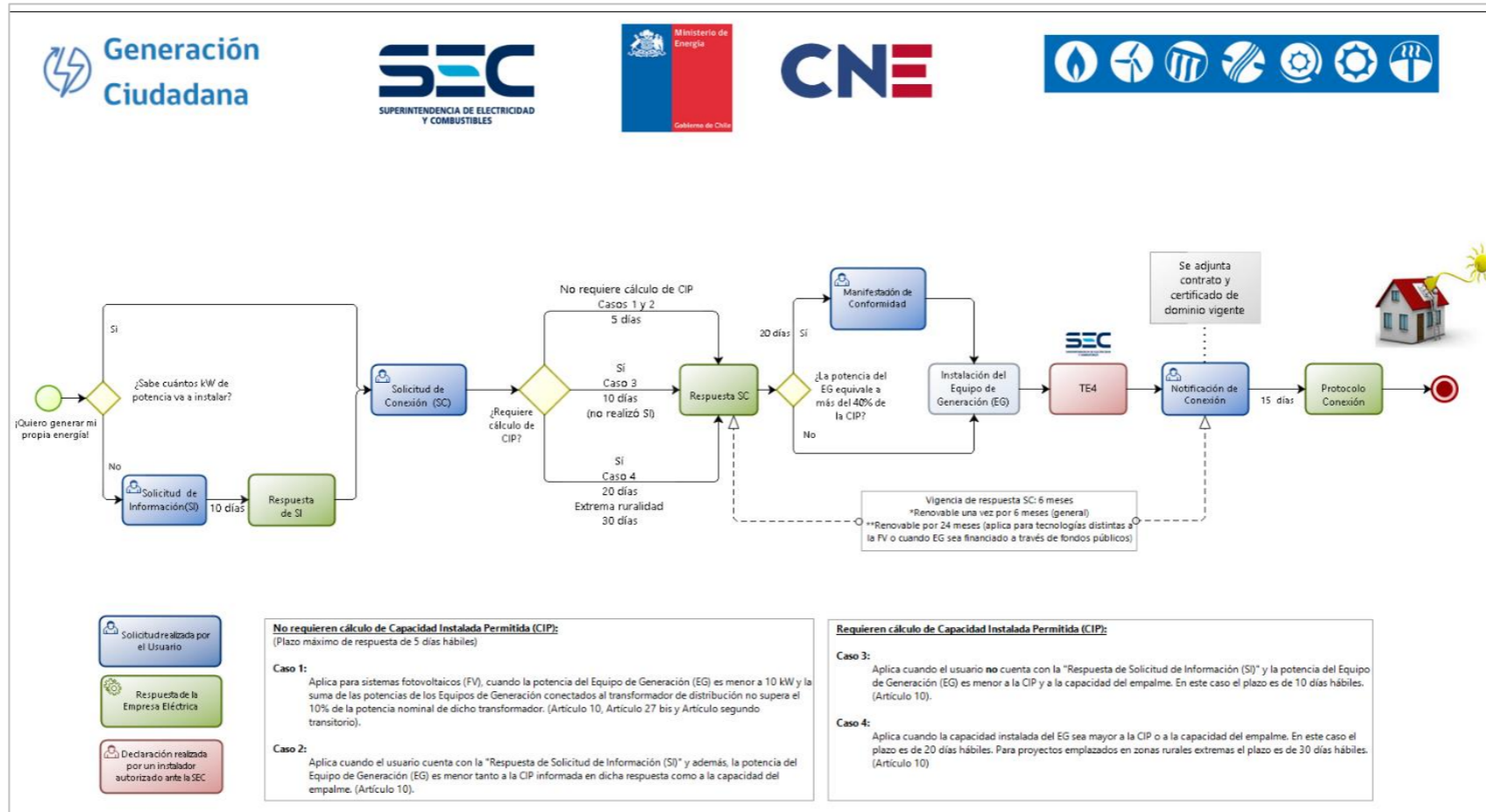


Figura 19: Diagrama de conexión al sistema interconectado.⁴⁹

5.3: Normativa

La normativa exige que, a la hora de conectar el sistema de generación a la red, esta no debe generar repercusiones en la red de distribución, por esto hay que seguir una serie de protocolos para poder realizar la integración al sistema de la forma más segura. En caso de conectar un sistema de generación mayor a 10 [kW], la conexión realizada debe hacerse como un generador trifásico simétrico. Tanto los sistemas de medición, monitoreo y control serán de propiedad de la empresa de distribución y deben ser implementados según lo que indica la normativa vigente.

Al realizar el proyecto hay que considerar un interruptor de acoplamiento, el cual protegerá la red de distribución y el sistema de generación, cortando la conexión entre ambos, este puede ser de dos tipos, centralizado o acoplado, estos sistemas deben proteger la red de distribución de lo siguiente:

- I. Subtensión
- II. Sobretensión
- III. Subfrecuencia
- IV. Sobre frecuencia
- V. Anti-isla eléctrica

Y los ajuste a realizar para que el interruptor de acoplamiento se active (desconexión), será echo a partir de la normativa vigente, para este caso, los podemos ver en la Tabla 5, donde vemos que los valores acompañan a V_n , sol múltiplos o fracciones del valor de voltaje nominal.

Tabla 5: Valores de ajuste para la protección de la red e instalación.⁵⁰

Función de protección.	Ajustes del relé.	
Protección contra caídas de tensión $V<$	0,80 V_n	< 100 ms
Protección contra sobretensiones (media 10-minutos) $V>$	1,10 V_n^{**}	< 100 ms
Protección contra sobretensiones breves $V>>$	1,15 V_n	< 100 ms
Protección contra caída de la frecuencia $f<$	47,50 Hz	< 100 ms
Protección contra subidas de la frecuencia $f>$	51,50 Hz	< 100 ms
<p>* La indicación de tiempo “< 100 ms” para el ajuste de los relés de protección se basa en el supuesto de que el tiempo total de la Protección RI y el interruptor de acoplamiento no exceda 200 ms de tiempo total de desconexión. Si el tiempo de operación de los componentes es inferior a 100 ms (ej: 50 ms) podría disponerse más tiempo para que la protección mida y analice la situación (ej: hasta 150 ms). Sin embargo, en este caso 100 ms debe visualizarse como valor de ajuste en la Protección RI. En ningún caso se debe superar el tiempo total de desconexión de 200 ms.</p>		
<p>** Se debe asegurar que $V>$ no supere 1,1 V_n en el punto de conexión a la red. Si para controlar esta tensión se emplea una Protección RI centralizada, está permitido que la potencial protección contra sobretensiones $V>$ descentralizada sea ajustada hasta 1,15 V_n. El Instalador debería analizar en este caso, posibles repercusiones sobre las instalaciones del Cliente o Usuario Final. Cuando la caída de tensión en la instalación no es despreciable (acometida larga), se recomienda la combinación de una Protección RI centralizada ($V>$: 1,1 V_n) y Protección RI integrada ($V>$: 1,1 a 1,15 V_n).</p>		

La norma paralelamente determina los lugares de instalación de los sistemas de seguridad, posee las determinaciones para las conexiones a media tensión, pero debido a que las residencias están conectadas a baja tensión, esta información no es relevante para el documento en comento Como sistema de generación que se integra a la red, hay que asegurarse, a través de pruebas, que el sistema este sincronizado, que el factor de potencia del sistema de generación sea igual a 1, donde entendemos el factor de potencia como la relación entre potencia activa y la potencia aparente, al existir un facto igual a 1, se evitan perdidas internas del sistema. Finalmente se debe realizar pruebas de puesta en servicio, prueba de desconexión y pruebas del funcionamiento de la protección del sistema, las cuales son realizadas por la empresa que instala el sistema y la empresa distribuidora.

⁵⁰ (11)

Capítulo 6: Análisis técnico

A continuación, es presentado el análisis técnico del Proyecto.

6.1: Generalidades

Para las siguientes secciones se utilizará una terminología determinada, esto para facilitar la comprensión del proyecto. En primero lugar, se separan las 4 áreas aprovechables en 4 módulos, los cuales tendrán siglas que serán utilizadas a forma de síntesis, mostradas en la Tabla 6, cada módulo con su respectiva área aprovechable.

Tabla 6: Resumen de la terminología.⁵¹

Espacio para utilizar	Área [m²]	Modulo	Sigla
Casa 1 habitada	130	Modulo 1	M1
Casa 2 habitada	70	Modulo 2	M2
Casa 3 deshabitada	27	Modulo 3	M3
Bodega	72	Modulo 4	M4

Se hablará de M1, M2, M3 o M4, para simplificar la terminología, asimismo, para realizar los cálculos de sombra, potencia instalada y potencia requerida se tiene que utilizar algún modelo de panel real, con sus dimensiones determinadas y potencia máxima, para esto se hará uso del siguiente modelo, un panel solar de 445 [W]⁵², con dimensiones de 2018*996*40 [mm] y 24.5 [kg] de peso, este tiene una eficiencia del 20.5% aproximadamente, las características son mostradas en la tabla 7, con una imagen de referencia en la Figura 20.

Tabla 7: Tabla resumen con datos técnicos de los paneles Fv.

Área panel [m²]	2.01
Dimensiones [mm]	2018*996*40
Peso [kg]	24.5
N° de celdas	156 (6*26) Monocristalinas
Potencia máxima [W]	445
Voltaje de circuito abierto [V]	54.56
Voltaje de potencia máxima [V]	44.46
Corriente de corto circuito [A]	10.48
Corriente máxima [A]	10.01

⁵¹ Elaboración propia.

⁵² (5)



Figura 20: Ejemplo de panel fotovoltaico.⁵³

Considerando que aún falta la información de la posición del sol durante el año y la radiación solar incidente, estos datos son obtenidos desde la misma base de datos del programa PVSyst.

6.2: Calculo de sombras

Las sombras son divididas en dos tipos, las sombras cercanas y sombras lejanas o de horizonte, cada una de estas reduce de forma diferente la energía generada por los paneles Fv. Ambas están consideradas en el propio programa PVSyst, en el caso de la primera, sombras cercanas, estas dependen de la forma que se configure la instalación de los paneles Fv, de la distancia entre paneles y cualquier cuerpo cercano que pueda producir sombras, un árbol, casas y otros, para esto se calculara una distancia mínima para la instalación de las diferentes filas de paneles Fv. Para el segundo caso, las sombras del horizonte, dependen de la ubicación geográfica de la instalación, estas son las sombras provocadas por objetos en la distancia, como montañas, cerros y otros. Esta información se consigue a través de diferentes bases de datos, con la cual se obtiene el perfil del horizonte, la base de datos utilizada es la de PVGIS⁵⁴, de donde se obtiene los datos del perfil de horizonte, que se agregan al programa PVSyst, obteniendo los resultados de la Figura 21.

⁵³ (6)

⁵⁴ (41)

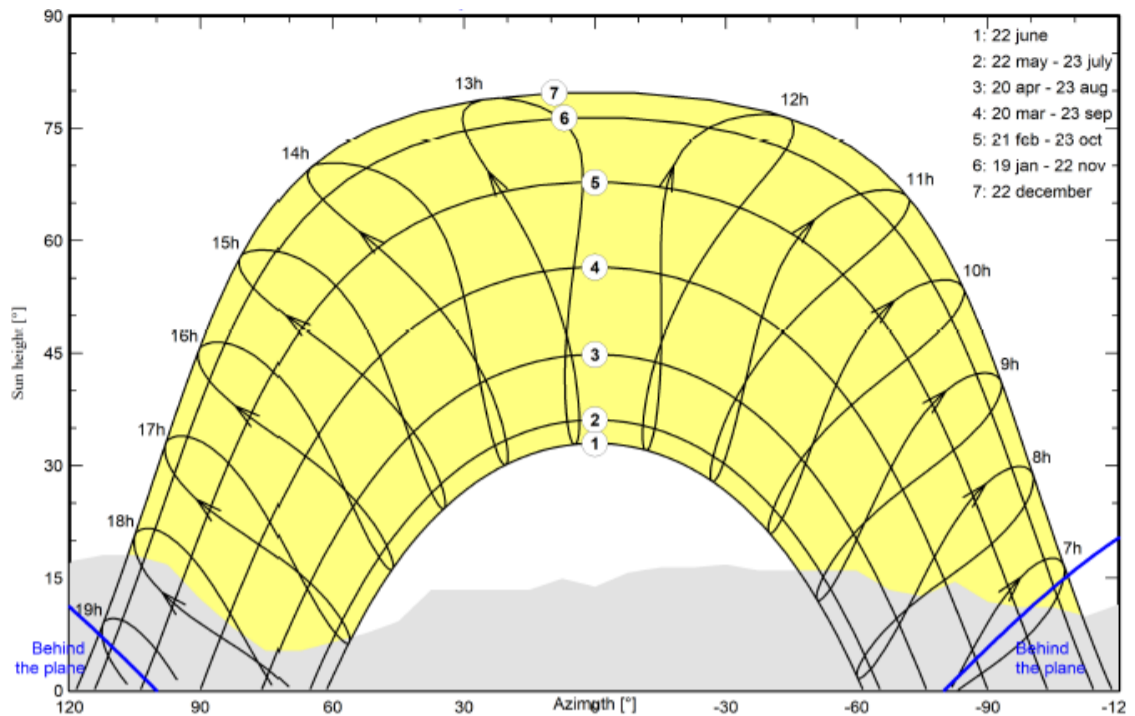


Figura 21: Trayectoria solar con la proyección del perfil de horizonte.⁵⁵

En la Figura 21 se observa la forma del horizonte en gris considerada en la ubicación de la instalación. Se calculan las distancias mínimas entre paneles, con las siguientes directrices generales, los paneles solares se dispondrían de manera horizontal, esto para que su altura sea de 0,996 [m], generando una menor sombra, hay que recordar que los paneles serían colocados sobre techos, los cuales ya tienen una inclinación propia. Existen dos configuraciones posibles para instalar los paneles fotovoltaicos en cada módulo, la primera y más básica, es utilizar la propia pendiente del techo e instalar los paneles solares directamente sobre el techo, en otras palabras, paralelo al techo como se observa en la Figura 22, con la ventaja de que no se generarían sombras entre paneles, ya que los paneles estarían uno junto al otro, pero el ángulo sería el mismo del techo, lo cual generaría una pérdida en cierto nivel de eficiencia, dependiendo de la inclinación de los techos en cada módulo. La segunda forma es colocar filas aisladas de paneles solares, cada uno con la inclinación correcta como se presenta en la Figura 23, esto provocando que la fila que está adelante genere una sombra sobre la que está atrás, lo cual ocasionaría una disminución en área disponible para la instalación de paneles, pero con la ventaja de que el ángulo de inclinación del panel será el óptimo, aprovechando de forma más efectiva la radiación solar.

⁵⁵ Obtenido del programa PVSyst

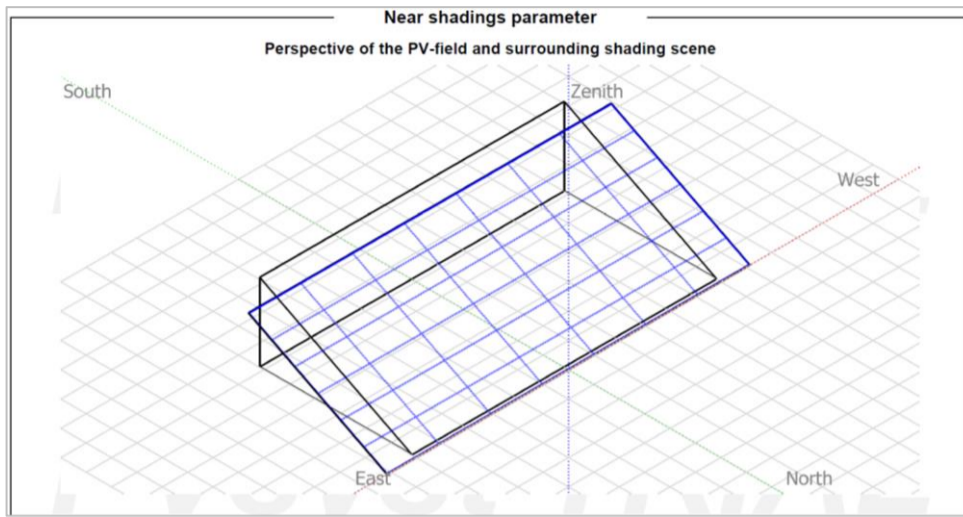


Figura 22: Representación gráfica de un sistema Fv en paralelo al techo, para M4, entregado por el programa PVSyst.

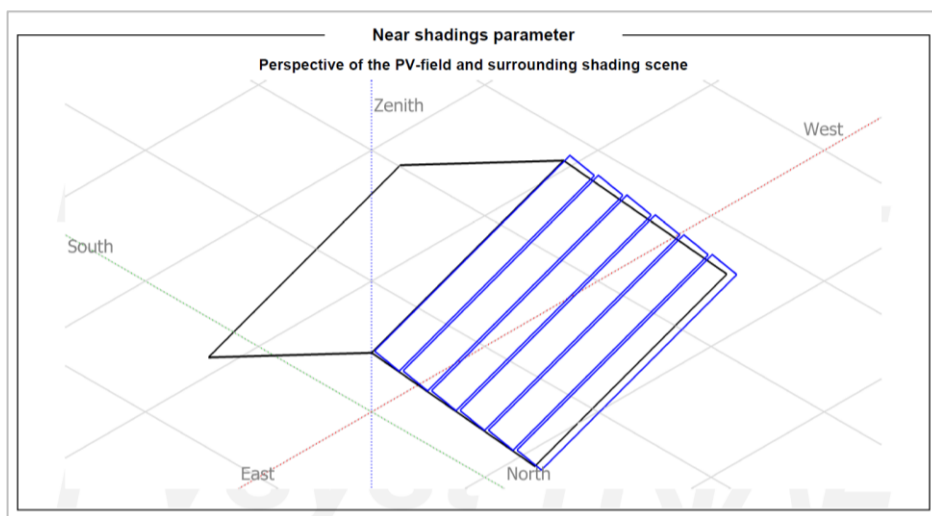


Figura 23: Representación gráfica de un sistema Fv aislado al techo, para M2, entregado por el programa PVSyst.

