



INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD DE TALCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

PROYECTO DE MEJORAMIENTO

EVALUACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA
SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ABASTECIMIENTO
DEL SISTEMA DE RIEGO EN AGROFRUTICOLA SAN
ANDRÉS DE CORDILLERILLA LTDA.

AUTOR:

PABLO ANDRÉS MUÑOZ ALARCÓN

PROFESOR TUTOR:

JORGE SANDOVAL

CURICÓ - CHILE

SEPTIEMBRE DE 2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi amiga, mi compañera, mi partner quien a lo largo de cinco años se transformó hace un mes en mi esposa la Señora Antonia Contreras Guajardo por estar siempre a mi lado acompañándome en gran parte de este periodo universitario, siendo de gran apoyo en momentos clave y ayudándome cuando podía hacerlo, por ser mi aliento cuando estaba por darme por vencido.

En este instante de mi vida quiero detenerme para dedicarle y agradecerle por haberme dado la vida, por haberme formado, haberme dado los principios la Señora Janett Alarcón Aliaga, mi madre, quien a pesar de todos los obstáculos que la vida nos colocó como familia supo tener la inteligencia, la astucia para poder superar todas las contingencias que la vida pone a una familia.

A otra persona que deseo mencionar y destacar en esta parte de mi vida, es al señor Antonio Contreras Quinteros por haberme acompañado y recomendado en la búsqueda de mi práctica y por sus valiosos consejos para mi vida profesional.

Y por último quiero agradecer al señor Jorge Sandoval Manríquez, por haber dedicado tiempos en horarios y días excepcionales de trabajo, a quien logré escuchar y recepcionar la idea para mi proyecto que hoy finalizo como etapa de este proceso de título profesional ya que esto me ayudó a crecer y apasionarme por mi carrera.

RESUMEN EJECUTIVO

Como primera etapa, se realiza un análisis de la situación actual de la empresa, obteniendo información clave sobre el consumo energético y emisiones de CO₂. En base a esta situación actual se genera un plan de trabajo, regido por una metodología seleccionada.

La segunda etapa recopila información técnica de la empresa, correspondiente a espacio disponible para el diseño de la planta fotovoltaica.

En la tercera etapa se desarrolla la configuración técnica de la planta fotovoltaica, esto es, determinar zona factible con las restricciones correspondientes, para lograr un diseño óptimo de la planta, definiendo los equipos y componentes necesarios para su correcta operación.

Como última etapa se realiza la evaluación del impacto económico y ambiental de la planta fotovoltaica. Comenzando con la parte económica del proyecto, se tiene una inversión de USD32.529, un ahorro de USD7.873 anual, un VAN de USD5.828, una TIR del 20,36%, todo esto con una TREMA del 16%, con un periodo de recuperación durante el año diez. Continuando con la parte ambiental, el proyecto lograría una disminución de emisión de CO₂ de 19.535kg(eq) por año.

Pablo Andrés Muñoz Alarcón (pabmunoz13@alumnos.utalca.cl)

Estudiante Ingeniería Civil Industrial - Universidad de Talca

Julio de 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	6
1.1 Lugar de aplicación.....	7
1.2 Antecedentes de la empresa	8
1.3 Oportunidad	9
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos específicos	10
1.5 Resultados tangibles esperados.....	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA	12
2.1 Marco teórico.....	13
2.1.1 Energía solar	13
2.1.2 Tipos de radiación	14
2.1.3 Captación de energía	15
2.1.4 Sistemas fotovoltaicos	16
2.1.5 Aspectos técnicos de planta fotovoltaica.....	18
2.1.6 Herramientas de análisis.....	20
2.2 Marco metodológico	22
2.2.1 Metodología PDCA	22
2.2.2 Metodología CAPDo	23
2.2.3 Metodología DMAIC	23
2.2.4 Evaluación de alternativas	24
2.2.5 Metodología para el análisis de oportunidades y medidas de Eficiencia Energética	25

2.2.6	Preparación y evaluación de proyectos	26
2.2.7	Metodología.....	26
CAPÍTULO 3: DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL		28
3.1	Situación actual de la empresa.....	29
3.1.1	Consumo de energía eléctrica.....	29
3.1.2	Estudio técnico	30
3.2	Radiación solar	30
3.2.1	Explorador solar	31
3.3	Conclusiones del diagnóstico.....	32
CAPÍTULO 4: CONFIGURACIÓN TÉCNICA DE PLANTA FOTOVOLTAICA		33
4.1	Configuración de la planta fotovoltaica.....	34
4.1.1	Área factible	34
4.1.2	Tamaño de la planta fotovoltaica por rendimiento solar	35
4.1.3	Tamaño de la planta fotovoltaica por área factible.....	36
4.2	Selección del inversor	38
4.2.1	Marca del inversor	38
4.2.2	Potencia del inversor	41
4.2.3	Factibilidad técnica.....	42
4.2.4	Interconexión por inversor.....	44
4.3	Distribución de la planta fotovoltaica	45
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE IMPACTOS		47
5.1	Impacto económico.....	48
5.1.1	Análisis de sensibilidad	50
5.2	Impacto ambiental.....	51
CONCLUSIONES.....		53

Bibliografía..... 55

ANEXOS 59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ubicación Agrofrutícola..... 7

Ilustración 2: Ubicación oficina central..... 8

Ilustración 3: Energía solar térmica..... 13

Ilustración 4: Energía solar fotovoltaica..... 14

Ilustración 5: Tipos de radiación 15

Ilustración 6: Explorador recurso solar 16

Ilustración 7: Componentes para un sistema *On Grid*..... 17

Ilustración 8: Componentes para un sistema *Off Grid* 18

Ilustración 9: Tipos de paneles fotovoltaicos 18

Ilustración 10: Área disponible para diseño de planta fotovoltaica..... 30

Ilustración 11: Simulación solar con azimut 0° 35

Ilustración 12: Estructura de montaje 37

Ilustración 13: Mayores proveedores de inversores fotovoltaicos 39

Ilustración 14: Diseño 3D de planta fotovoltaica 45

Ilustración 15: Plano de conexión 46

Ilustración 16: Análisis estadístico de precios de sistemas fotovoltaicos comercializados en Chile 2020, sin IVA..... 48