La única opción que genera sombra es la presentada en la Figura 23, referida como la configuración aislada. Para conocer la distancia a la que deben ser instalados las filas de paneles, se debe conocer la sombra crítica, en la literatura se recomienda utilizar la altura solar alcanzada en el solsticio de invierno, la cual es de aproximadamente $33^{\circ 56}$ para Santiago de Chile, esto lo podemos ver en la carta solar, presentada en la Figura 21, la curva 1. Con este dato se calculó la sombra, para esto se utiliza la Figura 24 donde se presenta la geometría del problema.

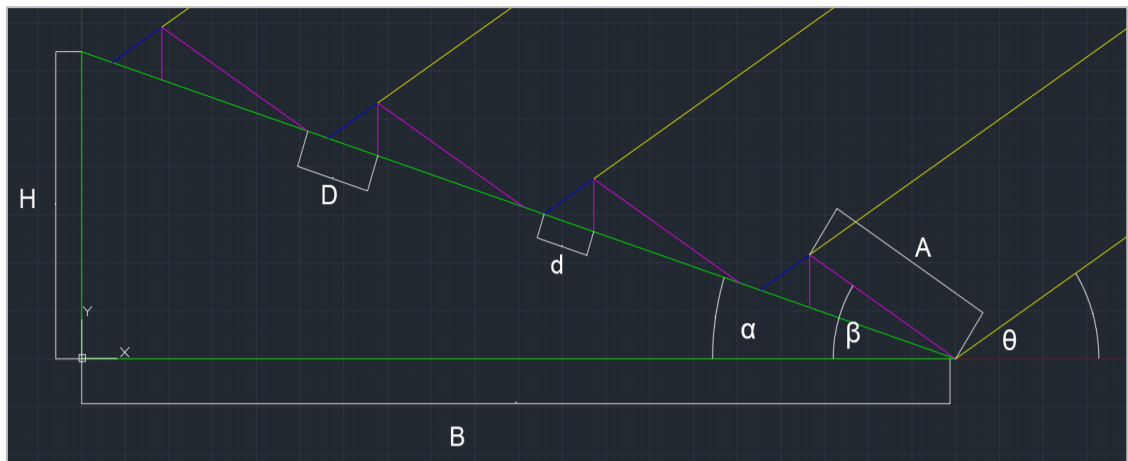


Figura 24: Imagen de referencia para el cálculo de sombras.⁵⁷

En la Figura 24 se pueden ver los siguientes datos conocidos, α como el ángulo que forma el techo con la horizontal, β como el ángulo que forma el panel fotovoltaico con la horizontal y el ángulo θ como la altura solar para el solsticio de invierno, igualmente se conocen las diferentes dimensiones de los módulos, donde H es la altura máxima que alcanza, B es la distancia entre esta altura máxima y los extremos del techo, A es el ancho del panel fotovoltaico (0.996 [m]), d es la distancia que proyecta la sombra sobre el techo inclinado y D es la distancia entre paneles la cual queremos que sea lo más parecido a d. En la Figura 25, es posible notar que, para obtener el valor de “d”, es necesario hacer uso del teorema del seno dentro del triángulo rojo.

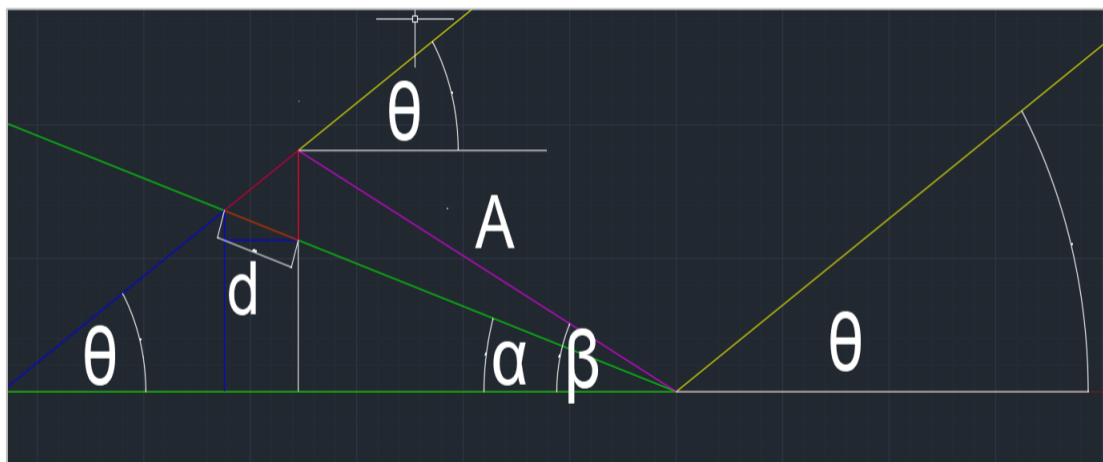


Figura 25: Imagen de referencia para el cálculo de la distancia d.⁵⁸

Con esta metodología se obtuvo el valor de “d”, esta será utilizada para calcular los diferentes módulos, con lo cual se obtienen los siguientes resultados, considerando que β siempre será de 30° y θ de 33° presentados en la Tabla 8.

⁵⁷ Elaboración propia.

⁵⁸ Elaboración propia.

Tabla 8: Valores obtenidos para las distancias de sombra y distancia entre paneles, se presenta la orientación de los módulos respecto al norte.⁵⁹

Modulo	Azimut	Inclinación techo	Valor d	Valor D
M1	4° N	18°	0,20 [m]	0,21 [m]
M2	15° N	21°	0,15 [m]	0,15 [m]
M3	320° NO	10°	0,50[m]	0,50 [m]
M4	10° N	30°	-	-

La distancia D de la Tabla 8, representa distancia entre paneles, se calculó utilizando el valor de “d” la distancia que cubre la sombra critica, sumado a un margen de error o comodidad. Para el módulo 4, debido a que es una bodega, realizar cambios al techo es extremadamente fácil, por ende, se considerara que los paneles se instalan sobre el techo de este, el cual estará en un ángulo de 30°, para poder obtener el mayor provecho posible, por esto no se realizó el cálculo de sombras para este módulo. Cabe destacar que para las simulaciones de generación de energía se utilizara el programa PVSyst, versión 7.1, el cual incluye dentro de sus características la posibilidad de incluir el efecto de las sombras.

6.3: Calculo de potencia instalada

Para conocer cuál es la potencia instalada, es necesario conocer el número de paneles que se instala en cada módulo, como ya se definió, se evalúan dos métodos de instalación, en el primero, se ubicaran los paneles de forma paralela al techo, aprovechando el ángulo de inclinación propio de este y el segundo método utilizara diferentes filas de paneles a un ángulo de 30° cada fila, también conocida como configuración de filas aisladas, por ende es necesario se realice el cálculo de cuantos paneles solares pueden ser colocados en cada módulo, se debe recordar lo siguiente, las dimensiones de cada panel es de 2018*996*40 [mm], conjuntamente, hay que tener los datos de los módulos que se presentaran en la Tabla 9.

Tabla 9: Se presentan las dimensiones de los diferentes módulos, la inclinación de los techos, su azimut respecto al norte y la distancia desde el inicio de una fila a la otra.⁶⁰

Modulo	Dimensiones del techo [m]	Azimut	Inclinación techo	A [m]
M1	5,78*23,5	4° N	18°	1,2
M2	5,89*12	15° N	21°	1,1
M3	4,27*6	320° NO	10°	1,4
M4	6,79*12	10° N	27	0,99

⁵⁹ Elaboración propia.

⁶⁰ Elaboración propia.

En la Tabla 9 se presenta el valor A, el cual representa la distancia que existe entre el inicio de una fila de paneles a la otra, está considerando los espacios de sombra presentados en la Tabla 9 más las dimensiones de los paneles proyectadas en el techo de cada módulo. Con estos datos se puede estimar el número de paneles que caben en cada módulo. Las cantidades calculadas son expuestas en la Tabla 10, donde se tiene el número de paneles organizados en número de filas y columnas para ambas configuraciones.

Tabla 10: Numero de filas y columnas de paneles para cada módulo y configuración.⁶¹

Configuración	Aislado		Paralelo al techo	
	N° Filas	N° Columnas	N° Filas	N° Columnas
M1	5	12	6	12
M2	6	6	6	6
M3	3	3	4	3
M4	-	-	7	6

En la Tabla 10, se observa que, para el caso de realizar la instalación paralela al techo, para M1 y M3 es posible instalar una fila extra de paneles comparado con la instalación aislada de los mismos módulos. Con el número total de paneles por modulo se calcula la potencia instalada para cada módulo y configuración, que es el resultado de la multiplicación entre la potencia de los paneles, 445[W], por el número de paneles.

Tabla 11: Numero de paneles y potencia instalada para cada módulo y configuración.⁶²

Configuración	Aislado		Paralelo al techo	
	N° paneles	P. Instalada [kW]	N° paneles	P. Instalada [kW]
M1	60	26,70	72	32,04
M2	36	16,02	36	16,02
M3	9	4,00	12	5,34
M4	42	18,69	42	18,69
Total	147	65,41	162	72,05

Los valores de potencia instalada presentados en la Tabla 11, no reflejan cuanta energía es capaz de generar, ya que, este cálculo no considera la posición de los paneles ni su ubicación geográfica u orientación, por ende, para poder escoger que configuración es más conveniente, primero se debe conocer cuál es la energía que estos generan en un determinado periodo de tiempo.

⁶¹ Elaboración propia.

⁶² Elaboración propia.

6.4: Calculo de excedentes a generar

Para el cálculo de los excedentes y la energía generada por los distintos módulos de paneles solares se utiliza el programa PVSyst, el cual posee las herramientas de cálculo requeridas y al mismo tiempo integra distintas bases de datos climáticas y de radiación. Los valores de radiación se obtuvieron del software PVSyst, utilizando la base de datos entregada por el explorador solar, se grafican los valores mensuales de radiación global horizontales y difusa horizontales presentados en el Gráfico 6.

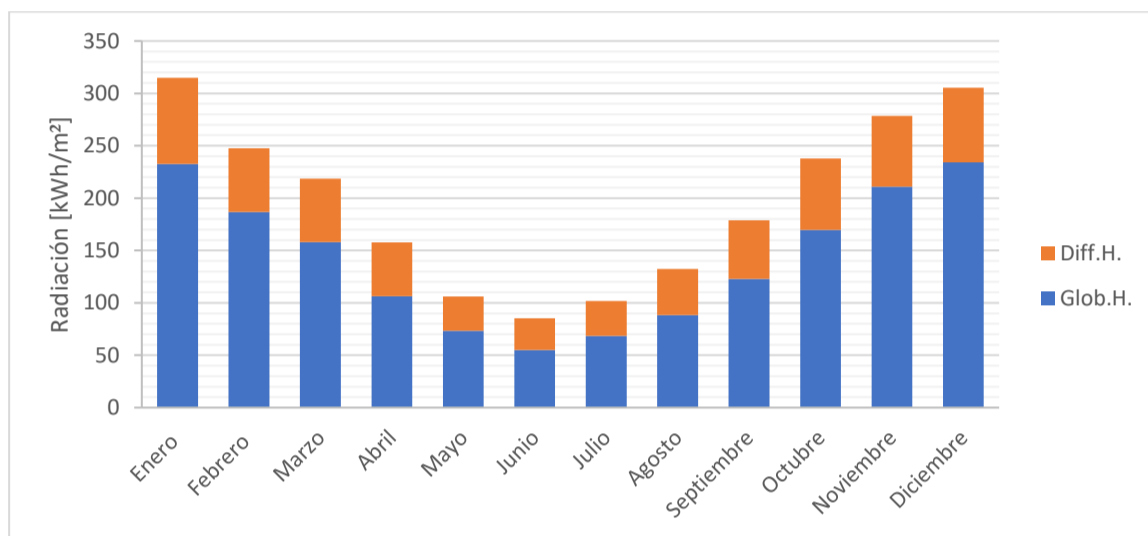


Gráfico 6: Radiación global horizontales y difuso horizontal para cada mes.⁶³

Del Gráfico 6 se observa que el componente que mayor radiación acarrea es la componente directa, y con estos datos es posible notar que el mes de menor radiación es el de junio, por ende, se calculara la energía generada por los módulos para este mes representando la situación de menor generación posible del sistema.

Tabla 12: Energía generada por los diferentes módulos, en las distintas configuraciones para junio.⁶⁴

Configuración	Aislado	Paralelo al techo
Modulo	E. generada en junio [kWh]	E. generada en junio [kWh]
M1	1.639	1.842
M2	856	947
M3	219	266
M4	-	1.177

⁶³ (18)

⁶⁴ Obtenido de PVSyst

El valor mínimo objetivo es de 1050 [kWh] mensuales o 12.6 [MWh] anuales, pero se recuerda que este es un valor aproximado de consumos, por esto, tomar una opción que genere un valor muy cercano de energía sería arriesgado, ya que se busca poder realizar la venta de los excedentes.

Al observar los datos obtenidos de PVSyst, resumidos en la Tabla 12, se aprecia que para todos los casos la configuración en paralelo es la que mayor rendimiento posee, principalmente porque en la configuración aislada se generan pérdidas producidas por las sombras cercanas y en la configuración en paralelo se pueden integrar un mayor número de paneles. En la Tabla 13, se resume la generación total anual calculada en el software PVSyst.

Tabla 13: Energía generada para cada módulo en las distintas configuraciones durante un año.⁶⁵

Configuración	Aislado		Paralelo al techo	
	P. instalada [kW]	E. generada [MWh/año]	P. instalada [kW]	E. generada [MWh/año]
M1	26,70	39,25	32,04	47,33
M2	16,02	22,66	16,02	23,52
M3	4,00	5,65	5,34	7,65
M4		-	18,69	27,16

Con estos datos, a modo de resumen se plantea trabajar con M2 y M4 en la configuración paralela al techo. Ya que uno de los requerimientos es la modularidad del sistema, se seleccionan los módulos que puedan ofrecer beneficios significativos, por esto se descarta M3, ya que, si se desea realizar una instalación de este tamaño en un inicio, es más simple trabajar en M4 y debido a la distancia de M3 al resto de los módulos, se vuelve más complejo el uso de este mismo. Para el caso de M1, tomar la decisión no es tan simple como ver la generación de este, debido a que la configuración en paralelo tiene una total de 72 paneles versus los 60 de la configuración aislada, lo cual logra que la configuración en paralelo obtenga mayor generación, pero a la vez, requiere una mayor inversión debido al que se instalan un mayor número de paneles, por esto, como primera aproximación se calcula el factor R [MWh/año panel], que representa la energía generado a lo largo de un año dividido en el número total de paneles para cada módulo, que se presenta en la Tabla 14.

⁶⁵ Obtenido de PVSyst

Tabla 14: Resumen con el valor del factor R para los diferentes módulos.

Configuración	Aislado	Paralelo
Modulo	R [MWh/año panel]	R [MWh/año panel]
M1	0,654	0,657
M2	0,629	0,653
M4		0,646

En la Tabla 14 se observa que el valor de R para M1 en la configuración en paralelo es mayor que el de la configuración aislada, por esto se toma la decisión de continuar trabajando con M1 en paralelo, pero aun así, no se considera suficiente información para escoger cual configuración es la más apropiada para M1, esto se podrá discernir en la sección económica del documento. Con lo presentado en la Tabla 14, se corrobora la decisión tomada para M2 y M4, de utilizarlos en la configuración en paralelo.

Para los cálculos, se utilizó M1, M2 y M4 en la configuración en paralelo también es importante mencionar que se utilizaron los paneles mencionados en la tabla 7, cuyos cálculos basados en los siguientes inversores, para M1 se utilizaron 3 inversores marca ABB de 12.5 [kW]⁶⁶. Para M2 se utilizarán 2 inversores ABB de 8.2 [kW]⁶⁷. Finalmente, para M4 se utilizarán 2 inversores ABB de 10.0 [kW]⁶⁸. Todos estos inversores fueron escogidos debido a que es posible encontrarlos en Chile, con servicio técnico y además que están diseñados para la conexión a la red eléctrica.

El programa PVSyst posee las herramientas necesarias para conocer cuánta energía es generada por el sistema Fv, cuanta energía Fv es consumida en las residencias y cuanta energía Fv es ingresada a la red como excedentes. Con los datos obtenidos de esta herramienta, se calculó que porcentaje de la energía consumida por las residencias proviene del sistema Fv, en la Tabla 15 se presentan los resultados para cada mes obtenidos para M4, en los anexos se encuentran los resultados para M1, M2 y M4, cada uno por sí solo y todos juntos como un sistema completo, en la figura 45..