Ilustración 17: Distribución de costos de proyectos fotovoltaicos por rango de potencia 49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Gasto mensual	10
Tabla 2: Importancia relativa entre criterios.....	24
Tabla 3: Comparación cuantitativa de los criterios definidos	25
Tabla 4: Evaluación de metodologías en base a los distintos criterios.....	25
Tabla 5: Consumo de kWh y su costo asociado	29
Tabla 6: Radiación solar durante el año 2021 en Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.	31
Tabla 7: Alternativas de paneles fotovoltaicos.....	36
Tabla 8: Características del panel solar seleccionado	37
Tabla 9: Cantidad de paneles y potencia total factible	38
Tabla 10: Criterios a evaluar según marca	40
Tabla 11: Matriz de ponderación de las marcas	41
Tabla 12: Costo por kW según inversor	42
Tabla 13: Inversor seleccionado	45
Tabla 14: Inversión de planta fotovoltaica	49
Tabla 15: Ahorro anual de planta FV	50
Tabla 16: Análisis de sensibilidad tasa de cambio	51
Tabla 17: Análisis de sensibilidad costos de mantenimiento	51
Tabla 18: Cálculo de reducción de emisiones de CO2.....	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Países con mayor participación solar en la generación de electricidad	59
Anexo 2: Área de sombra proyectada.....	60
Anexo 3: Análisis de importancia relativa del panel solar	60
Anexo 4: Matriz de ponderación del panel solar	61
Anexo 5: Comparación de metodologías según su factibilidad de aplicación	61
Anexo 6: Comparación de metodologías según su tiempo de aplicación	61
Anexo 7: Comparación de metodologías según su competencia	61
Anexo 8: Comparación de metodologías según su adaptación al cambio.....	62
Anexo 9: Análisis de importancia relativa de la marca	62
Anexo 10: Evaluación de inversores	62
Anexo 11: Ejemplo simulación de generación fotovoltaica inversor 8kW.....	63
Anexo 12: Selección de alternativa de inversor	63
Anexo 13: Costos de la planta fotovoltaica	63
Anexo 14: Aumento de tasa de cambio	64
Anexo 15: Disminución de tasa de cambio	64
Anexo 16: Aumento de costos de mantenimiento	64
Anexo 17: Disminución de costos de mantenimiento	64

GLOSARIO

ERNC: las Energías Renovables No Convencionales son todas aquellas fuentes de generación energética en las cuales no se incurre en el consumo, gasto o agotamiento de su fuente generadora. Entre estas fuentes de energías podemos mencionar a la energía hidráulica proveniente de la fuerza motriz del agua. La energía solar, capturada del sol mediante la radiación solar. La energía eólica, nutrida por la fuerza mecánica del viento, y la fuente mareomotriz, que se alimenta de la fuerza generadora del oleaje de los océanos (Solcor Chile, 2022).

MPPT: proviene de las siglas “*Maximum Power Point Tracker*”, lo que significa en español seguidor del punto de máxima potencia. Esto, unido a un inversor, consigue alcanzar un balance entre el voltaje y la corriente en aquellas placas que trabajan en su máxima potencia (ACFotovoltaica, 2021).

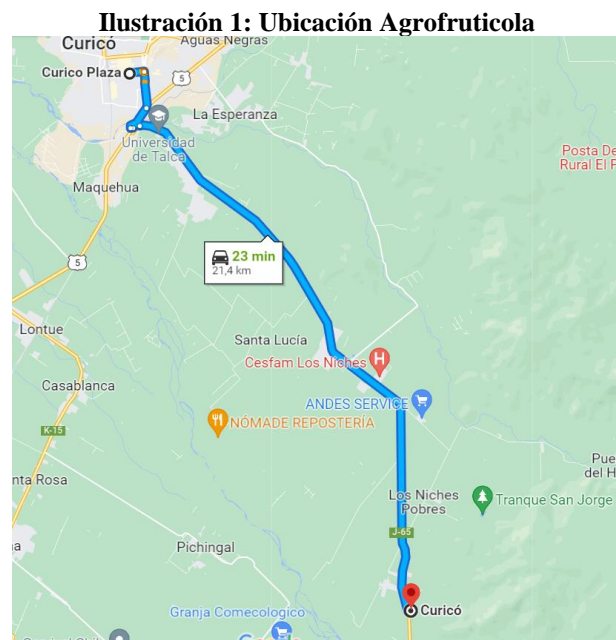
CNE: La Comisión Nacional de Energía (CNE) es un organismo público y descentralizado, con patrimonio propio y plena capacidad para adquirir y ejercer derechos y obligaciones, que se relaciona con el Presidente de la República por intermedio del Ministerio de Energía (CNE, s.f.).

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se da a conocer la empresa donde se realiza el presente proyecto de título, además de su ubicación, el rubro y su respectiva estructura organizacional, junto con ello, se contextualiza sobre la situación actual del consumo energético. Seguido de esto, se define la problemática del proyecto, se plantean los objetivos y los resultados tangibles esperados.

1.1 Lugar de aplicación

El presente proyecto de mejoramiento es realizado en Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA., empresa dedicada al cultivo y cosecha de manzanas. Como se puede observar en la Ilustración 1, esta empresa se encuentra ubicada a poco más de 20 km al suroeste de Curicó, cercana a *packings* y plantas procesadoras.



Fuente: elaboración propia en base a (Agrofrutícola San Andrés - Google Maps, s.f.)

Además, cuenta con una oficina central ubicada en Montt 345 (véase Ilustración 2).

Ilustración 2: Ubicación oficina central



Fuente: elaboración propia en base a (Google maps, s.f.)

1.2 Antecedentes de la empresa

Como se mencionó anteriormente, el proyecto se lleva a cabo en la empresa Agrofritícola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

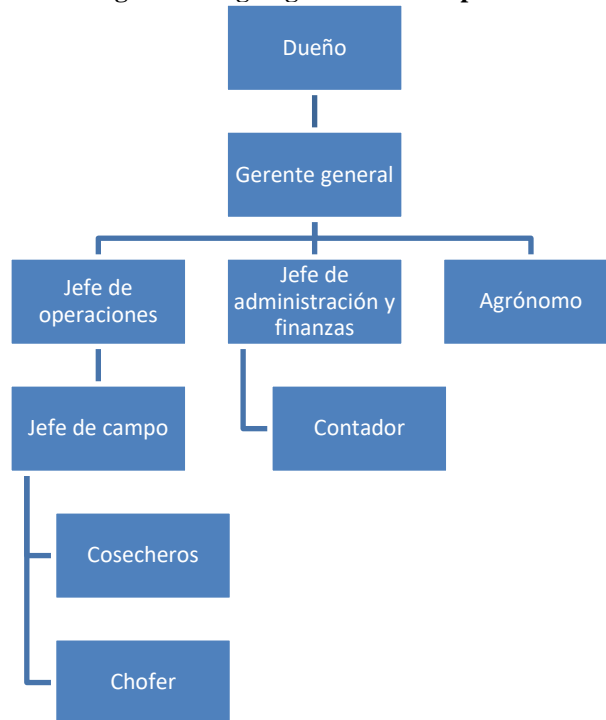
Los inicios de la compañía se remontan al año 2005, donde su dueño y fundador, teniendo en cuenta que Chile se estaba convirtiendo en uno de los principales países exportadores de esta fruta (ODEPA, 2011), y que poseía una basta cantidad de hectáreas, decide iniciar esta empresa familiar, cultivando los primeros manzanos.

A medida que pasaron los años, la empresa ha logrado cultivar manzanos de diversas variedades y de una alta calidad.

A inicios del 2018, la empresa inicia la cosecha de manzanas para la exportación, vendiendo su fruta a diversas empresas exportadoras, las cuales llevaban la fruta a ciertos *packings* para que dicha fruta sea sometida a proceso de selección, para poder separar la fruta que se lleva a exportación de la que se venderá dentro del país. Los clientes para la fruta nacional son mayormente Proveagro, Agrozzi y particulares. Además, su volumen de producción asciende a 2.207 toneladas esta temporada, con un volumen de ventas que ronda los 230 millones de pesos.

Al ser una empresa familiar, el organigrama es bastante pequeño, tal como se puede observar en la Figura 1. En él es posible evidenciar las distintas áreas de la organización y sus respectivas dependencias. Se destaca el área de administración y finanzas correspondiente al área donde se desarrolla el presente proyecto de título.

Figura 1: Organigrama de la empresa



Fuente: elaboración propia en base a Agrofrutícola.

1.3 Oportunidad

Como se mencionó en el comienzo del capítulo, con el transcurso de los años Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla ha acrecentado considerablemente la cantidad de hectáreas cultivadas -alrededor de 90 hectáreas-, por lo que su consumo energético también se ha visto en constante aumento, debido a que es necesario regar constantemente -y más aún en verano- manteniendo las bombas de riego encendidas por largos periodos de tiempo. En la última temporada de riego, que se extendió desde agosto 2021 hasta mayo 2022, se tiene un registro de consumo total de 50MWh, con un costo total asociado de \$6.781.465, que corresponde al consumo energético de las bombas de riego, el cual se puede observar en la Tabla 1.

Dado lo anterior, en este proyecto de mejoramiento se evaluará la opción tecnocómica para la instalación de una planta solar fotovoltaica, que a lo menos abastezca el requerimiento antes mencionado.

El consumo energético recién indicado, lleva asociado una emisión de un total de 19.535kgCO₂(eq) correspondiente a la emisión de gases de efecto invernadero asociados, ya que por cada MWh consumido se liberan 390,7 kg de CO₂ (Energía Abierta, 2021). Este valor de emisiones se anula en el caso de la instalación de los paneles fotovoltaicos para autoabastecimiento energético, debido a que se incorporaría una ERNC (Energías Renovables No Convencionales).

Tabla 1: Gasto mensual

Año	Mes	Consumo (kWh)
2021	Agosto	450
2021	Septiembre	1.350
2021	Octubre	3.000
2021	Noviembre	11.175
2021	Diciembre	9.675
2022	Enero	6.150
2022	Febrero	7.800
2022	Marzo	6.975
2022	Abril	2.550
2022	Mayo	300

Fuente: elaboración propia en base a datos proporcionados por Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

1.4 Objetivos

A continuación, se describen los objetivos del proyecto de mejoramiento.

1.4.1 Objetivo general

Generar propuestas para la evaluación tecno-económica de la instalación de una planta fotovoltaica que permita autoabastecimiento de energía eléctrica para Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA., aplicando herramientas de mejoramiento continuo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico para cuantificación del consumo energético actual de Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

- Diseñar planta fotovoltaica, teniendo en consideración las conclusiones del diagnóstico realizado, para evaluar su posible implementación en Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.
- Realizar la evaluación tecno-económica y ambiental para dimensionamiento de los beneficios que representa la ejecución del proyecto propuesto.