⁶⁶ (65)

⁶⁷ (65)

⁶⁸ (65)

Tabla 15: Se presentan las diferentes fracciones de la energía consumida por las residencias que provienen del sistema fotovoltaico para M4.⁶⁹

Mes	Porcentaje de consumo del Fv %
Enero	56,8
Febrero	55,4
Marzo	52,3
Abril	49,9
Mayo	40,6
Junio	39,4
Julio	42,0
Agosto	47,1
Septiembre	49,3
Octubre	51,7
Noviembre	54,6
Diciembre	55,2
Promedio	49,5

Con la información expuesta en la Tabla 15, se conoce cuanta de la energía generada por el sistema fotovoltaico es consumida en las residencias y que cantidad es excedentes, como referencia, el promedio mensual de energía consumida para M1 es de 52,1%, para M2 es de 49,0%, para M4 es de 49,5% y para el sistema completo es de 54,2%. Ahora, es necesaria saber cuánta energía se aprovecha en las residencias y cuanta energía es inyectada a la red, lo cual se puede observar en la Tabla 16, para M4. Los datos de M1, M2, cada uno por si solo y todos juntos se pueden encontrar en el anexo en la Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36 respectivamente.

⁶⁹ Elaboración propia.

Tabla 16: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M4.⁷⁰

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	3,08	0,64	2,33
Febrero	2,72	0,56	2,07
Marzo	2,60	0,58	1,92
Abril	1,99	0,54	1,38
Mayo	1,56	0,45	1,04
Junio	1,17	0,42	0,70
Julio	1,48	0,47	0,95
Agosto	1,74	0,53	1,14
Septiembre	2,17	0,53	1,56
Octubre	2,62	0,58	1,95
Noviembre	2,92	0,59	2,23
Diciembre	3,06	0,62	2,33
Total	27,16	6,56	19,66

Se puede apreciar en la Tabla 16, que al año solo considerando a M4, se consigue generar como excedente aproximadamente 19,6 [MWh] y consumir 6,5 [MWh] desde el sistema Fv en las residencias, si se suma la energía consumida más los excedentes, no suman la energía generada, esto debido a que el software utilizado, considera las diferentes pérdidas para un sistema Fv mostradas en la Figura 26.

⁷⁰ Elaboración propia.

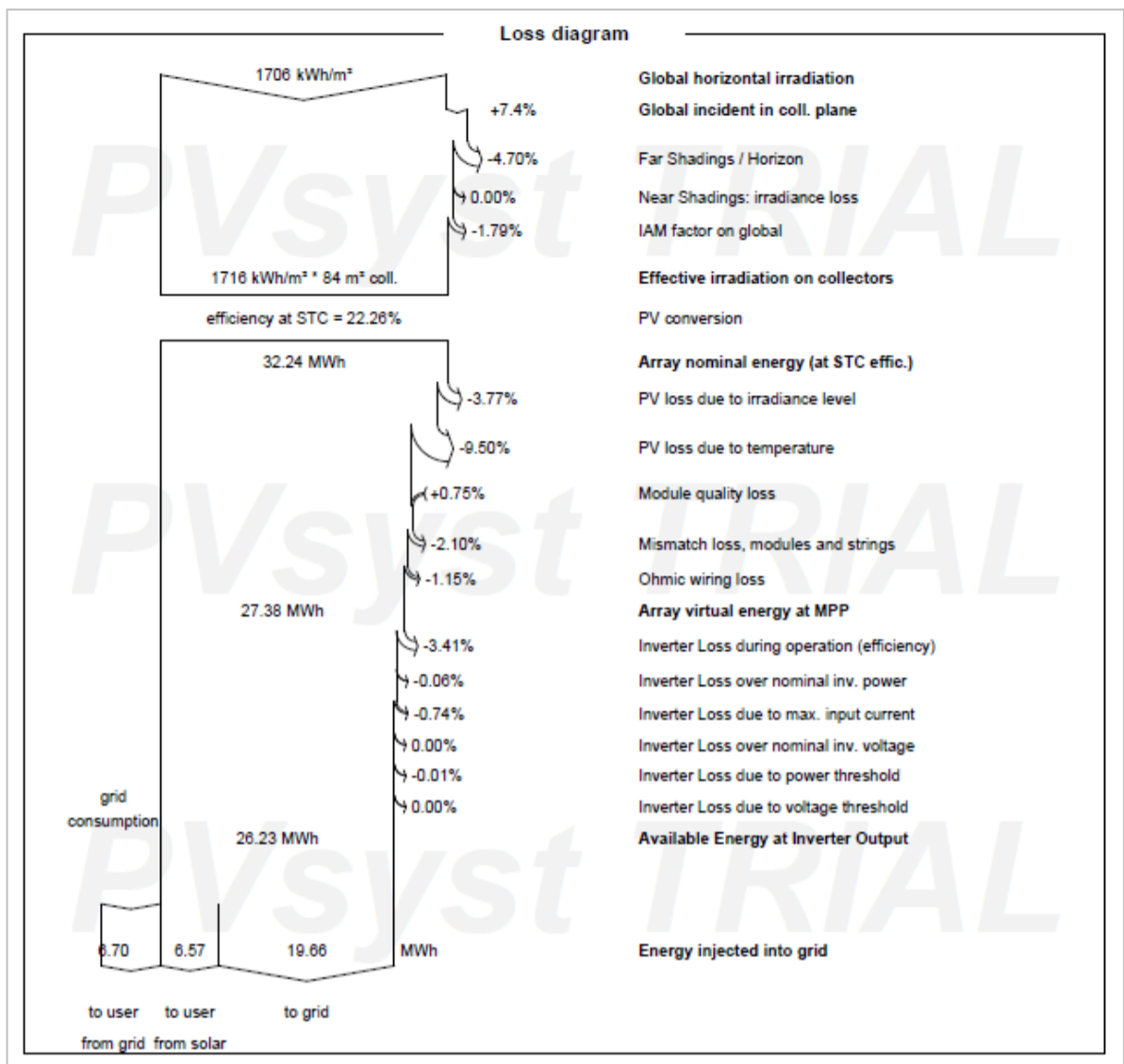


Figura 26: Representación gráfica de las pérdidas del sistema Fv.⁷¹

Desde la Figura 26 se obtiene que las mayores pérdidas se producen por la temperatura, 9,5% aproximadamente, luego con un 4,7% aproximadamente, están las pérdidas por las sombras de horizonte, un 4,2% las pérdidas por el inversor y un 3,7% por irradiación. Tanto las pérdidas por irradiación y temperatura, se deben a que la energía nominal producida por los paneles Fv es calculada bajo condiciones normales de 1000 [W/m²] de irradiación, 25°C de temperatura, cosa que difiere con las condiciones reales de trabajo.

Para obtener un mayor provecho de la energía fotovoltaica, en otras palabras, para aumentar el consumo de energía fotovoltaica al máximo posible, sería necesario instalar un pack de baterías. El razonamiento detrás de esta idea, es que el valor de un Watt de energía consumida en la residencia es mucho mayor que el valor de un Watt vendido como excedente, por esto se decide evaluar el uso de baterías para presentar otra opción al cliente.

Bajo esta perspectiva, se supone que toda la energía que los hogar consumen mensualmente es obtenida a partir del sistema fotovoltaico, ya sea desde el pack de

⁷¹ Obtenido de PVsyst

baterías o directamente del sistema fotovoltaico, esto significa que las baterías almacenan energía durante el día, esta suposición se hará utilizando como ejemplo baterías de 100 [ah] y 12 [V] que podemos encontrar en el mercado Chileno⁷², se calcula que es necesario un mínimo de 24 baterías para cumplir con el consumo nocturnos de invierno cada día, donde es indispensable que se incluya un margen de error, lo cual terminaría aumentando aún más el número de baterías necesarias, como la literatura recomienda⁷³. Para este tipo de casos se utilizaría un total de 48 baterías, en 4 columnas de 12 baterías cada una, esto se calculó considerando que el set de baterías tengan la capacidad de entregar altos volúmenes de corriente de forma instantánea, lo cual al mismo tiempo aumentaría el precio del sistema en \$5,28 millones de pesos solo considerando las 48 baterías, sumado a este valor, se debe considerar la inclusión de un inversor cargador, este se encargaría de la carga de las baterías y del traspaso de la energía entre las baterías y la casa, el equipo que se escogió para el proyecto es una unidad de 5 [kVA], debido a que es el más apropiados para el uso que se le dará, ya que el siguiente equipo salta a 8 [kW], valor muy alejado de lo necesario, duplicando el costo original del anterior. Este equipo de 5 [kW] tiene un costo de \$1,15 millones⁷⁴ de pesos chilenos, esto más el valor de las baterías terminaría elevando más aun el valor total del sistema en \$6,43 MM de pesos chilenos. Obviamente falta que se consideren cosas como la instalación, mano de obra y materiales necesarios para que el sistema integre las baterías, pero como se están trabajando con aproximaciones, con el grueso del costo debería poder obtenerse resultados suficientemente reales. Todo el sistema mencionado tendría que ser instalado dentro de M4. Este tema será nuevamente tomado en el análisis de beneficios, donde se determinará si realmente es conveniente instalar baterías.

Es importante que se mencione que, aunque M2 genera menos energía que M4, este de igual forma consigue generar suficiente como para poder alimentar las tres residencias y vender excedentes a lo largo de todo el año, pero como el cliente indico, M4 sería una de las construcciones más fáciles y atractivas, ya que no se trabajaría en una residencia habitada, si no una bodega. En el Gráfico 7, a modo de resumen, se observa la energía generada promedio mensual para un año, para cada uno de los módulos.

⁷² (27)

⁷³ (53)

⁷⁴ (34)

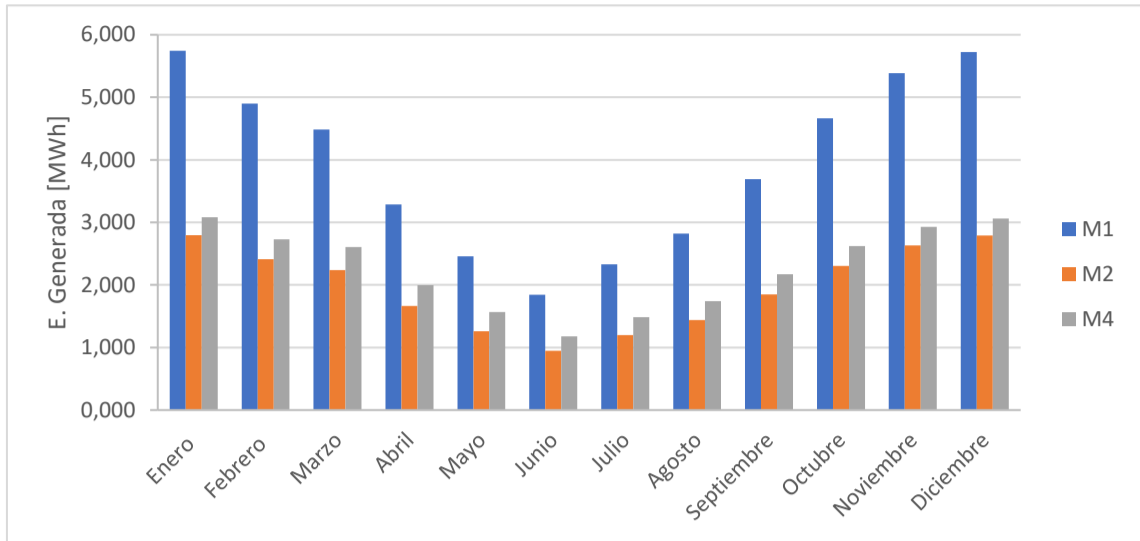


Gráfico 7: Valores de generaciones mensual para M1, M2 y M4.⁷⁵

En el Gráfico 7, se observa algo bastante lógico, que es debido a que la ubicación y la dirección de los módulos es similar, la energía generada dependerá del tamaño del módulo, en este caso, M1 siendo el de mayor tamaño, es el que más energía genera a lo largo del año. Gracias al análisis técnico realizado, se recomienda que si se desea iniciar el proyecto, que este se comience de forma modular, como el cliente lo había pedido y como se explicó, es posible iniciar con cualquiera de los tres módulos restantes, se recomienda partir con M4.

⁷⁵ (18)

6.4: Diseño de estructura de soporte

Debido a que los paneles serán colocados sobre el techo de M1 y M2, es importante armar una estructura de soporte para afirmar los paneles solares en su lugar, esta estructura debe tener la capacidad de sostener el peso de los paneles y el propio sin problemas, ya que los techos ya fueron calculados para sostener más 60 cm de nieve, por esto la estructura para ambos módulos solo será una de sujeción, está a de estar diseñada con las dimensiones de los paneles presentes, espaciando la estructura en función de esta.

Con esta idea en mente se diseñó una estructura de armadura en tres dimensiones en el software Ansys, donde se realizaron diferentes simulaciones con distintos perfiles de Metalcon o vulcometal, los mejores resultados se consiguen con un perfil estructural costanera de 20*30*8.5 [mm] y un espesor de 1 [mm]. La estructura utilizada en diferentes simulaciones para M1 es la que podemos observar en la Figura 27.

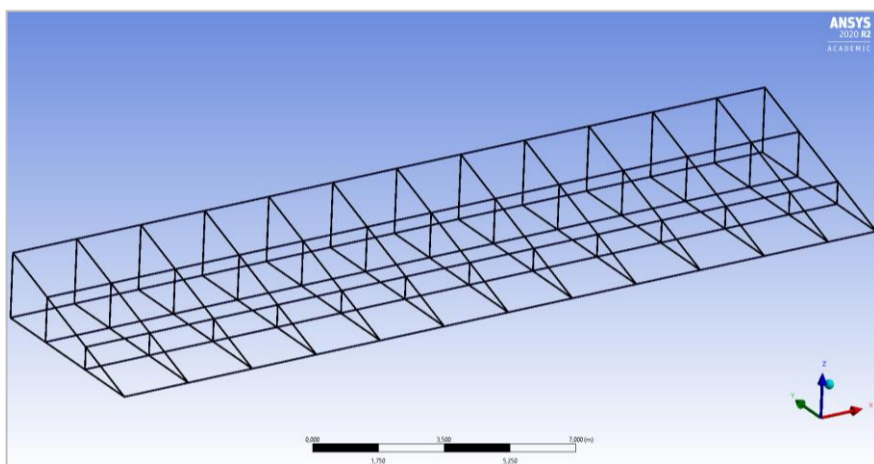


Figura 27: Estructura de armadura de M1 utilizada en las simulaciones de Ansys.⁷⁶

La estructura sería instalada en el techo de M1, como se puede observar en las Figura 28 y la Figura 29.



Figura 28: Se presenta una referencia de la estructura para M1.

⁷⁶ Elaboración propia.



Figura 29: Segunda ilustración de referencia para la estructura.

Con la estructura presente, construida de Metalcon estructural se obtiene una deformación máxima de 2,4[cm] y un factor de seguridad muy superior a 10. Se determina que esta estructura es la correcta, aunque este sobredimensiona, ya que entrega los puntos necesarios para una instalación firme de los paneles. Para M2 se obtienen resultados similares, donde la estructura se muestra en la Figura 30.

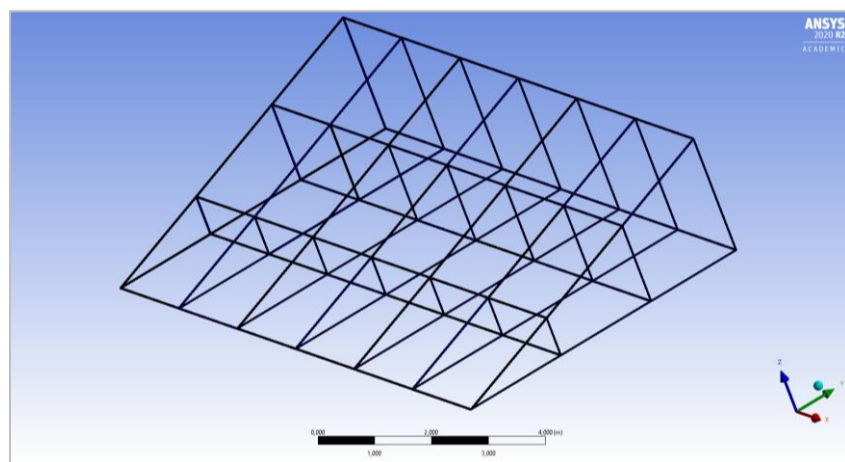


Figura 30: Estructura de armadura de M2 utilizada en las simulaciones de Ansys.⁷⁷

Al igual que la estructura de M1, se realizan proyecciones de como quedaría está, en la Figura 31.

⁷⁷ Elaboración propia.



Figura 31: Referencia de la instalación de la estructura en el módulo 2.

Para este caso, los resultados para la estructura son una deformación máxima de 1,2 [cm] y al igual que el caso anterior un factor de seguridad mayor a 10, en ambos casos, aunque las estructuras parezcan sobre dimensionadas, se decidió continuar con estas por las dimensiones del panel utilizado, para entregar los puntos correctos de fijación.

Finalmente, para el caso de M4, es necesario considerar que esta estructura terminaría remplazando el techo de la bodega, por ende, ha de ser capaz de tolerar el peso de los paneles, el peso de la nieve y el propio. En este caso se utiliza la norma chilena NCH 431-2010-carga de nieve, desde donde se obtiene la Figura 32.