1.5 Resultados tangibles esperados

Dentro de los resultados tangibles esperados tras la realización del presente proyecto de título se encuentran:

- Informe con el diagnóstico actual de la empresa.
- Informe con la evaluación técnica del proyecto.
- Informe con la evaluación económica del proyecto.
- Informe con la evaluación ambiental del proyecto.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el modo en el cual se aborda el proyecto, mencionando los elementos teóricos y técnicos a utilizar, junto con la metodología de solución.

2.1 Marco teórico

Estudiar el marco teórico implica conocer los conceptos, temas y fundamentos influyentes a la hora de establecer la metodología que será utilizada durante el proyecto.

A continuación, se desarrollan los distintos conceptos que van de la mano con la energía fotovoltaica, junto con los distintos tipos de radiación que existen.

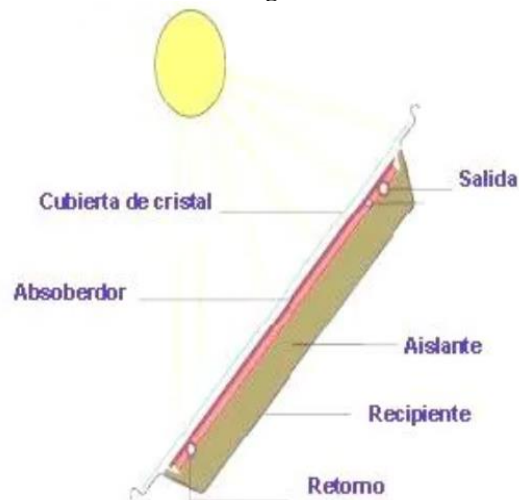
2.1.1 Energía solar

La energía solar es un tipo de energía renovable (llamada así debido a que proviene de una fuente natural e inagotable), la cual se obtiene mediante la radiación electromagnética del sol (Acciona, 2020). La energía solar fotovoltaica no emite sustancias nocivas ni contaminantes atmosféricos, los cuales pueden causar mucho daño al medio ambiente y a las personas.

Para generar energía eléctrica es necesario captar los rayos de sol, para lograr aquello hay distintas maneras, las cuales se detallan a continuación:

- a. **Energía solar térmica:** la radiación solar es captada mediante un captador solar (colector o placa solar) y el calor es transferido a un fluido. Dicho fluido calentado se suele utilizar de manera directa o indirecta (mediante intercambiador de calor) (Lorenzo, Energía solar térmica, 2015). En la Ilustración 3 se observa el esquema de la energía solar térmica.

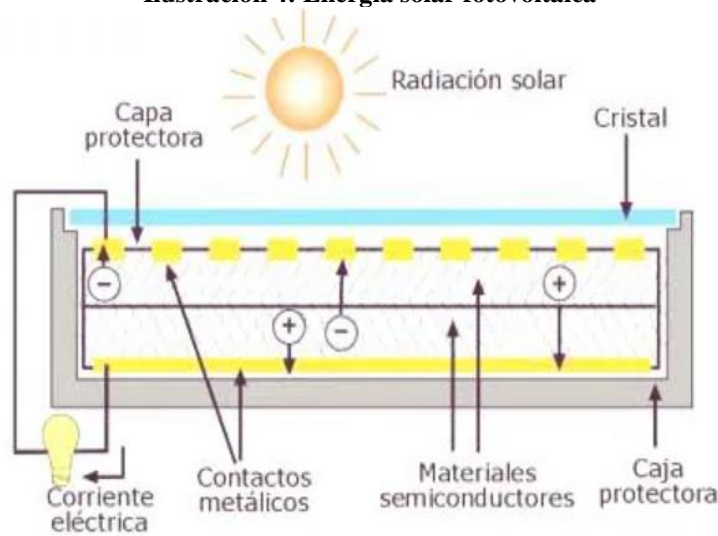
Ilustración 3: Energía solar térmica



Fuente: extraído de (Erenovable, 2021)

- b. Energía solar fotovoltaica:** consiste en transformar la energía solar en energía eléctrica utilizando células fotovoltaicas. Esto se logra haciendo incidir la luz sobre materiales semiconductores, así, el flujo de electrones generado dentro del material puede usarse para capturar energía eléctrica (Lorenzo, ¿En qué consiste el efecto fotovoltaico?, s.f.). En la Ilustración 4 se observa el esquema del funcionamiento de la energía solar fotovoltaica.

Ilustración 4: Energía solar fotovoltaica



Fuente: extraído de (Erenovable, 2021)

2.1.2 Tipos de radiación

La radiación solar se genera por una serie de reacciones de fusión nuclear producidas en el sol, y, como consecuencia, emite radiaciones electromagnéticas que llegan a la tierra. Esta radiación que recibe la superficie de la tierra se le denomina también irradiancia (Lorenzo, Radiación solar, s.f.).

Dicha radiación se clasifica de cuatro distintas maneras según las alteraciones que tenga al ingresar a la atmosfera, las cuales se observan en la Ilustración 5 y describen a continuación:

- I. Radiación directa:** es la radiación que llega a la superficie sin haber sufrido dispersión en su trayectoria a través de la atmósfera. Esto ocurre cuando el sol es totalmente visible (Lorenzo, Radiación solar, s.f.).
- II. Radiación difusa:** radiación que llega a la superficie después de sufrir múltiples desviaciones en su trayectoria al atravesar la atmósfera, o después de ser reflejada en múltiples direcciones por las superficies donde previamente haya incidido. En invierno la

radiación difusa es mucho mayor en porcentaje y en base anual, equivalente al 55% de la radiación global (Lorenzo, Radiación solar, s.f.).

III. Radiación global: se trata de la suma de la radiación directa y la radiación difusa (Lorenzo, Radiación solar, s.f.).