Altitud <i>M</i>	Latitud geográfica (sur) del lugar								
	17° - 26°	26° - 29°	29° - 32°	32° - 34°	34° - 36°	36° - 38°	38° - 42°	42° - 48°	48° - 55°
0 a 300	0	0	0	0,25 (25) ²⁾	0,25 (25) ²⁾	0,25 (25) ²⁾	0,25 (25) ²⁾	0,25 (25)	0,50 (50)
300 a 600	0	0	0	0,25 (25)	0,25 (25)	0,25 (25)	0,25 (25)	0,25 (25)	1,25 (125)
600 a 800	0	0,25 (25)	0,25 (25)	0,50 (50)	0,75 (75)	0,75 (75)	0,75 (75)	0,50 (50)	1,25 (125)
800 a 1 000	0	0,25 (25)	0,25 (25)	0,75 (75)	1,00 (100)	1,00 (100)	1,00 (100)	1,00 (100)	1,25 (125)
1 000 a 1 250	0	0,25 (25)	0,25 (25)	1,00 (100)	1,50 (150)	1,50 (150)	1,50 (150)	1,50 (150)	3) ¹⁾
1 250 a 1 500	0	0,25 (25)	0,25 (25)	2,00 (200)	3,00 (300)	3,00 (300)	3,00 (300)	2,00 (200)	3) ¹⁾
1 500 a 1 750	0	0,25 (25)	0,25 (25)	3,00 (300)	7,00 (700) ⁴⁾	14,5 (1 450) ⁴⁾	4,50 (450)	3,00 (300)	3) ¹⁾
1 750 a 2 000	0	0,50 (50)	0,50 (50)	4,00 (400)	8,60 (860) ⁴⁾	16,2 (1 620) ⁴⁾	6,00 (600)	3) ¹⁾	3) ¹⁾
2 000 a 2 500	3) ¹⁾	1,00 (100)	2,00 (200) ⁴⁾	5,90 (590) ⁴⁾	11,00 (1 100) ⁴⁾	18,75 (1 875) ⁴⁾	3) ¹⁾	3) ¹⁾	3) ¹⁾
2 500 a 3 000	3) ¹⁾	2,00 (200)	2,60 (260) ⁴⁾	8,80 (880) ⁴⁾	3) ¹⁾	22,7 (2 270) ³⁾	3) ¹⁾	3) ¹⁾	3) ¹⁾

Figura 32: Extracto de la tabla para la carga básica de nieve de NCH 431.⁷⁸

Como se observa en la Figura 32, la carga básica de nieve para la locación del proyecto es de 0.75 [kN/m²] o 75 [kg/m²], lo que se traduce en 6075 [kg] para la carga de nieve, más aproximadamente 1000 [kg] por los paneles. La estructura a utilizar para las simulaciones se muestra en la Figura 33, en la Figura 34 se puede observar la deformación máxima entregada por el programa, en la izquierda se ve la deformación con la carga de

⁷⁸ (59)

nieve y a la derecha la deformación considerando solo los paneles y finalmente una simplificación de su instalación en la Figura 35.

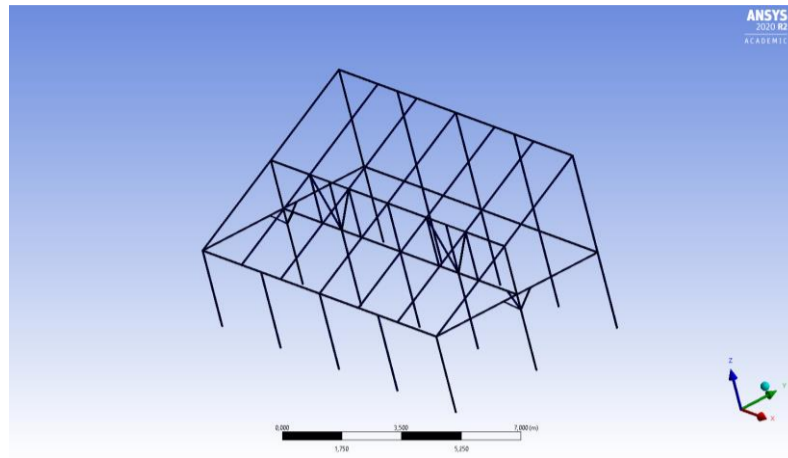


Figura 33: Estructura de armadura de M2 utilizada en las simulaciones de Ansys.⁷⁹

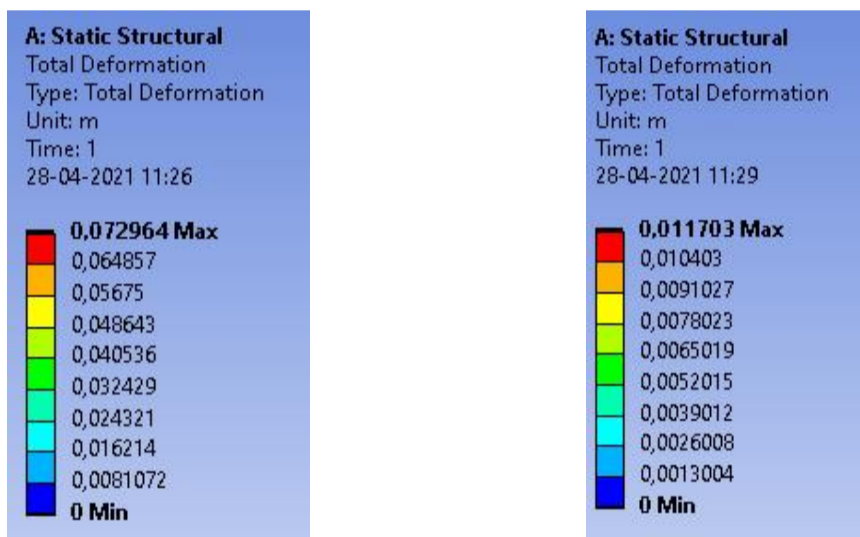


Figura 34: Se presentan los gráficos entregados por Ansys, de la deformación del M4, a la izquierda se observa la deformación para M4 con la carga de nieve y a la derecha la deformación sin la carga de nieve.

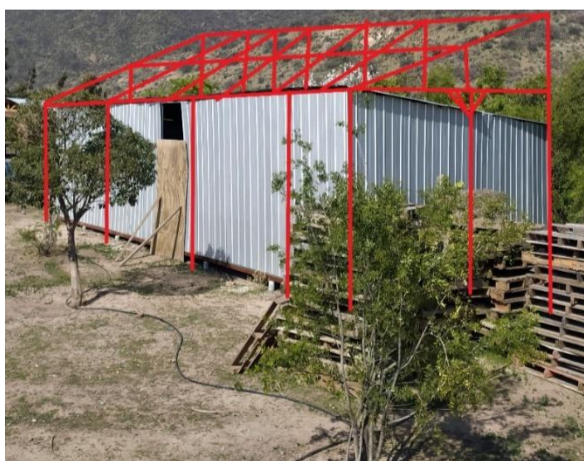


Figura 35: Referencia de la instalación del módulo 4.

Se vuelve importante conocer el material de esta, para M4, luego de que se realizaran simulaciones en Ansys, se concluye que una estructura de acero estructural de

⁷⁹ Elaboración propia.

perfil tubular rectangular 40*30 [mm] y 2 [mm] de espesor, es suficiente, ya que se obtiene una deformación máxima de 7,3 [cm] y un factor de seguridad de 3,4[-] esto considerando la carga máxima (con nieve). Bajo condiciones normales, la deformación máxima es de 1,1 [cm] y el factor de seguridad mucho mayor a 10. En la Tabla 17 se entrega un resumen de los materiales necesarios para la construcción de las estructuras de los módulos.

Tabla 17: Se presenta tabla resumen con las cantidades aproximadas de material estructural necesario para cada módulo.⁸⁰

Modulo	Ítem	Dimensiones	Cantidad[U]
M1	Metalcon estructural perfil costanera.	20x30x8,5x1[mm]x6[m]	62
M2	Metalcon estructural perfil costanera.	20x30x8,5x1[mm]x6[m]	34
M4	Acero estructural perfil tubular rectangular	40x30x2[mm] x6[m]	34

Aunque a la Tabla 17 faltan consideraciones como la soldadura, tornillos y otros insumos, como aproximación general es bastante cercano a la realidad, esto para poder calcular los costos de materiales en la siguiente sección del informe. Como ya se mencionó para M1 y M2 la estructura solo debe aguantar el peso de los paneles y el peso propio y para M4 se calculó con el peso de los paneles más la carga de nieve.

⁸⁰ (33)

Capítulo 7: Análisis económico

A continuación, es presentado un análisis de costos de compra e implementación del Proyecto.

7.1: Generalidades

Para conocer el valor de la instalación de paneles fotovoltaicos, es necesario realizar cotizaciones directas con diferentes empresas, con esto se obtendrían valores más realistas del costo de la instalación, pero por motivos de tiempo e imparcialidad, ya que, aunque se coticen con 3, 4 o 5 opciones diferentes, estos seguirán siendo un pequeño número de posibles empresas frente al número total, se utiliza el informe “*Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile, versión 2019*”⁸¹ desarrollado por encargo de variadas instituciones gubernamentales de Chile y Alemania, el proyecto es desarrollado por el Ministerio de Energía y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional, GIZ).

En este documento se puede encontrar información sobre las diferentes cotizaciones realizadas a un total de 74 empresas, de las cuales, solamente se consigue una respuesta de 39. Dentro de las características técnicas predefinidas por los involucrados en el informe para realizar las cotizaciones, tenemos que el proyecto debe ser entregado con llave en mano, por ende, la empresa instaladora debe hacerse cargo de todo lo que significa instalación, compra, pruebas y conexión del sistema fotovoltaico al sistema interconectado y a las casas, esto se alinea perfectamente con el proyecto, en el mismo se encuentran las siguientes definiciones técnicas incluidas en las cotizaciones realizadas en el documento, en la Figura 36.

⁸¹ (20)

Módulos FV	Inversor	Estructura de soporte
Los módulos fotovoltaicos están autorizados por la SEC	Autorizado por la SEC	El soporte es de aluminio o es una estructura de acero con recubrimiento o tratamiento anticorrosivo
El marco de la estructura es anodizado	El inversor tiene un grado IP 65 para ambientes exteriores y un IP 54 para ambientes interiores	Para aplicaciones comunes, la pernería utilizada para la sujeción de módulos es de Acero inoxidable A2 DIN/ISO
La garantía de potencia de salida es igual o superior al 80% de la potencia máxima del módulo, al año 25 después de la puesta en operación	La eficiencia del inversor es mayor o igual al 95% cuando se encuentra en un punto de operación entre el 30% y el 100% de potencia de entrada	En zonas costeras, la pernería utilizada para la sujeción de módulos es de Acero DIN/ISO
La garantía de fabricación es de al menos 10 años	La garantía de fabricación es de al menos 5 años	El montaje de la estructura de soporte es a nivel de techo o suelo
	Cuenta con servicio técnico disponible en Chile	
Vida útil de la instalación es de 25 años		

Figura 36: Se presentan las características técnicas requeridas para realizar la cotización.⁸²

Estas características se alinean de forma bastante clara con los requerimientos del cliente, por ende, utilizar la información presentada en este informe entregaría aproximaciones más representativas del mercado, que realizar cotizaciones directas con un grupo de empresas. De la Figura 36 se obtienen datos de extrema importancia al calcular los índices económicos, la vida útil del proyecto es de 25 años y entregan una eficiencia certificada de los paneles pasado 25 años de la puesta en marcha.

7.2: Calculo de inversión general

Para el cálculo de costos generales, se dividirá el presupuesto en dos partes, una primera parte que considera el valor de la instalación, el costo de los paneles y todos los equipos necesarios para poder hacer funcionar el sistema de forma correcta, lo cual se obtendrá del informe “Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile, versión 2019”⁸³ y la segunda que considera el costo de la estructura necesaria para reforzar los techos de los diferentes módulos. Para la primera parte, se tomará en cuenta la Figura 37, el cual se obtuvo del informe ya mencionado, para obtener un aproximado del valor de los sistemas Fv.

⁸² (20)

⁸³ (20)

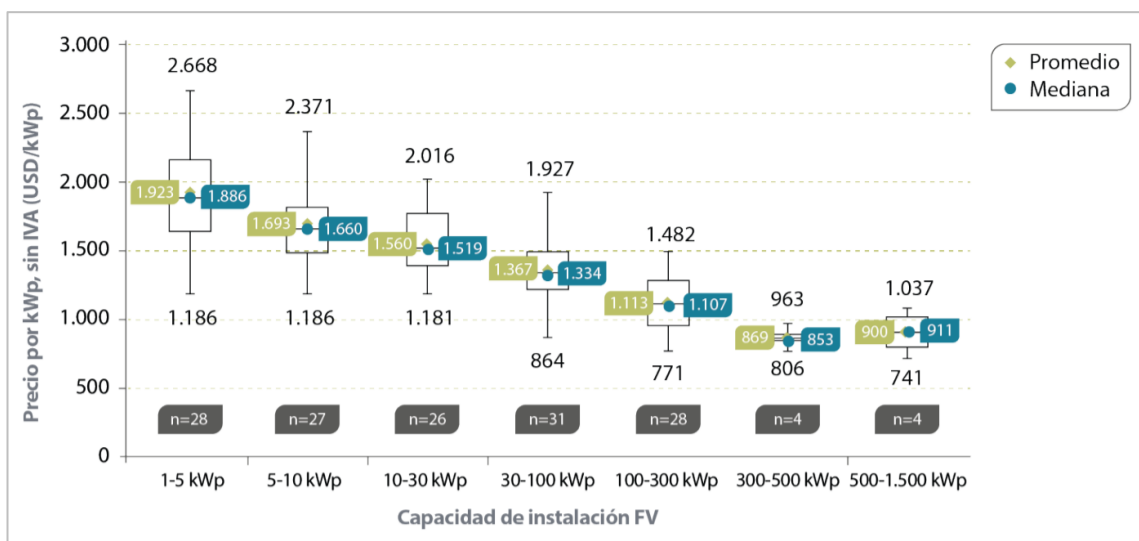


Figura 37: Gráfico con el análisis estadístico de precios de sistemas Fv.⁸⁴

Para cada rango de potencia instalada, existe un máximo, un mínimo, un promedio y una mediana, se utilizará el valor promedio, que se vuelve más representativo. En la Figura 37 se encuentra el valor n, el cual representa el número de empresas que respondieron la cotización por rango de potencia instalada. Es relevante recordar que para este proyecto se están considerando 3 módulos diferentes, con la posibilidad de iniciar el proyecto con un módulo y luego ir sumándole los restantes, por esto, se tomaran 4 posibles formas de inversión, estas serían, iniciar con un módulo (M1, M2 o M4), para luego construir el resto, de esta forma, se logra dividir la inversión, o realizar la instalación de los tres módulos a la vez. De esta forma, se trabajaría en los rangos de potencia instalada entre los 10-30 [kWp] y 30-100[kWp].

Tabla 18: Resumen con diferentes valores para las distintas configuraciones del proyecto.⁸⁵

Modulo	P. instalada [kW]	Valor [usd/kWp]
M1	32,04	1.367
M2	16,02	1.560
M4	18.,69	1.560
Completo	66,75	1.367

La Tabla 18 presenta en que rango de precio cae cada uno de los distintos módulos y el sistema completo. Volviendo a lo visto con anterioridad, respecto a que configuración es más conveniente para M1, es necesario tener presente que el valor para la configuración aislada de M1 es de 1.560[usd/kWp], mayor que el de la configuración en paralelo presentada en la Tabla 18.

Es importante conocer cómo se dividen los costos de la instalación con llave en mano presentadas en el informe, estos se podrán observar en la Figura 38.

⁸⁴ (20)

⁸⁵ Elaboración propia.

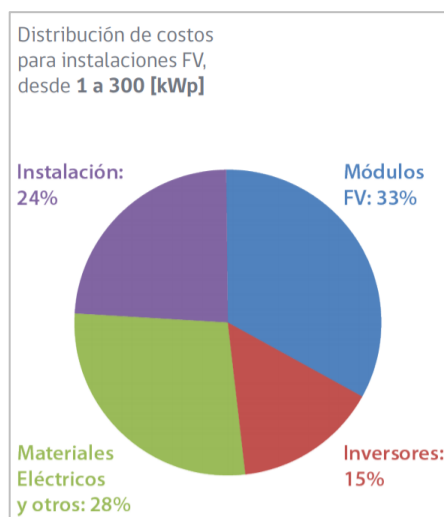


Figura 38: Gráfico de la distribución de los costos de instalación fotovoltaica en Chile.⁸⁶

Finalmente, para conocer el valor total de cada módulo es necesario conocer los costos de las estructuras, para esto se utilizarán las aproximaciones de la Tabla 17 en la sección 6.4 de este documento, los precios son obtenidos en la página de Sodimac⁸⁷, como una referencia para conseguir aproximar el costo por módulo, se incluyen la transformación de pesos chilenos a dólares estadounidenses, con una razón de 1 [usd] igual a 800 [clp], valores de referencia resumidos en la Tabla 19.