IV. Radiación de “albedo” o reflejada: parte de la radiación solar reflejada por la superficie. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben (Lorenzo, Radiación solar, s.f.).

Ilustración 5: Tipos de radiación



Fuente: extraído de (Lorenzo, Radiación solar, s.f.)

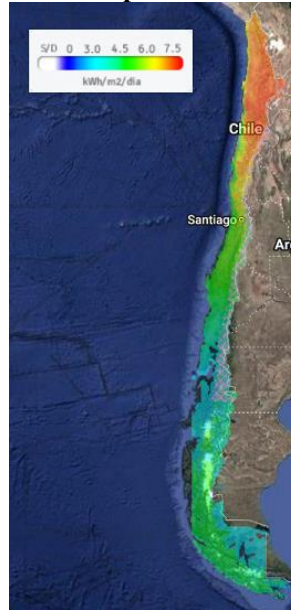
Por otra parte, no se puede controlar la intensidad con la que el flujo de energía entra por los paneles, aunque hoy en día la tecnología es capaz de captar una mayor cantidad de energía aun en días nublados.

2.1.3 Captación de energía

Chile se ha convertido en uno de los países más atractivos para obtener energía a partir de la radiación solar gracias a su amplio territorio (véase Anexo 1), siendo más influyente la parte norte del país, principalmente el desierto de Atacama y sus alrededores. Aunque la zona norte es la zona con mayor porcentaje de energía solar, la zona centro y la zona sur también pueden generar energía solar fotovoltaica.

Para lo anterior existe una plataforma llamada Explorador Solar, que contiene información más detallada sobre las características climáticas de diferentes lugares de forma rápida y sencilla. Para determinar el porcentaje de radiación en el territorio nacional, se cuenta con una escala ascendente, cuya medición se identifica por colores. En la Ilustración 6 se aprecia de mejor manera.

Ilustración 6: Explorador recurso solar



Fuente: (Ministerio de Energía, 2022)

Como se puede apreciar, a medida que se dirige al sur, la radiación se vuelve más débil tomando un color celeste. Al contrario que en el sur, mientras más al norte del país, se hace mucho más intensa, tomando un color rojo. En la zona central toma un color verde.

2.1.4 Sistemas fotovoltaicos

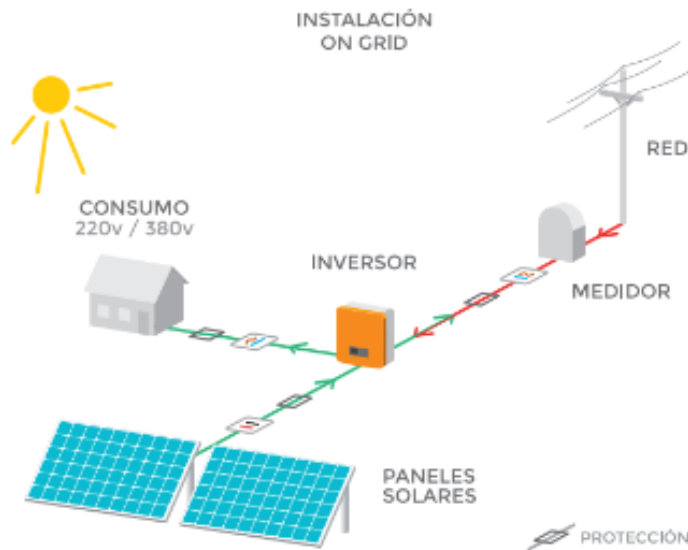
Un sistema fotovoltaico es el conjunto de varios equipos que permiten que la energía solar se convierta en energía eléctrica que pueda ser utilizada (Solarama, s.f.). Existen tres tipos de sistemas fotovoltaicos, en los cuales varían sus características según el lugar y su utilización. A continuación, se describen dos de estos sistemas:

- **Sistema fotovoltaico *On Grid* (conectados a la red):** este sistema depende directamente de la red eléctrica, por lo que siempre se requerirá de su servicio para el correcto funcionamiento de la instalación fotovoltaica. Esto quiere decir que el cliente podrá hacer

uso de la energía generada durante el día y cuando el sol se esconda se suministrará de la energía de la red (Solcor Chile, s.f.).

Este tipo de instalaciones se componen de cuatro elementos, paneles solares, inversores, un tablero de distribución y un medidor bidireccional, el cual permite medir la energía consumida y la energía generada por los paneles (véase Ilustración 7).

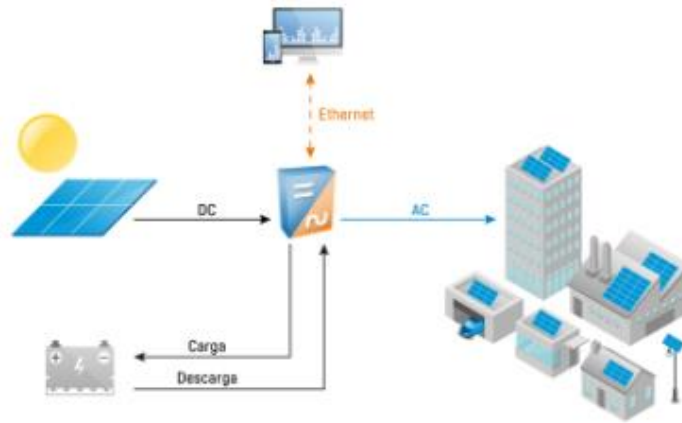
Ilustración 7: Componentes para un sistema *On Grid*



Fuente: (Atacama Solar Lab, s.f.)