Tabla 19: Resumen de los precios de los diferentes materiales como referencia de costos.⁸⁸

Ítem	Dimensiones	Valor [clp/u]	Valor [usd/u]
Metalcon estructural perfil costanera.	20x30x8,5x1[mm]x6[m]	\$5.670	\$7,08
Acero estructural perfil tubular rectangular	40x30x2[mm] x6[m]	\$10.590	\$13,24

Con estos valores y considerando las cantidades aproximadas ya calculadas y que la mano de obra será colocada por el cliente, es posible obtener el costo de la estructura de refuerzo para cada módulo presentados en la Tabla 20.

Tabla 20: Resumen de valor por modulo para las estructuras de refuerzo.⁸⁹

Modulo	Valor referencia [clp].	Valor referencia [usd].
Modulo 1	\$351.540	\$439
Modulo 2	\$192.780	\$240
Modulo 4	\$360.060	\$450
Total	\$904.380	\$1.129

⁸⁶ (20)

⁸⁷ (33)

⁸⁸ Elaboración propia.

⁸⁹ Elaboración propia.

Se debe sumar gran importancia al hecho que todos estos valores obtenidos son aproximaciones y cotizaciones puntuales, por ende, siempre existirá cierta desviación con respecto a la realidad, partiendo de un promedio de precios, pasando por la transformación de pesos chilenos [clp] a dólar de Estados Unidos [USD] y llegando a un listado de materiales incompleto. Con los datos que se obtuvieron, se calcula el valor total de cada módulo y del proyecto completo, esto se observa en la Tabla 21.

Tabla 21: Valor para cada módulo por separado y todos juntos.⁹⁰

Modulo	P. Instalada [kW]	Valor [usd]	Valor [clp]
M1	32,04	\$44.238	\$35,4 MM
M2	16,02	\$25.231	\$20,2 MM
M4	18,69	\$29.606	\$23,7 MM
Completo	66,75	\$92.376	\$73 MM

Se debe incluir el valor de M1 en la configuración aislada, la inversión necesaria para este caso es de \$33,7 MM [clp], al comparar la inversión inicial con la energía generada al año, el factor F [Wh/año clp] que representa la cantidad de energía generada en Watts hora al año por el módulo por cada peso de inversión, para M1 en la configuración aislada el valor de F es de 1,16 [Wh/año clp], para M1 en la configuración paralela es de 1,34 [Wh/año clp], por esto se determina finalmente que la configuración más beneficiosa para M1 es la configuración en paralelo, como se escogió con anterioridad. A continuación, en la Tabla 22, se presenta el valor del factor F para los diferentes módulos a utilizar.

Tabla 22: Resumen con el valor de F para los diferentes módulos.

Modulo	F [Wh/año clp]
M1	1,34
M2	1,16
M4	1,15
Completo	1,34

En la Tabla 21 están registradas las diferentes inversiones para los módulos, se debe considerar que el mantenimiento de los paneles y el sistema eléctrico recae sobre el cliente, donde la mayor parte de estos los realizara el mismo, estos tienen un costo de aproximadamente un 0.5 a un 1.5% del valor de la inversión inicial anual⁹¹, pero no existen estudios respecto al costo en instalaciones residenciales.

⁹⁰ Elaboración propia.

⁹¹ (54)

Como se menciona en la sección 6.4 de este informe, es posible realizar la integración de baterías al sistema, el valor de incluirlas, es de aproximadamente \$6,43 MM [clp], esto sumado al valor inicial del sistema y sus módulos, el efecto de este incremento se puede ver en la Tabla 23, donde se compara un sistema con baterías versus un sistema sin baterías.

Tabla 23: Valor para cada módulo sumando las baterías y relación entre un módulo con batería y sin batería.⁹²

Modulo	Valor c/batería [clp]	Relación c/batería vs s/batería [-]
M1	\$41,8 MM	1,18
M2	\$26,6 MM	1,12
M4	\$30,1 MM	1,27
Completo	\$79,4 MM	1,09

Como se ve en la Tabla 23, para alguno de los casos significa más de un 25% del valor de proyecto, esto se da para los proyectos de menor tamaño, lo cual es lógico, ya que el costo del sistema de baterías no depende del valor del proyecto, pero, aun así, es necesario realizar un análisis de mayor profundidad para poder descartar esta opción. Se entiende que el cliente no desea instalar baterías, pero es importante entregar la mayor cantidad de información para la toma de decisión final.

7.3: Calculo de beneficios

Para poder obtener los beneficios del proyecto, se deben conocer los siguientes datos, el valor de cada quilo Watt hora consumido (extraído de la red eléctrica), el valor de cada quilo Watt hora vendido como excedente, conocer la relación entre la energía consumida desde el sistema F_v , la energía vendida como excedente y la energía generada por el sistema F_v , para así calcular los beneficios, pero todo esto depende de que módulos se están analizando, por ejemplo, en el Gráfico 8 se observa el desempeño de M4 obtenido del software PVSyst.

⁹². Elaboración propia.

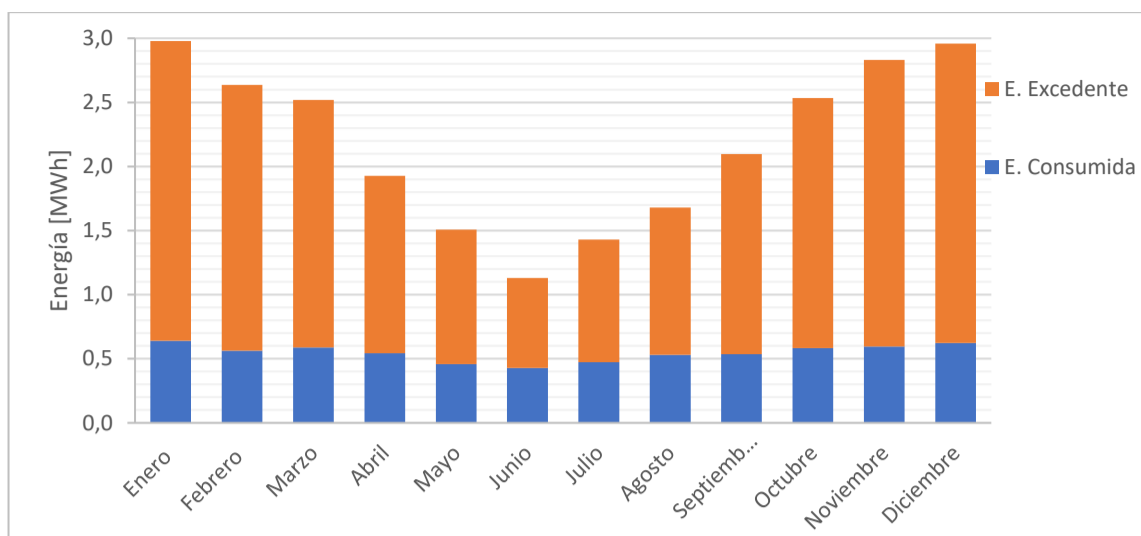


Gráfico 8: Diferentes fracciones de la energía solar para M4 a lo largo del año.⁹³

El valor de cada [kWh] consumido es de 77 [clp/kWh]⁹⁴, y para el caso de los excedentes se aproxima a 59 [clp/kWh]⁹⁵, valor obtenido de documentación de CNE. Con estos valores se utilizará a M4 como ejemplo de cálculo, con lo cual se obtendrán los beneficios anuales, por la venta y ahorro de energía en la Tabla 24. En los anexos se encuentran las Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39, con el resumen de los beneficios estimados para M1, M2 y el sistema completo respectivamente.

Tabla 24: Tabla resumen con los beneficios estimados para M4.⁹⁶

Mes	Generación Fv [MWh]	Consumo Fv [MWh]	Beneficio consumo [clp]	Excedente Fv [MWh]	Beneficios excedentes [clp]
Enero	3,08	0,64	\$49.000	2,34	\$138.000
Febrero	2,73	0,56	\$43.000	2,07	\$122.000
Marzo	2,61	0,59	\$45.000	1,93	\$114.000
Abril	1,99	0,54	\$41.000	1,38	\$81.000
Mayo	1,57	0,46	\$35.000	1,05	\$62.000
Junio	1,18	0,43	\$33.000	0,70	\$41.000
Julio	1,49	0,47	\$36.000	0,96	\$56.000
Agosto	1,74	0,53	\$40.000	1,15	\$67.000
Septiembre	2,17	0,54	\$41.000	1,56	\$92.000
Octubre	2,62	0,58	\$44.000	1,95	\$115.000
Noviembre	2,93	0,59	\$45.000	2,24	\$131.000
Diciembre	3,06	0,62	\$47.000	2,34	\$137.000
Total anual	27,16	6,57	\$505.000	19,66	\$1.160.000

⁹³ Obtenido de PVSyst.

⁹⁴ (36)

⁹⁵ (32)

⁹⁶ Elaboración propia.

El ahorro anual total es de aproximadamente \$1.600.000 [clp], solo considerando M4. Utilizando esta misma metodología se calculó el beneficio para cada módulo por separado y el sistema completo, lo cual se resume en la Tabla 25.

Tabla 25: Se presenta el beneficio anual obtenido por cada módulo por separado y todos juntos considerando el consumo y los excedentes.⁹⁷

Módulos	Beneficios consumo [clp/año]	Beneficios excedentes [clp/año]	Beneficio anual total [clp/año]
M1	\$531.000	\$2.304.000	\$2.836.000
M2	\$500.000	\$945.000	\$1.445.000
M4	\$505.000	\$1.160.000	\$1.665.000
Completo	\$553.000	\$5.161.000	\$5.714.000

El beneficio producido por el consumo realmente no varía de forma notable, alrededor de \$50.000 [clp] entre el mejor y el peor caso, esto debido a que gran parte de la energía se consume durante la tarde-noche, momentos en los cuales los paneles están entregando menos energía o simplemente no generan, por esto si se desea cambiar este valor, sería necesario la inclusión de baterías en el sistema. Para realizar el cálculo se considera que las baterías consiguen que todo o la mayor parte del consumo de las residencias salga del sistema fotovoltaico, los resultados de energía generada, consumida y excedente fueron calculados con PVSyst y los datos se encuentran en la Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43 del anexo. En la Tabla 26, se presentará la comparación entre los beneficios por la energía consumida anual y la comparación entre el beneficio anual con y sin baterías, para el caso del sistema con baterías, se utiliza el mismo trato que se utilizó para calcular el beneficio del sistema sin baterías.

Tabla 26: Comparación entre los beneficios generados por un sistema sin baterías y uno con baterías.⁹⁸

Módulos	Beneficios consumo s/baterías [clp/año]	Beneficios consumo c/baterías [clp/año]	Beneficio anual total s/baterías [clp/año]	Beneficio anual total c/baterías [clp/año]
M1	\$531.000	\$1.014.000	\$2.836.000	\$2.874.000
M2	\$500.000	\$957.000	\$1.445.000	\$1.477.000
M4	\$505.000	\$980.000	\$1.665.000	\$1.699.000
Completo	\$553.000	\$1.020.000	\$5.714.000	\$5.752.000

⁹⁷ Elaboración propia.

⁹⁸ Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 26, se obtiene una ganancia importante si solo se comparan los beneficios por el consumo, una diferencia de aproximadamente \$500.000 [clp/año], pero estos no se ven reflejados totalmente en el beneficio anual total, ya que, si se compara el beneficio anual total entre los sistemas con y sin baterías, la diferencia es de aproximadamente \$40.000 [clp/año] a favor del sistema con baterías, esto puede deberse a que el sistema sin baterías. Con estos datos se dará inicio al cálculo de los indicadores de rentabilidad del proyecto, comparando un sistema con baterías y uno sin baterías.

7.4: Indicadores de rentabilidad del proyecto

A la hora de analizar la factibilidad económica de un proyecto, se utilizan una serie de indicadores económicos o de rentabilidad distintos, el más conocido es el VAN o valor actual neto, este permite conocer el valor presente neto de un número de flujos de caja, ya sean positivos o negativos, considerando una tasa de interés determinada y un tiempo o número de periodos conocidos, la ecuación para calcular el van es presentada en la Ecuación 1.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^n}$$

Ecuación 1: Formula para el cálculo del VAN.

En la Ecuación 1, n representa el número de periodos, para este caso de 25 años, I_0 es la inversión inicial, k es la tasa de interés considerada, de un 3% y F_t el flujo neto del periodo.

Otro valor interesante a conocer es el PRI o periodo de recuperación de inversión, este valor permite determinar el tiempo que tomaría recuperar la inversión inicial con los beneficios que está generando el proyecto, esto se consigue utilizando la Ecuación 1, pero se reemplaza n hasta obtener que el valor del VAN sea positivo o igual a 0.

El siguiente indicador a utilizar es el IR o índice de rentabilidad, el cual compara los flujos netos obtenido en tiempo presente, versus la inversión realizada en tiempo presente, para determinar si realmente se está ganando y cuanto se está ganando por cada peso invertido, la Ecuación 2 explica cómo se calcula.

$$IR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^n}}{I_0}$$

Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de IR.

En la Ecuación 2, n representa el número de periodos, en este caso 25 años, I_0 es la inversión inicial, k es la tasa de interés considerada, de un 3% y F_t el flujo neto del periodo.

Finalmente, para comparar los diferentes proyectos se utilizará la tasa interna de retorno o TIR, este valor nos presenta cual es el rendimiento máximo del proyecto, cuando el VAN se iguala a cero, representado en la Ecuación 3.

$$TIR = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^n} = 0$$

Ecuación 3: Formula para el cálculo de la TIR.

En la Ecuación 3, n representa el número de periodos, para este caso de 25 años, I_0 es la inversión inicial, F_t el flujo neto del periodo e i representa la TIR, o tasa interna de retorno, que representa el rendimiento máximo del proyecto cuando el VAN se iguala a 0.

Como se mencionó, el proyecto es sin fines de lucro, por ende, se levanta la siguiente pregunta, ¿Por qué utilizar estos indicadores económicos para calcular el beneficio de un proyecto sin fines de lucro?, le respuesta es que, para poder comparar cuál de las opciones de proyecto es más beneficiosa o con mayor rendimiento, los indicadores económicos escogidos se vuelven una herramienta muy importante, que permiten poder discernir cual es la mejor opción, nivelando el campo para cada una de ellas.

Para el caso de este proyecto se utilizará un numero de periodos igual a la vida útil del proyecto, 25 años y para la tasa de interés, se desea comparar con posibles formas de inversión para una persona natural, por esto se opta por los depósitos a plazo, en el caso del Banco Internacional, la tasa más alta encontrada en el momento de la investigación, es de un 1,42% anual⁹⁹ aproximadamente, comparada con la tasa del banco estado de solo un 0,608% anual¹⁰⁰. Por otro lado, estas tasas son bajas al ser comparadas con el PIB acumulado del año 2020, de un 3% anual¹⁰¹, por esto se decide que para los proyectos mencionados, utilizar una tasa de interés de un 3%, ya que aunque el proyecto sea sin fines de lucro, no se desea que la inversión pierda valor a lo largo de los años, por esto se utiliza como referencia el PIB, además de esto se compara con el valor de una inversión en bienes raíces como comparación con la TIR de los distintos proyectos, el costo para comparar es de 7%¹⁰² anual obtenido a través de simular la compra de una residencia y luego la venta de esta pasado 25 años y obtener la TIR.

Para obtener los resultados de los indicadores, es necesario en todos los casos generar un flujo de caja para los 25 años, para cada módulo por separado y todos juntos, esto se realizará con las siguientes suposiciones, como se indica en la Figura 36, extraída del texto “*Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile, versión 2019*”, los paneles fotovoltaicos a utilizar

⁹⁹ (55)

¹⁰⁰ (56)

¹⁰¹ (57)

¹⁰² (58)

deben tener la capacidad de seguir entregando un 80% o más de la potencia nominal después de 25 años, por ende se calcularan los beneficios anuales con un decaimiento lineal, donde para el año 1 se generaría el 100% de la energía calculada y para el año 25 solo el 80% de esta. No existirían costos reales a lo largo de la vida útil del sistema, ya que las mantenciones y limpiezas serian realizados por los dueños de las residencias y como ya se mencionó no se encuentran estudios que presenten un costo de mantenimiento para los sistemas residenciales y para el caso de las baterías que en promedio tienen una vida entre los 6 y los 8 años no se consideró el cambio de estas, para poder darle la mayor posibilidad. Tampoco se consideran créditos en los cálculos, esto quiere decir que el único flujo negativo sería la inversión para el módulo inicial y las inversiones para los módulos restantes, para el caso de armar todo el sistema desde el principio, solo sería una inversión inicial.

A lo largo de la vida útil se puede observar cómo se reduce de forma constante el beneficio, sin embargo, la inversión inicial es varias veces más grande que el beneficio anual, pero para poder obtener conclusiones realistas es necesario realizar el cálculo de los indicadores de rentabilidad.

A continuación, se presentará en la Tabla 27 con los resultados de los indicadores de rentabilidad para cada módulo y todos juntos comparando entre un sistema sin baterías y uno con baterías.

Tabla 27: Resumen con los indicadores de rentabilidad para sistemas con y sin baterías.¹⁰³

Módulos		Inversión MM[clp]	Beneficio anual [clp/año]	VAN MM[clp]	TIR %	PRI [años]	IR[-]
M1	sb*	\$35,3	\$2,8 MM	\$9,4	5,41	18	1,27
	cb**	\$41,8	\$2,9 MM	\$3,8	3,84	22	1,09
M2	sb	\$20,0	\$1,4 MM	\$2,7	4,25	21	1,14
	cb	\$26,6	\$1,5 MM	\$-3,0	1,87	-*	0,88
M4	sb	\$23,6	\$1,7 MM	\$2,7	4,07	21	1,12
	cb	\$30,1	\$1,7 MM	\$-3	2,01	-	0,89
Completo	sb	\$73,0	\$5,7 MM	\$17,3	5,16	18	1,24
	cb	\$79,4	\$5,8 MM	\$11,6	4,36	20	1,15

sb*=sin baterías.