- **Sistema fotovoltaico *Off Grid*:** este sistema suele usarse en sitios aislados donde no es posible acceder a una red pública, para ello es que se establece un punto de generación eléctrica con la instalación de paneles solares, de esta forma el cliente podrá auto consumir energía limpia de manera totalmente independiente en cualquier momento del día, aun cuando el sol ya se haya escondido. Esto es posible gracias a que este sistema incorpora baterías donde es almacenada toda la energía generada durante el día, por lo tanto, estos elementos deben tener la capacidad suficiente para cubrir un tiempo calculado de consumos, una vez que estas baterías hayan cumplido su ciclo, se deben ir cambiando periódicamente (Solcor Chile, s.f.). En la Ilustración 8 se pueden ver los componentes de este sistema.

Ilustración 8: Componentes para un sistema Off Grid



Fuente: (Atacama Solar Lab, s.f.)

2.1.5 Aspectos técnicos de planta fotovoltaica

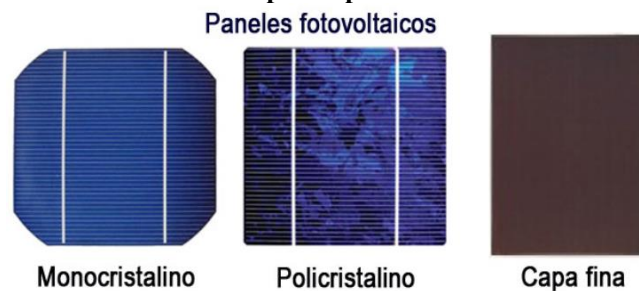
Para implementar una planta fotovoltaica es necesario utilizar equipo específico para su correcta operación. A continuación, se detallan los equipos principales para una planta fotovoltaica, clasificándose por su variedad.

- **Tipos de paneles:** hoy en día existen tres tipos de paneles solares, se encuentran los monocristalinos, los cuales tienen el mayor nivel de eficiencia, llegando en algunos casos a superar el 21%. Además, los fabricantes ofrecen garantía hasta por 25 años.

En segundo lugar, están los policristalinos, los cuales son más económicos debido a que hay menor pérdida de material, pero tienen menor eficiencia que los monocristalinos, ya que poseen menor resistencia al calor.

Finalmente, se hayan los paneles de capa fina, este tipo de paneles son los más económicos y mayoritariamente usados en el hogar (Energiasrenovablesinfo, s.f.). En la Ilustración 9 se pueden ver los tres distintos tipos de paneles.

Ilustración 9: Tipos de paneles fotovoltaicos



Fuente: extraído de (Energiasrenovablesinfo, s.f.)

- **Estructura de soporte:** este punto es de gran importancia al momento de aprovechar la radiación solar. Cuando el techo está inclinado hacia el norte, este u oeste se opta por utilizar estructuras paralelas a la cubierta, en caso contrario se usan estructuras que vienen con inclinación.
- **Tipos de seguidores:** un seguidor solar es un dispositivo mecánico que puede encontrar la posición del sol en cualquier momento del día, siguiendo su trayectoria de este a oeste. Se compone esencialmente de una parte fija y una parte móvil, cuya superficie receptora debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento, el propósito es aumentar la absorción de la radiación solar (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).

Los seguidores pueden ser clasificados según el tipo de movimiento que realicen y según el algoritmo de seguimiento. A continuación, se describen según el tipo de movimiento:

- a. Seguidores de un eje:** presentan un grado de libertad en su movimiento. La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad, su limitación consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir ya sea el *azimut* o la altura solar, pero no ambas (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).
- b. Seguidores de dos ejes:** poseen dos grados de libertad, capaces de hacer un seguimiento solar más preciso. Este tipo de seguidor está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol, tanto en altura como en *azimut*, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).

A continuación, se presenta la clasificación por algoritmo de seguimiento:

- a. Seguidores por punto luminoso:** poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios

sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).

- b. Seguidores con programación astronómica:** mediante un programa, conocen en qué punto debería estar el sol a cada hora y apuntan a dicha posición. Presenta una total independencia de las condiciones climáticas, ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).

Si se comparan estos seguidores puede notarse que los seguidores por punto luminoso son más fáciles de implementar que el algoritmo de seguimiento, pero tienen poca confiabilidad; mientras que con la programación astronómica se presenta una mayor fiabilidad, pero es más difícil de implementar el algoritmo de seguimiento. En los sistemas fotovoltaicos basados en seguimiento solar directo, el seguimiento más utilizado es el sistema por coordenadas calculadas, pero es una tecnología muy costosa (Toranzo, Cervantes, Carralero, Henríquez, & Costa, 2014).

2.1.6 Herramientas de análisis

Para realizar el análisis de la situación actual de la empresa, es necesario la utilización de diferentes herramientas de análisis y diseño. A continuación, se describen algunas de las herramientas que serán utilizadas:

- a. Entrevista estructurada:** este tipo de entrevista es aquella que se realiza con preguntas preestablecidas, sino que más bien se entabla una conversación respecto de un tema en particular. El entrevistador no sólo se preocupa por obtener respuestas, además debe saber qué preguntas hacer (Lozsán, 2022).
- b. Análisis de bases de datos:** tiene relación con las fuentes de donde es posible obtener información, de forma directa o indirecta. La principal fuente directa de información es la que dispone la misma empresa.

- c. Método AHP:** Es un método de decisión multicriterio que nos ayuda a seleccionar entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección, normalmente jerarquizadas, y que suelen entrar en conflicto entre sí. La puntuación se rige por una escala numerada donde uno quiere decir que los criterios son igualmente importantes y nueve quiere decir importancia extrema.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Determinar e investigar las metodologías o equipos que serán utilizados.
- Establecer los criterios de evaluación que serán utilizados en la selección.
- Realizar una matriz con los criterios para su comparación, donde si el criterio obtiene un cierto puntaje en la columna, el mismo criterio en la fila tendrá de puntaje uno dividido ese puntaje, obteniendo un vector de ponderación.
- Realizar una matriz con las metodologías para su comparación con respecto a cada criterio, realizando el mismo procedimiento anterior, para obtener un vector de ponderación.
- Finalmente se realiza la matriz con las metodologías y criterios, utilizando los vectores anteriormente obtenidos para completarla.