Cb**=con baterías.

-*=No se recupera la inversión en el periodo (25 años).

Como era de esperar, la inversión en un sistema con baterías aumenta el valor del beneficio anual, pero este aumento en los beneficios anuales no es capaz de contrarrestar el aumento de la inversión inicial, por esto es posible notar que los valores presentados

¹⁰³ Elaboración propia.

por los indicadores económicos, no se benefician de la inclusión de baterías, ya que en ni uno de los casos estos mejoran, aun con todas las ventajas que se le entrego al sistema con baterías, por ejemplo no considerar la instalación ni el cambio de baterías a lo largo de la vida útil, no considerar la instalación y conexión de estas.

Los mejores resultados fueron obtenidos por M1 sin baterías, seguido del sistema total sin baterías, se presentan en este orden principalmente debido a los resultados del TIR, ya que, si solamente se analiza el VAN, el sistema completo obtuvo un resultado 84% mejor que M1, pero la inversión del sistema completo es de un 106% más alta que la de M1.

Para el análisis económico, se eliminó la posibilidad de expandir el sistema, esto por dos motivos, el principal es que ni uno de los sistemas fotovoltaicos es capaz de tener un retorno de la inversión en un tiempo inferior a 15 años, por ende pensar en expandir el sistema antes de tener retornos reales es contraproducente y el segundo punto es que no es posible predecir el costo de un sistema fotovoltaico en 10 o 20 años más, esto debido a que, por ejemplo se puede apreciar una caída en el costo de un sistema fotovoltaico con una potencia instalada de 10-30[kWp] de un 12% entre los años 2017 y 2018¹⁰⁴ y una caída en los costos de un 2,3% entre los años 2018 y 2019¹⁰⁵ para el mercado chileno, esta tendencia sigue lo que se puede observar en la Figura 39 de NREL(The National Renewable Energy Laboratory) de Estados Unidos.

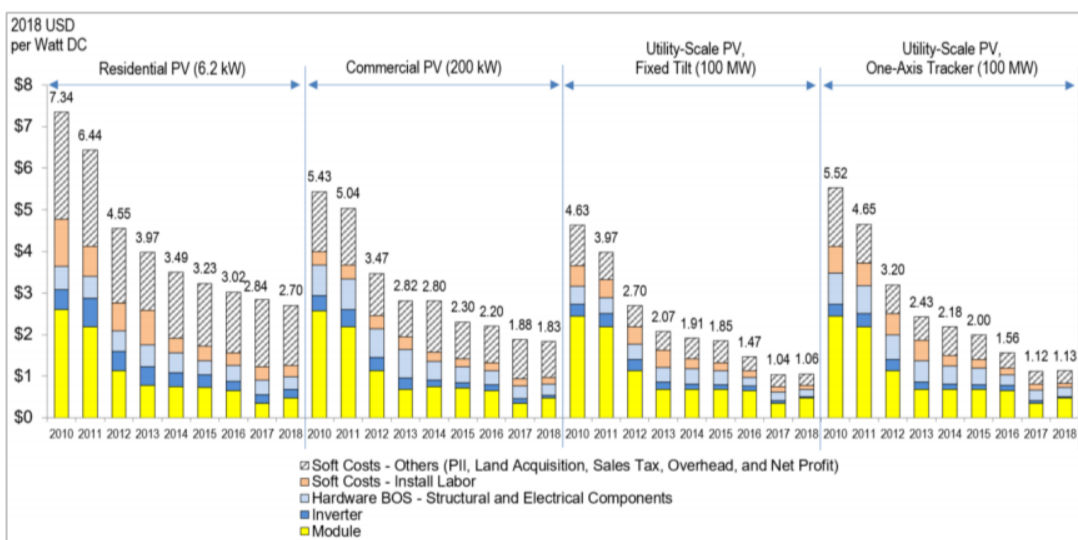


Figura 39: Grafico con el costo de la energía fotovoltaico por Watt de potencia instalada.¹⁰⁶

En el primer cuadrante y segundo cuadrante de la Figura 39, se nota una caída constante del costo de los sistemas de paneles fotovoltaicos desde el año 2010 hasta el 2018, tendencia que continua, como se demostró hasta el año 2019 en Chile, pero que cada vez se reduce menos.

¹⁰⁴ (20)

¹⁰⁵ (20)

¹⁰⁶ (38)

Debido a los resultados obtenidos, se realizan nuevos cálculos utilizando el módulo 4, pero, variando la potencia instalada en este, como módulos de prueba, esto para poder analizar como varían los indicadores económicos en los sistemas de menor tamaño.

En el Gráfico 9 se comparan los resultados de la TIR y el IR, obtenidos para los siguientes sistemas de 2.2[kW], 4.5[kW], 8[kW], 10.7[kW], 12.5[kW], 16[kW], 16.2[kW] (M2), 18.69[kW] (M4), 32.04[kW] (M1) y 66.75 [kW] (M1+M2+M4), con la diferencia esencial, de que debido a los resultados presentados en la Tabla 27, solo se evaluarán sistemas sin baterías. Los datos básicos de los módulos de pruebas se encuentran en la Tabla 44 en los anexos.

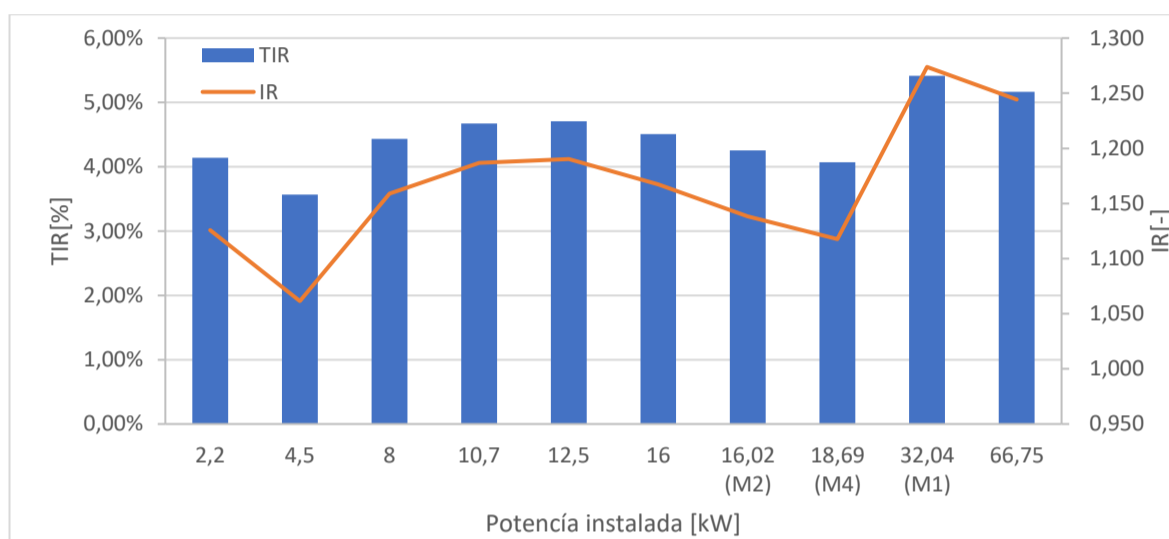


Gráfico 9: Valores de la TIR y el IR para diferentes potencias instaladas.¹⁰⁷

De los datos presentados en el Gráfico 9, se resumen en la Tabla 28 las 3 mejores opciones encontradas por el análisis económico.

¹⁰⁷ Elaboración propia.

Tabla 28: Resumen de las mejores opciones económicas para sistemas Fv estudiados.¹⁰⁸

Sistema [kW]	E. generada [MWh/año]	E. Consumida [MWh/año]	E. Excedente [MWh/año]	Inversión [clp]	B. anual [clp/año]	VAN [clp]	TIR %	IR [-]	PRI [años]	F [Wh/año*clp]
3,04 (M1)	47,33	6,91	39,07	\$35,4 MM	\$2,8 MM	\$9,4 MM	5,41	1,27	18	1,34
66,75 (sc*)	97,96	7,19	87,48	\$73,0 MM	\$5,7 MM	\$17,3 MM	5,16	1,24	18	1,34
12,5	18,25	6,32	11,45	\$16,0 MM	\$1,1	\$2,8 MM	4,47	1,16	20	1,14

sc*: Sistema completo

¹⁰⁸ Datos de energía obtenidos de PVSyst y datos económicos de elaboración propia.

En la Tabla 28, al comparar los resultados obtenidos con el nuevo módulo de 12.5 [kW] de potencia instalada, se ve que comparado con M1, la inversión es un 55% menor y el VAN un 69% menor, pero si se compara con la opción de instalar M4, se tiene una inversión menor, pero de igual forma se obtiene un VAN mayor.

7.5: Financiamiento

Existen varios tipos de financiamiento a la hora de realizar proyecto de ERNC en Chile, se tienen opciones de créditos, conocidos como créditos verdes, entregados por el banco estado¹⁰⁹, el cual permite financiar el proyecto de ERNC, existen opciones con empresas privadas, las cuales nos entregan financiamiento con crédito adaptado a las necesidades de cada individuo, por ejemplo, Proyecta energía¹¹⁰. También existen variadas opciones de cofinanciamiento entregados por el gobierno de Chile o la Agencia de sostenibilidad energética, se presentarán tres resumidas en la Tabla 29, aunque existen muchos más, enfocados principalmente para empresas y pequeñas empresas.

Tabla 29: Diferentes cofinanciamientos para las ERNC de pequeña escala.

Nombre beneficio	Monto cofinanciamiento máximo
Concurso Comunidad Energética ¹¹¹	\$5 MM [clp]
Inversión Energética Local ¹¹²	\$50 MM [clp]
Concurso de Implementación de Proyectos de Sostenibilidad Energética en MiPyMEs ¹¹³	\$3 MM [clp]

Aunque hay varias que no califican de forma directa con los proyectos, existen variadas formas de poder postular y beneficiar a la comunidad o la comuna con el proyecto de paneles fotovoltaicos. Lamentablemente, debido a que estos beneficios son de una naturaleza variable, ya que dependen mucho del resultado de la postulación y las condiciones de cada subsidio o crédito no es posible incluirlas al calcular los indicadores económicos.

Finalmente encontramos la iniciativa “Casa solar” que lanzo el gobierno durante este año 2020, la cual posee dos particularidades importantes, permite la participación de varios vecinos en el pago y en verse beneficiados por esta energía eléctrica y ofrece cofinanciamiento de hasta un 50% del valor total de la instalación en función de avalúo fiscal de la residencia, lo cual podemos ver con mayor claridad en la Tabla 30.

¹⁰⁹ (8)

¹¹⁰ (29)

¹¹¹ (3)

¹¹² (4)

¹¹³ (40)

Tabla 30: Se presentan los valores de cofinanciamiento según el rango de valor del AF.¹¹⁴

Avalúo Fiscal (AF) en UF	Avalúo Fiscal (AF) en clp	% Cofinanciamiento
UF 0<AF≤UF 1.000	0<AF≤\$28.712.630	50%
UF 1.000<AF≤UF 1.333	\$28.712.630<AF≤\$38.273.936	45%
UF 1.333<AF≤UF 1.667	\$38.273.936<AF≤\$47.863.954	40%
UF 1.667<AF≤UF 2.000	\$47.863.954<AF≤\$57.425.260	35%
UF 2.000<AF≤UF 2.333	\$57.425.260<AF≤\$66.986.566	30%
UF 2.333<AF≤UF 2.667	\$66.986.566<AF≤\$76.576.584	25%
UF 2.667<AF≤UF 3.000	\$76.576.584<AF≤\$86.137.890	20%
AF>UF 3.000	AF>\$86.137.890	0%

Aunque las residencias estudiadas no califican para optar por un cofinanciamiento, igualmente se pueden ver beneficiados por la iniciativa, debido a que en esta se toman todas las cotizaciones de una comuna o zonas cercanas, San José de Maipo para el caso de estudio, y realizan una licitación pública de todos los proyectos de la comuna (o varias comunas), esto obligando a que las empresas por motivos de competitividad y que ya no es solamente un proyecto, si no, varios proyectos residenciales, reduzcan sus precios, permitiendo que el cliente puede obtener valores mucho más bajos que los que conseguiría si cotizase como persona natural con un solo proyecto. Es importante destacar que en la propia página de casa solar, se menciona que el descuento promedio sobre los precios obtenidos a través de las licitaciones es de alrededor del 20%¹¹⁵ comparado a cotizaciones de personas naturales.

¹¹⁴ (9)

¹¹⁵ (66)

Capítulo 8: Conclusión.

Los requerimientos y restricciones presentados por el cliente y la normativa solamente limitan la potencia máxima a instalar, debido al espacio disponible, fuera de estas limitaciones, la ley y la normativa es bastante flexible con las generadoras residenciales, permitiéndole la conexión al sistema casi bajo cualquier condición, pero todo esto a costa del interesado.

Actualmente la energía fotovoltaica sigue tendiendo un alto valor de mercado, esto cuando se analiza del punto de vista residencial, ya que como se pudo observar en la Figura 39, este valor es menor cuando se habla de grandes generadoras, de 100 [MW] de potencia instalada o si se analiza el caso nacional, en la Figura 37, se observan precios de escala residencial que varían desde los 1.923 [USD/kW] hasta 1.367 [USD/kW] (considerando una potencia máxima de 100 [kW]), comparado con el caso de los proyectos de generación de gran escala, donde los valores que pueden alcanzar son cercanos a los 740 [USD/kW], lo que presenta un problema de economía de escala, ya que para una residencia aumentar en 1 [kW] de potencia instalada la obliga a sumar el doble de lo que le podría costar a una gran generadora aumentar 1 [kW].

Es importante considerar el efecto que pueden producir los elementos seleccionados como referencias a la hora de proyectar la generación y los diferentes cálculos económicos del proyecto, gracias a que el programa PVSyst posee una base de datos con diferentes paneles Fv, inversores, baterías e inversores cargadores es posible realizar distintas pruebas cambiando estos componentes, lo cual, para el caso de los inversores por ejemplo pueden producir diferencias de hasta un 5% anual en los resultados de energía consumida y excedente. Realizando pruebas similares para el caso de los paneles fotovoltaicos, se vuelve un punto importante de variación, donde seleccionar un panel de menor potencia es capaz de afectar los resultados obtenidos en la energía generada durante el año en gran medida. Por esto siempre es importante tener en consideración el mercado actual y escoger componentes que sea posible encontrar en el mercado o que sean similares a estos. Cabe destacar que en este documento se encuentran variadas aproximaciones, los precios finales pueden variar mucho dependiendo de los componentes a utilizar.

No existen indicaciones ni motivos técnicos contra la instalación del sistema fotovoltaico, fuera de lo ya presentado, como no considerar M3. Para el cliente, las funciones que este debe realizar son el mantenimiento y limpieza de los paneles, en caso de una falla muy grave, deberá contratar una empresa externa especializada en el mantenimiento y arreglo de paneles o inversores intentando aprovechar las largas garantías de los componentes.

Con lo expuesto en la Tabla 28, la toma de decisión se limita solamente a escoger el proyecto con mejor rendimiento económico, para este caso, las 3 mejores opciones son, la construcción del módulo 1, la construcción del sistema completo (M1+M2+M4) y por

último la construcción del módulo 4 con una potencia instalada de 12,5 [kW]. Si se comparan estas tres opciones con el resto, se nota que son las mejores hablando de indicadores económicos, pero si se comparan con algún proyecto externo, los resultados obtenidos se escalan de mejor forma, esto debido a que los proyectos tienen una vida útil de 25 años y un retorno de entre 18-20 años de la inversión, inversiones que para una persona natural son altísimas, entre los 15\$-73\$ millones de pesos dependiendo de la opción escogida.

Es necesario entender que los proyectos estrictamente hablando, si producen beneficios claros, en el mejor de los casos estudiados, M1, por cada peso que se invierte se recupera 1,27 pesos considerando una tasa de interés de 3% y una tasa interna de retorno (TIR) de 5,41%, al comparar este valor con la tasa interna de retorno de un depósito a plazo de 1,44%¹¹⁶ o la inflación del año 2020 de un 3%¹¹⁷, se observa que la inversión en M1 posee un rendimiento económico superior, pero si comparamos este resultado con la inversión en un bien raíz, en otras palabras, realizar la compra de un bien raíz y pasado los 25 años se realiza la venta de este, se obtiene una tasa interna de retorno de un 7%¹¹⁸, sumado a que siempre se han reconocido como una inversión mucho más segura los bienes raíces, agregando la posibilidad de arrendarlos y tomando en cuenta que este rendimiento de un 7% es sobre la UF y no el valor en pesos, resultando en un rendimiento de quizás un 10% cuando se incluye la inflación de la propia UF.