- d. Método de factores ponderados:** este método se emplea para seleccionar los equipos que serán utilizados en el diseño de la planta fotovoltaica; consiste en realizar un análisis cuantitativo en el que se comparan entre si distintas alternativas para seleccionar el que cumpla de mejor manera con los criterios de evaluación (Jarabo & García).

Los pasos a seguir son los siguientes:

- i. Determinar e investigar las metodologías o equipos que serán utilizados.
- ii. Establecer los criterios de evaluación que serán utilizados en la selección.
- iii. Realizar una escala para evaluar los criterios anteriormente establecidos.
- iv. Realizar una matriz con los criterios y la escala asociada para realizar el análisis.
- v. Hacer el análisis correspondiente para cada metodología o equipo.

- vi. Seleccionar la metodología o equipo que posee mayor puntaje dentro de la matriz.

Para calcular el puntaje asociado a cada criterio, se utiliza la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

Ecuación 1: Cálculo de puntaje directo

$$\text{Puntaje equipo criterio}_i = \frac{\text{Puntuación criterio}_i}{\text{Puntuación máxima criterio}_i} \times 7$$

Fuente: elaboración propia

Ecuación 2: Cálculo de puntaje indirecto

$$\text{Puntaje equipo criterio}_i = \frac{\text{Puntuación mínima criterio}_i}{\text{Puntuación criterio}_i} \times 7$$

Fuente: elaboración propia

2.2 Marco metodológico

Para la realización del presente proyecto, es necesario aplicar una metodología con la cual guiar las actividades y pasos necesarios para lograr los objetivos establecidos. A continuación, se presenta la metodología para abordar el proyecto.

2.2.1 Metodología PDCA

La metodología PDCA suele ser una de las más usadas en la implementación de un sistema de mejora continua, el cual se divide en cuatro etapas:

- a) **Planificar (Plan):** se identifica cuáles son aquellas actividades de la organización susceptibles de mejora y se fijan los objetivos a alcanzar al respecto. La búsqueda de posibles mejoras se puede realizar con la participación de grupos de trabajo, escuchando las opiniones de los trabajadores, buscando nuevas tecnologías, entre otros procedimientos.
- b) **Hacer (Do):** se ejecutan los cambios necesarios para efectuar las mejoras requeridas. Es conveniente aplicar una prueba piloto a pequeña escala para determinar el funcionamiento antes de hacer cambios a gran escala.
- c) **Verificar (Check):** una vez realizada la mejora, se procede a un período de prueba para verificar su buen funcionamiento. En caso de que la mejora no cumpla con las expectativas iniciales se realiza modificaciones para ajustarla a los objetivos esperados.
- d) **Actuar (Act):** finalmente, luego del periodo de prueba se estudian los resultados y se comparan estos con el funcionamiento de las actividades antes de haber sido implantada la

mejora. Si los resultados son satisfactorios se implantará la mejora en forma definitiva y a gran escala en la organización; pero si no lo son habrá que evaluar si se hará cambios o si se descarta la mejora.

Una vez finalizado el cuarto paso, se vuelve al primero para estudiar nuevas mejoras a implantar (Conexión ESAN, 2016).

2.2.2 Metodología CAPDo

Esta metodología es una variación de la metodología PDCA, ya que, en lugar de iniciar el ciclo con planificar, comienza con verificar, puesto que no se está trabajando desde cero, sino que se busca mejorar. Entonces, la secuencia a seguir es verificar, analizar, planificar y hacer (Perez, s.f.).

2.2.3 Metodología DMAIC

La metodología DMAIC es la metodología central de trabajo en *Six Sigma*. Sistemática y rigurosa, se puede aplicar a cualquier proceso con el fin de lograr *Six Sigma*. Esta metodología se divide en cinco fases (Nathan-Gerges, 2020):

- a) **Definir (*Define*):** en esta fase se establece cuál es la situación actual y marca claramente los objetivos que se quieren conseguir.
- b) **Medir (*Measure*):** la fase de medición permite conocer de forma más detallada los procesos incluidos en el alcance del proyecto. La medición nos proporciona información sobre el rendimiento del proceso, sus entradas y salidas y las expectativas del cliente.
- c) **Analizar (*Analyze*):** la fase de análisis permite investigar sobre las relaciones entre el rendimiento de los procesos y las entradas del proceso gracias a los datos recogidos en la fase de medición. Aquí es donde se establecen las hipótesis de mejora y se crea el plan de mejora basados en la lista de factores con sus respectivos impactos.
- d) **Mejorar (*Improve*):** la mejora verifica el trabajo realizado en la fase de análisis a través de las propuestas de acción y la realización de estas propuestas. Se diseña, se prueba y se implementa la solución propuesta.
- e) **Controlar (*Control*):** esta fase es clave para el mantenimiento del trabajo realizado en todas las fases anteriores. Se encarga de establecer controles lo más automatizados posible para que la mejora del proceso perdure en el tiempo.

2.2.4 Evaluación de alternativas

Para evaluar las tres alternativas de metodología, se definen los siguientes criterios:

- **Competencia:** hace referencia a la capacidad para resolver problemas complejos que tiene la metodología.
- **Tiempo de aplicación:** corresponde a la cantidad de tiempo que se requiere para llevar a cabo la metodología.
- **Facilidad de aplicación:** es la sencillez y simplicidad de llevar a cabo la metodología, debido a la cantidad de recursos que requiere concretarla.
- **Adaptación al cambio:** se refiere a la versatilidad y flexibilidad de la metodología.