Como recomendación general, se estima correcto postular a algún cofinanciamiento entregado por empresas o el gobierno, como los que se encuentra en la Tabla 29 del capítulo 7.5 o ingresar a la iniciativa “Casa solar” del gobierno, la cual permitiría obtener precios más bajos por cada kilo Watt de potencia instalada, sin reducir los beneficios obtenidos, en otras palabras lo indicadores económicos serían mucho más atractivos, pero todo esto depende de cómo se lleva a cabo esta licitación, por ende obtener una aproximación real es complejo sin participar directamente, pero aun así, como se explica en la sección de financiamiento en la Figura 37, el precio podría reducirse desde los 1.300 [USD/kW] a hasta unos 1.000 [USD/kW], reduciendo la inversión inicial en hasta un 30%, en la propia página de iniciativa casa solar, se habla de una posible caída del valor de la inversión de alrededor de un 20%. Los efectos de esto se pueden observar en la Tabla 31 con un análisis de sensibilidad para la inversión y en la Tabla 32 para un análisis de sensibilidad en el beneficio anual.

¹¹⁶ (55)

¹¹⁷ (57)

¹¹⁸ (58)

Tabla 31: Resultados del análisis de sensibilidad para la inversión de M1.

Inversión [clp]		TIR [%]	VAN [clp]
+30%	\$46 MM	2,81	\$-0,9 MM
+20%	\$42 MM	3,57	\$2,5 MM
+10%	\$38 MM	4,42	\$5,9 MM
0%	\$35 MM	5,41	\$9,4 MM
-10%	\$31 MM	6,57	\$12,8 MM
-20%	\$28 MM	7,95	\$16,2 MM
-30%	\$24 MM	9,66	\$19,7 MM

Tabla 32: Resultados del análisis de sensibilidad para los beneficios anuales de M1.

Beneficio anual [clp/año]		TIR [%]	VAN [clp]
-10%	\$2,55 MM	4,32	\$5 MM
-5%	\$2,69 MM	4,87	\$7,2 MM
0%	\$2,83 MM	5,41	\$9,4 MM
+5%	\$2,98 MM	5,94	\$11,5 MM
+10%	\$3,12 MM	6,46	\$13,7 MM

Se puede apreciar en la Tabla 31 y Tabla 32 que los proyectos fotovoltaicos de nivel residencial son sensibles a las variaciones presentadas, ya sea en el beneficio anual como en la inversión inicial, pero principalmente es importante que se mencione el posible efecto sobre el VAN que podría tener la reducción de la inversión en un 20%, lo que vuelve más atractivo el efecto provocado por la iniciativa casa solar.

Finalmente, es necesario acercar más a la realidad del cliente los valores obtenidos y pensar en que no cualquier persona natural es capaz de realizar una inversión de alrededor de \$35 MM [clp], por esto a la hora de considerar un proyecto realista o más cercano a la realidad de una persona natural, se estima apropiado pensar en inversiones de alrededor de \$10 MM. Considerando el efecto de casa solar, lo que terminaría reduciéndose a los proyectos con un máximo de aproximadamente 10 [kW] de potencia instalada, los cuales podrían terminar bajo el margen de los \$10 MM estipulado.

Bibliografía

1. Real Academia de Ingeniería. Real Academia de Ingeniería. [En línea] [Citado el: 17 de 02 de 2020.] <http://diccionario.raing.es/es/lema/azimut-solar>.
2. Gobierno de Chile. Ley 20.571. *REGULA EL PAGO DE LAS TARIFAS ELÉCTRICAS DE LAS GENERADORAS RESIDENCIALES*. [En línea] 22 de marzo de 2012. [Citado el: 21 de julio de 2020.] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1038211&buscar=20571>.
3. Agencia de Sostenibilidad Energética. [En línea] [Citado el: 21 de julio de 2020.] <https://www.agenciase.org/comunidad-energetica/>.
4. —. [En línea] [Citado el: 21 de julio de 2020.] <https://www.agenciase.org/iel/>.
5. Alibaba. [En línea] [Citado el: 30 de abril de 2020.] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Longi-solar-half-cell-solar-panel-62353335172.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.6e2439f1J4oXYU&s=p>.
6. —. [En línea] [Citado el: 21 de mayo de 2020.] https://www.alibaba.com/product-detail/High-efficiency-solar-panels-from-JA_62425999636.html?spm=a2700.md_es_ES.pronpeci14.5.2a633857pmxSOH.
7. Diario oficial. APRUEBA REGLAMENTO DE LA LEY N° 20.571. [En línea] 06 de 09 de 2014. [Citado el: 28 de julio de 2020.] https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2017/08/reglamento_ds_71.pdf.
8. Banco Estado. [En línea] [Citado el: 21 de julio de 2020.] https://www.bancoestado.cl/imagenes/_pequenas-empresas/productos/financiamiento/proyectos-eficiencia-energetica.asp.
9. Ministerio de Energía. Casa Solar. [En línea] [Citado el: 10 de noviembre de 2020.] <https://www.casasolar.cl/>.
10. CGE. [En línea] [Citado el: 15 de mayo de 2020.] https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2017/08/proceso_de_ley_20571.png.
11. CNE. [En línea] [Citado el: 15 de mayo de 2020.] <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/06/Norma-Te%CC%81cnica-Netbilling-2019.pdf>.
12. CSP Today. [En línea] [Citado el: 12 de mayo de 2020.] <http://es.csptoday.com/mercados-emergentes/%C2%BFdisco-stirling-en-dub%C3%A1i>.
13. Ecoinventos. ¿Cómo funcionan las células solares fotovoltaicas? [En línea] 4 de febrero de 2019. [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://ecoinventos.com/celulas-solares-fotovoltaicas/>.
14. —. Un nuevo panel solar que capta energía por sus dos caras aumenta un 25% la capacidad de generación energética. [En línea] 1 de mayo de 2017. [Citado el: 1 de mayo de 2020.] <https://ecoinventos.com/duomax-twin/>.
15. EcoInventos. La tecnología fotovoltaica de capa fina de GaAs alcanza una eficiencia récord del 28,9%. [En línea] 6 de julio de 2019. [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://ecoinventos.com/la-tecnologia-fotovoltaica-de-capa-fina-de-gaas-alcanza-una-eficiencia-record-del-289/>.

16. Ecopost. Un concentrador solar logra una eficiencia del 41,4%. [En línea] 4 de noviembre de 2018. [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://www.ecopost.info/un-concentrador-solar-logra-una-eficiencia-del-414/>.
17. Energy Trend. [En línea] [Citado el: 17 de febrero de 2020.] <https://www.energytrend.com/solar-price.html>.
18. Universidad de Chile. Explorador Solar. [En línea] [Citado el: 17 de junio de 2020.] <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/fotovoltaico>.
19. Infucop. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <http://www.infucop.cl/product/panel-fotovoltaico-150w>.
20. NAMA. Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV). [En línea] 12 de 2019. <https://autoconsumo.minenergia.cl/wp-content/uploads/2020/09/GIZ-Indice-de-precio-FV-2019.pdf>.
21. Ingenieria y Construcciones SAS. [En línea] [Citado el: 19 de febrero de 2020.] <https://www.hingenieria.com.co/que-es-un-sistema-de-seguimiento-solar/>.
22. InnovaQR. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://blogs.upm.es/innovaqr/asignatura/energias-renovables/paneles-fotovoltaicos-panel-de-celulas-fotovoltaicas-organicas/>.
23. Kit Solaire. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://kitsolaire-discount.com/es/produit-en-pack/560--panneau-solaire-160w-12v-monocristalin-souple-flexible-8414824007435.html>.
24. Gobierno de Chile. Ley 20.257. *Gobierno de Chile*. [En línea] 01 de 04 de 2008. [Citado el: 19 de febrero de 2020.] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=258171&idParte=8721943&idVersion=>.
25. —. LEY NÚM. 20.698. [En línea] 22 de 10 de 2013. [Citado el: 19 de febrero de 2020.]
26. —. LEY NÚM. 21.118. *Ley Chile*. [En línea] 17 de 11 de 2018. [Citado el: 19 de febrero de 2020.] <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1125560>.
27. Mercado libre. [En línea] [Citado el: 10 de junio de 2020.] https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-487277525-bateria-ciclo-profundo-100-ah-12v-agm-energia-solar-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=35f65a27-0706-4647-b1ae-3a16d07302d4.
28. National Renewable Energy Laboratory. NREL. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
29. Proyecta Energía. ¿Como financiar la instalación de tus paneles solares en Chile? [En línea] 24 de febrero de 2020. [Citado el: 21 de julio de 2020.] <https://www.proyectaenergia.cl/como-financiar-la-instalacion-de-tus-paneles-solares-en-chile/>.
30. Gobierno de España. PSA. [En línea] [Citado el: 12 de mayo de 2020.] <https://www.psa.es/es/instalaciones/fresnel/fresdemo.php>.

31. PVEducation. Tandem Cells. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/tandem-cells>.
32. Gobierno de Chile. RESOLUCION EXENTA N°439. [En línea] 19 de junio de 2020. [Citado el: 20 de noviembre de 2020.]
33. Sodimac. [En línea] [Citado el: 05 de julio de 2020.] <https://www.sodimac.cl>.
34. Solarshop. [En línea] [Citado el: 01 de agosto de 2020.] http://www.solarshop.cl/product.php?id_product=434.
35. Sunfields. ¿Cómo se construye un módulo fotovoltaico? – Laminación, curado y enmarcado. [En línea] [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-laminacion-curado-y-enmarcado/>.
36. CGE. Tarifas Suministro CGE Enero 2021. [En línea] 01 de 01 de 2021. [Citado el: 01 de enero de 2021.] <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2021/01/Tarifas-Suministro-CGE-Enero-2021.pdf>.
37. Tritec. TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS. [En línea] 18 de agosto de 2017. [Citado el: 18 de febrero de 2020.] <https://www.tritec-intervento.cl/productostritec/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>.
38. NREL. U.S. Solar Photovoltaic System Cost. [En línea] 11 de 2018. [Citado el: 19 de julio de 2020.] <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72399.pdf>.
39. Wikipedia. Energía termosolar de concentración. [En línea] [Citado el: 12 de mayo de 2020.] https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_termosolar_de_concentraci%C3%B3n.
40. Agencia de Sostenibilidad Energética. Agencia de Sostenibilidad Energética. [En línea] [Citado el: 21 de julio de 2020.] <https://www.agenciase.org/que-es-el-concurso-de-implementacion-de-proyectos-de-sostenibilidad-energetica-en-mipymes/>.
41. Photovoltaic Geographical information system. PVGIS. [En línea] [Citado el: 17 de febrero de 2021.] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#.
42. Universidad de Chile. Explorador Solar. *Manual del usuario*. [En línea] 2016. [Citado el: 22 de febrero de 2021.] http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual_Explorador_Solar.pdf.
43. Electricidad. Revista electricidad. [En línea] 07 de Junio de 2019. [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <https://www.revistaei.cl/reportajes/concentracion-solar-de-potencia-lidera-proyectos-de-energia-solar-termica/#>.
44. La energía solar. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <https://www.laenergiasolar.org/energia-termica-solar/colector-cilindro-parabolico/>.
45. La energía solar. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <https://www.laenergiasolar.org/energia-termica-solar/fresnel-termosolar/>.
46. SunEarthTools. SunEarthTools. [En línea] [Citado el: 17 de febrero de 2020.] https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php.
47. Ayllu Solar. Manual sobre instalaciones. *de plantas fotovoltaicas*. [En línea] Mayo de 2018. [Citado el: 22 de Abril de 2021.] https://ayllusolar.cl/wp-content/uploads/2018/05/manual_instalaciones_fotovoltaicas.pdf.

48. Pelayo López, Jorge Arturo, y otros. Dialnet. [En línea] Diciembre de 2017. [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6332907.pdf>.
49. *Comparativa costo-beneficio de sistema fotovoltaico fijo y con seguidor solar*. Gutiérrez Villegas, Juan Carlos, y otros. 7, s.l. : Revista de Ingeniería Innovativa, 2018, Vol. 2.
50. Sitio solar. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>.
51. Damia solar. [En línea] 25 de Mayo de 2019. [Citado el: 22 de Abril de 2021.] https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/cual-es-la-vida-util-de-los-paneles-solares_1#:~:text=Su%20esperanza%20de%20vida%20es,degradaci%C3%B3n%20de%20sus%20c%C3%A9lulas%20fotovoltaicas..
52. Insa, Jorge. Monsolar. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2021.] <https://www.monsolar.com/blog/calcular-la-separacion-entre-filas-de-placas-solares-para-evitar-sombras/>.
53. Alonso Lorenzo, José Alfonso. SunField. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2021.] https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/#Que_datos_son_necesarios_para_calcular_una_instalacion_fotovoltaica.
54. Viñuela Olave, Vicente y Núñez Fuentes, Ignacio. Evolución de Costos ERNC. [En línea] Junio de 2012. [Citado el: 22 de Abril de 2021.] [https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C._Foto.html#:~:text=Bloomberg%2C%202010\).-](https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C._Foto.html#:~:text=Bloomberg%2C%202010).-)
 ,Los%20costos%20de%20operaci%C3%B3n%20y%20mantenimiento%20de%20sistemas%20fotovoltaicos%20de,IEA%2C%202010c)..
55. Banco Internacional. [En línea] [Citado el: 26 de Abril de 2021.] <https://www.bancointernacional.cl/simulador-dap>.
56. Banco Estado. [En línea] [Citado el: 26 de Abril de 2021.] <https://www.bancoestado.cl/bancoestado/simulaciones/DepositoPlazo/Resultados.asp>.
57. Servicio de impuestos internos. [En línea] [Citado el: 26 de Abril de 2021.] https://www.sii.cl/valores_y_fechas/utm/utm2020.htm.
58. Vergara Perucich , Francisco y Aguirre Núñez, Carlos . Ciper Chile. [En línea] 12 de Julio de 2019. [Citado el: 27 de Abril de 2021.] <https://www.ciperchile.cl/2019/07/12/viviendas-a-precios-demenciales-causas-y-responsables/>.
59. Instituto nacional de normalizacion . vdocuments. [En línea] Noviembre de 2010. [Citado el: 27 de Abril de 2021.] <https://vdocuments.site/nch-431-2010-cargas-de-nievepdf.html>.
60. Germán Cordero, Raúl . Sunfields. [En línea] [Citado el: 28 de Abril de 2021.] <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/tipos/>.

61. Electricidad. [En línea] [Citado el: 28 de Abril de 2021.] <https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/paneles-bifaciales-el-futuro-de-los-proyectos-solares/#>.
62. Hernández, Ricardo. CCEEA. [En línea] 2017. [Citado el: 28 de Abril de 2021.] <https://ccea.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/celdas-fotovoltaicas-organicas>.
63. Ecoinventos. [En línea] 6 de Julio de 2019. [Citado el: 28 de Abril de 2021.] <https://ecoinventos.com/la-tecnologia-fotovoltaica-de-capa-fina-de-gaas-alcanza-una-eficiencia-record-del-289/>.
64. Honsberg, Christiana y Bowden, Stuart. PvEducation. [En línea] 2019. [Citado el: 28 de Abril de 2021.] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/introduction>.
65. Punto solar. [En línea] [Citado el: 19 de Mayo de 2021.] <https://puntosolar.cl/index.php/categoria-producto/inversores-on-grid/>.
66. Ministerio de energía. Casa solar. [En línea] [Citado el: 25 de agosto de 2021.] <https://www.casasolar.cl>.
67. Electricidad. Electricidad la revista energética de Chile. [En línea] 04 de septiembre de 2019. [Citado el: 03 de agosto de 2021.] <https://www.revistaei.cl/2019/09/04/con-todo-el-potencial-de-energia-solar-de-chile-se-podria-abastecer-60-veces-el-consumo-del-pais-y-el-20-del-mundo/#>.
68. Pasten, Cesar. Scielo. [En línea] 18 de mayo de 2012. [Citado el: 3 de agosto de 2021.] <https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n11/art03.pdf>.
69. Endesa. [En línea] [Citado el: 02 de agosto de 2021.] <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/como-se-genera-electricidad>.
70. Deloitte. [En línea] agosto de 2016. [Citado el: 03 de agosto de 2021.] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cl/Documents/energy-resources/cl-er-estudio-energía-chile-parte3.pdf>.
71. ENEL. [En línea] [Citado el: 03 de agosto de 2021.] <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables>.
72. Ministerio de energía. [En línea] [Citado el: 03 de agosto de 2021.] <https://energia.gob.cl/educacion/que-son-las-energias-renovables>.

Anexos

Tipos de Celdas fotovoltaicas

IV.- Flexibles: método de fabricación de celdas, que utiliza las mismas celdas de silicio ya mencionadas, pero aplicando diferentes técnicas, le dan una alta flexibilidad, conservando los niveles de eficiencia propio de la celda original, por ende, su eficiencia puede variar entre el 7% de las celdas amorfas, hasta un 20% de las celdas monocristalinas. Son más caras que sus contrapartes originales, pero gracias a su alta flexibilidad y ligero peso, poseen una buena cantidad de usos, permitiendo colocarse en superficies curvas sin la necesidad de colocar una estructura compleja o ser utilizadas sobre vehículos, como los vehículos a energía solar, que gracias a que son ligeras y delgadas, se facilita el transporte de estas mismas.¹¹⁹



Figura 40: Panel solar de celda monocristalina flexible.¹²⁰

V.- Paneles solares bifaciales: básicamente es un panel solar de silicio monocristalino o policristalino, el cual tiene la capacidad de aprovechar la parte trasera del panel, utilizando las mismas celdas, lo cual permite aprovechar parte de la energía reflejada, la cual rebota sobre otras superficies e impacta sobre la parte trasera del panel. Se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, en el desierto de atacama, puede alcanzar eficiencias de hasta un 40%, aunque en condiciones más comunes, esto solo aumenta a un 25% la eficiencia original del panel. Su vida útil es idéntica a la de los paneles monocristalinos, 25 años.¹²¹

¹¹⁹ (60)

¹²⁰ (23)

¹²¹ (61)



Figura 41: Panel solar bifacial para celdas monocristalinas.¹²²

VI.- Orgánicas: celdas, que como su nombre lo indica, son fabricadas a partir de materiales orgánicos, poseen características similares a las celdas flexibles, pero se diferencian en el material de fabricación, ya que no poseen silicio. Estas se dividen en tres grupos, moleculares, de polímeros orgánicos e híbridas, donde las de polímeros orgánicos son las más utilizadas, ya que permiten la fabricación en masa y están basados en un sustrato plástico. Poseen eficiencias entre un 3% a un 11%, poseen las mismas ventajas de una celda flexible, sumado a que, gracias a los materiales de producción, estas son biodegradables, ventaja muy importante hoy en día, pero por este mismo motivo, su vida útil es muy reducida comparada con las fabricadas a partir de silicio. Aunque se ha desarrollado celdas solares orgánicas con eficiencias de 26.6% continúa siendo un problema los costos de fabricación y la baja vida útil de estas celdas.¹²³

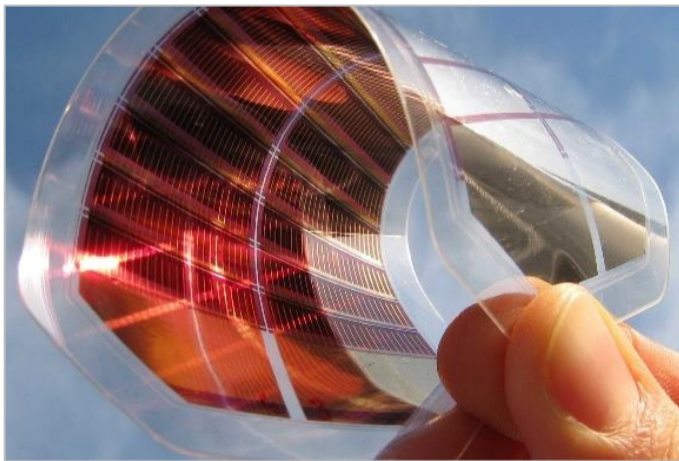


Figura 42: Panel fotovoltaico de celdas orgánicas.¹²⁴

VII.- Arseniuro de galio (GaAs): Celdas poco utilizadas, debido a un alto costo de fabricación y uso de materiales como Galio y Arsénico. Poseen una de las eficiencias más

¹²² (14)

¹²³ (62)

¹²⁴ (22)

altas, entre un 25% a un 30%, generalmente utilizadas en la exploración espacial, gracias a su alta eficiencia.¹²⁵

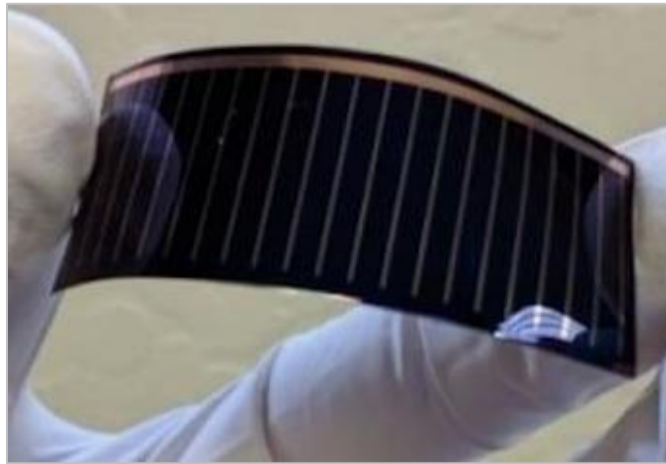


Figura 43: Paneles fotovoltaicos de celdas GaAs.¹²⁶

VIII.- Tándem o Multi junction: Son celdas fotovoltaicas de varias capas, que aprovechan las propiedades de diferentes tipos de materiales o celdas para obtener la mayor eficiencia posible. Se coloca una primera celda fotovoltaica, la cual absorbe la radiación solar de frecuencias altas, luego se coloca una segunda celda, que utiliza radiación de menor frecuencia, esto se puede seguir hasta obtener una celda de hasta 4 capas, donde cada una de estas capas aprovecha partes diferentes del espectro de la radiación solar. Gracias a esta técnica de armado, se logra aumentar la eficiencia de las celdas, alcanzando valores cercanos al 46%, esta técnica se utiliza con diferentes tipos de celdas, ya sean de cristal de silicio, GaAs u orgánicas. Lamentablemente, por la dificultad que tiene la fabricación de estas celdas y el elevado costo que esto conlleva, no son utilizadas de forma comercial, solo en laboratorio para investigación y situaciones muy particulares como algunos sistemas de concentración solar.¹²⁷

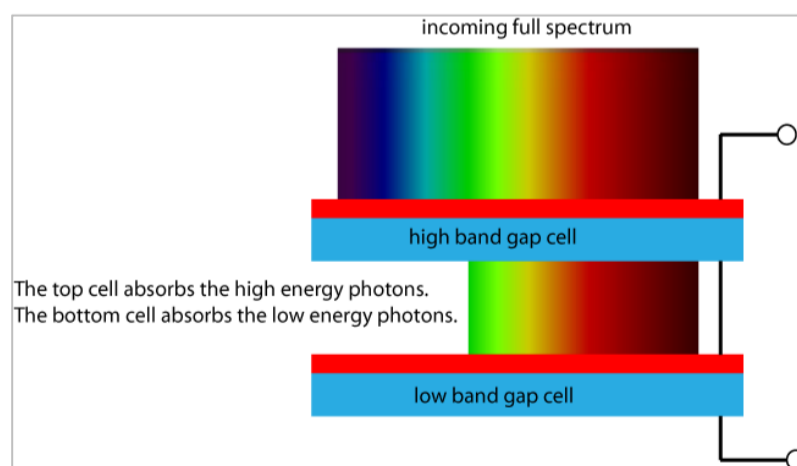


Figura 44: Se presentan las diferentes capas de un arreglo tándem trabajando en diferentes espectros.¹²⁸

¹²⁵ (63)

¹²⁶ (15)

¹²⁷ (64)

¹²⁸ (31)

La Figura 45 presenta la evolución de las distintas celdas fotovoltaicas desde el año 1975 aproximadamente y como a cambiado la eficiencia de estas con el pasar de los años.

Tablas con fracciones de consumo

En la Tabla 33 se presentan los porcentajes de energía consumida en las residencias desde un sistema fotovoltaico considerando cada módulo por separado y el sistema completo. Para las Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36, se presenta la energía generada por cada módulo en cada mes y el total anual, de la misma forma se incluye cuanto de esta se inyecta al sistema interconectado como excedentes y cuanto es consumida en las distintas residencias.

Tabla 33: Se presentan las diferentes fracciones de la energía consumida que provienen del sistema Fv para M1, M2 y M4, cada uno por sí solo y la suma de todos

Mes	Porcentaje de consumo del FV %			
	M1	M2	M4	M1+M2+M4
Enero	59,6	56,6	56,8	63,2
Febrero	57,5	55,1	55,4	61,3
Marzo	54,5	51,9	52,3	56,3
Abril	51,6	49,2	49,9	52,5
Mayo	44,3	40,0	40,6	46,7
Junio	43,9	38,3	39,4	46,6
Julio	45,4	41,3	42,0	47,5
Agosto	49,7	46,1	47,1	51,1
Septiembre	51,7	48,7	49,3	52,7
Octubre	53,5	51,5	51,7	54,7
Noviembre	55,8	54,4	54,6	57,5
Diciembre	57,5	54,9	55,2	60,5
Promedio	52,1	49,0	49,5	54,2

Tabla 34: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de M1.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	5,75	0,67	4,91
Febrero	4,90	0,59	4,18
Marzo	4,48	0,61	3,74
Abril	3,29	0,56	2,63
Mayo	2,46	0,50	1,89
Junio	1,84	0,48	1,31
Julio	2,33	0,51	1,75
Agosto	2,82	0,56	2,18
Septiembre	3,69	0,56	3,02
Octubre	4,67	0,60	3,93
Noviembre	5,39	0,61	4,62
Diciembre	5,73	0,65	4,91
Total	47,33	6,91	39,07

Tabla 35: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de M2.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	2,80	0,64	2,04
Febrero	2,41	0,56	1,75
Marzo	2,24	0,59	1,56
Abril	1,66	0,54	1,06
Mayo	1,26	0,45	0,75
Junio	0,95	0,42	0,48
Julio	1,20	0,47	0,67
Agosto	1,44	0,52	0,85
Septiembre	1,85	0,53	1,24
Octubre	2,30	0,58	1,63
Noviembre	2,63	0,59	1,94
Diciembre	2,79	0,62	2,05
Total	23,53	6,50	16,03

Tabla 36: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema Fv de todos los módulos sumados.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	11,62	0,71	10,52
Febrero	10,04	0,62	9,08
Marzo	9,32	0,63	8,38
Abril	6,94	0,57	6,14
Mayo	5,28	0,53	4,57
Junio	3,96	0,51	3,31
Julio	5,01	0,54	4,29
Agosto	6,00	0,58	5,21
Septiembre	7,70	0,57	6,87
Octubre	9,58	0,62	8,65
Noviembre	10,94	0,63	9,96
Diciembre	11,57	0,68	10,50
Total	97,96	7,19	87,48

Tablas con los beneficios asociados a los módulos fotovoltaicos

En las Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39 los beneficios monetarios obtenidos por los distintos módulos, considerando la energía que se deja de consumir de la red y la energía inyectada en esta.

Tabla 37: Tabla resumen con los beneficios estimados para M1.

Mes	Generación Fv [MWh]	Consumo Fv [MWh]	Beneficio consumo [clp]	Excedente Fv [MWh]	Beneficios excedentes [clp]
Enero	5,75	0,67	\$51.744	4,91	\$289.572
Febrero	4,90	0,59	\$45.045	4,18	\$246.325
Marzo	4,48	0,61	\$47.278	3,74	\$220.719
Abril	3,29	0,56	\$43.274	2,63	\$155.288
Mayo	2,46	0,50	\$38.423	1,89	\$111.274
Junio	1,84	0,48	\$36.883	1,31	\$77.231
Julio	2,33	0,51	\$39.424	1,75	\$103.132
Agosto	2,82	0,56	\$43.120	2,18	\$128.679
Septiembre	3,69	0,56	\$43.351	3,02	\$178.416
Octubre	4,67	0,60	\$46.431	3,93	\$231.752
Noviembre	5,39	0,61	\$46.816	4,62	\$272.698
Diciembre	5,73	0,65	\$49.896	4,91	\$289.749
Total anual	47,33	6,91	\$531.685	39,07	\$2.304.835

Tabla 38: Tabla resumen con los beneficios estimados para M2.

Mes	Generación Fv [MWh]	Consumo Fv [MWh]	Beneficio consumo [clp]	Excedente Fv [MWh]	Beneficios excedentes [clp]
Enero	2,80	0,64	\$49.126	2,04	\$120.596
Febrero	2,41	0,56	\$43.197	1,75	\$103.427
Marzo	2,24	0,59	\$45.045	1,56	\$92.040
Abril	1,66	0,54	\$41.272	1,06	\$62.245
Mayo	1,26	0,45	\$34.727	0,75	\$44.368
Junio	0,95	0,42	\$32.109	0,48	\$28.438
Julio	1,20	0,47	\$35.882	0,67	\$39.766
Agosto	1,44	0,52	\$40.040	0,85	\$50.209
Septiembre	1,85	0,53	\$40.887	1,24	\$73.042
Octubre	2,30	0,58	\$44.660	1,63	\$95.993
Noviembre	2,63	0,59	\$45.661	1,94	\$114.342
Diciembre	2,79	0,62	\$47.663	2,05	\$121.068
Total anual	23,53	6,50	\$500.269	16,03	\$945.534

Tabla 39: Tabla resumen con los beneficios estimados para sistema completo.

Mes	Generación Fv [MWh]	Consumo Fv [MWh]	Beneficio consumo [clp]	Excedente Fv [MWh]	Beneficios excedentes [clp]
Enero	11,62	0,71	\$54.824	10,52	\$620.680
Febrero	10,04	0,62	\$48.048	9,08	\$535.720
Marzo	9,32	0,63	\$48.818	8,38	\$494.420
Abril	6,94	0,57	\$44.044	6,14	\$362.260
Mayo	5,28	0,53	\$40.502	4,57	\$269.630
Junio	3,96	0,51	\$39.116	3,31	\$195.290
Julio	5,01	0,54	\$41.195	4,29	\$253.110
Agosto	6,00	0,58	\$44.352	5,21	\$307.390
Septiembre	7,70	0,57	\$44.198	6,87	\$405.330
Octubre	9,58	0,62	\$47.432	8,65	\$510.350
Noviembre	10,94	0,63	\$48.279	9,96	\$587.640
Diciembre	11,57	0,68	\$52.514	10,50	\$619.500
Total anual	97,96	7,19	\$553.322	87,48	\$5.161.320

Tablas con datos importante de los sistemas con batería.

En las Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43 se presentan los resultados para los módulos considerando el uso de baterías en el sistema.

Tabla 40: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M1 con baterías.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	5,75	1,13	4,35
Febrero	4,90	1,02	3,65
Marzo	4,48	1,13	3,13
Abril	3,29	1,09	2,00
Mayo	2,46	1,11	1,19
Junio	1,84	1,05	0,59
Julio	2,33	1,09	1,05
Agosto	2,82	1,13	1,48
Septiembre	3,69	1,09	2,39
Octubre	4,67	1,13	3,31
Noviembre	5,39	1,09	4,04
Diciembre	5,73	1,13	4,34
Total	47,33	13,17	31,53

Tabla 41: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M2 con baterías.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	2,80	1,13	1,45
Febrero	2,41	1,02	1,20
Marzo	2,24	1,11	0,96
Abril	1,66	1,08	0,37
Mayo	1,26	0,96	0,19
Junio	0,95	0,78	0,02
Julio	1,20	0,92	0,10
Agosto	1,44	1,02	0,22
Septiembre	1,85	1,09	0,58
Octubre	2,30	1,13	0,98
Noviembre	2,63	1,09	1,32
Diciembre	2,79	1,12	1,45
Total	23,53	12,43	8,82

Tabla 42: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico de M4 con baterías.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	3,08	1,13	1,74
Febrero	2,73	1,02	1,52
Marzo	2,61	1,11	1,33
Abril	2,00	1,09	0,71
Mayo	1,57	1,00	0,43
Junio	1,18	0,88	0,12
Julio	1,49	1,00	0,30
Agosto	1,74	1,07	0,48
Septiembre	2,17	1,09	0,90
Octubre	2,62	1,13	1,30
Noviembre	2,93	1,09	1,62
Diciembre	3,06	1,13	1,73
Total	27,16	12,74	12,19

Tabla 43: Energía consumida por las residencias y vendida como excedentes, de lo generado por el sistema fotovoltaico completo con baterías.

Mes	E. Generada [MWh]	E. Consumida [MWh]	E. Excedente [MWh]
Enero	11,62	1,13	10,01
Febrero	10,04	1,02	8,61
Marzo	9,32	1,13	7,79
Abril	6,94	1,09	5,52
Mayo	5,28	1,13	3,87
Junio	3,96	1,07	2,60
Julio	5,01	1,13	3,58
Agosto	6,00	1,13	4,55
Septiembre	7,70	1,09	6,26
Octubre	9,58	1,13	8,05
Noviembre	10,94	1,09	9,40
Diciembre	11,57	1,13	9,97
Total	97,96	13,25	80,21

Tabla resumen para los módulos de prueba.

Tabla 44: Resumen con los datos importantes para los módulos de prueba.¹³⁰

Sistema [Kw]	Inversión[clp]	E. generada [kWh/año]	E. consumida[kWh/año]	E. excedente[kWh/año]	B. Consumo [clp/año]	B. Excedente [clp/año]	B. total [clp/año]	VAN [clp]	TIR %	IR [-]	PRI [años]
2,2	\$3.744.540	3.259	2.969	137	\$231.605	\$8.125	\$239.731	\$63.564	3,16%	1,02	25
4,5	\$7.282.860	6.518	4.928	1.322	\$384.384	\$77.998	\$462.382	\$63.802	3,08%	1,01	23
8	\$11.195.260	11.733	5.879	5.620	\$458.562	\$331.580	\$790.142	\$1.322.682	4,11%	1,12	20
10,7	\$13.713.660	15.643	6.105	8.829	\$476.190	\$520.911	\$997.101	2.071.004	4,40%	1,16	20
12,5	\$15.960.060	18.251	6.318	11.451	\$492.804	\$675.609	\$1.168.413	\$2.533.372	4,47%	1,16	19
16	\$20.328.060	23.465	6.477	16.296	\$505.206	\$961.464	\$1.466.670	\$2.894.691	4,33%	1,15	20

¹³⁰ Datos de generación y consumo obtenido de PvSyst y cálculos económicos propios.