Una vez teniendo los criterios, se evalúan los criterios definidos utilizando el método AHP, el cual consiste en un procedimiento de análisis jerárquico con múltiples valoraciones. Cuenta con cinco etapas: desarrollar la estructura jerárquica, representación de los juicios de valor, construcción de las matrices de juicio de valor y normalizadas, cálculo de los vectores de prioridad y cálculo con análisis de resultados (Mendoza, 2017). En la Tabla 2 se presentan los valores utilizados para la comparación de criterios

Tabla 2: Importancia relativa entre criterios

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión).	
Inversos $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

Fuente: (Mendoza, 2017)

Luego, en la Tabla 3 se presenta la comparación cuantitativa de los criterios seleccionados. Para esto, se consideraron los parámetros presentados en la Tabla 2. Posteriormente, se calculó la matriz

normalizada, dividiendo cada valor por la suma de su respectiva columna. Finalmente, se determinó el vector promedio de cada fila, con el fin de obtener el puntaje de cada ítem.

Tabla 3: Comparación cuantitativa de los criterios definidos

Criterio	Competencia	Tiempo de aplicación	Facilidad de aplicación	Adaptación al cambio	Matriz normalizada				Vector promedio
Competencia	1	3	5	3	0,54	0,56	0,63	0,38	0,52
Tiempo de aplicación	1/3	1	1	3	0,18	0,19	0,13	0,38	0,22
Facilidad de aplicación	1/5	1	1	1	0,11	0,19	0,13	0,13	0,14
Adaptación al cambio	1/3	1/3	1	1	0,18	0,06	0,13	0,13	0,12
Total	1,87	5,33	8,00	8,00					

Fuente: elaboración propia

Una vez se tienen los vectores promedios de cada criterio, se procede a realizar el mismo cálculo con cada criterio para todas las metodologías. Entre el Anexo 5 y Anexo 8 se presenta la comparación anteriormente mencionada. Finalmente, en la Tabla 4 se observa el puntaje final de cada metodología.

Tabla 4: Evaluación de metodologías en base a los distintos criterios

Metodología	Competencia	Tiempo de aplicación	Facilidad de aplicación	Adaptación al cambio	Vector promedio
<i>PDCA</i>	0,25	0,61	0,23	0,23	0,32
<i>CAPDo</i>	0,25	0,61	0,32	0,23	0,34
<i>DMAIC</i>	0,50	0,20	0,45	0,34	0,41
Total	0,52	0,22	0,14	0,12	

Fuente: elaboración propia

Además de la metodología seleccionada, se tendrán en consideración los apartados 2.2.5 y 2.2.6 para la elaboración del proyecto.

2.2.5 Metodología para el análisis de oportunidades y medidas de Eficiencia Energética

Consiste en conocer el potencial de Eficiencia Energética que tiene la empresa, para obtener los antecedentes claves del consumo eléctrico. Es necesario seguir los siguientes pasos:

- a) **Análisis del consumo energético:** en este apartado es necesario indicar el consumo energético y los gastos monetarios para finalmente calcular los indicadores de consumo y gasto eléctrico (Cifuentes, 2016).
- b) **Análisis del uso eléctrico:** se busca conocer el flujo de energía dentro de los sistemas, identificando los activos relevantes que son de uso energético, junto con ello, se elaboran diagramas de flujos y balances de energías por usos, procesos y áreas, además de identificar factores influyentes, ineficiencias, pérdidas y oportunidades en el consumo energético (Cifuentes, 2016).
- c) **Análisis de oportunidades y medidas de EE:** la finalidad de este apartado es determinar la factibilidad técnica-económica de las medidas de EE, analizando la demanda de energía consumida, luego se estudian las tecnologías utilizadas y finalmente las fuentes de energía. Además, se determinan inversiones, costos y ahorro energético de cada medida de forma independiente. Finalmente se realizan los flujos de ahorros considerando la situación actual con las medidas ya implementadas (Cifuentes, 2016).

2.2.6 Preparación y evaluación de proyectos

Corresponde a la fase de preinversión, el cual tiene tres etapas principales: identificación, preparación y evaluación del proyecto. El objetivo es obtener información necesaria para tomar una decisión sobre la mejor alternativa de ejecución e inversión, permitiendo con ello, optimizar la utilización de los recursos de inversión al comparar los beneficios y los costos asociados al proyecto (Burgos, 2017).

2.2.7 Metodología

Considerando el marco teórico anteriormente mencionado, se definen las etapas que se presentan a continuación.

Dentro de la primera y segunda etapa de la metodología *DMAIC* están el definir y medir, las cuales se utilizarán para realizar el diagnóstico de la situación actual, la cual consiste en recopilar la información del consumo de electricidad en la empresa, obteniendo la mayor cantidad de datos posibles, para poder evaluar el comportamiento de consumo a través del tiempo.

Las etapas siguientes son analizar y mejorar, dichas etapas se utilizarán para realizar un estudio para determinar los requerimientos necesarios para diseñar el proyecto fotovoltaico. Algunos de los requerimientos son: la superficie disponible, si se hará en el techo o en el suelo, la condición de la superficie, ubicación y potencia máxima del transformador, radiación que llega a la planta, cantidad de paneles a utilizar, etc.

Finalmente, la etapa de controlar se utiliza para evaluar los distintos equipos a utilizar, cuál será su impacto económico en caso de que se decidiera implementar el proyecto y su impacto ambiental asociado.

CAPÍTULO 3: DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En este capítulo se presenta la recopilación de información para la realización de un diagnóstico inicial.

3.1 Situación actual de la empresa

El diagnóstico de la situación actual de la empresa es lo primero que se debe hacer, ya que, con ello, se obtienen los datos necesarios para continuar con el análisis. A continuación, se detallan los aspectos a estudiar.

3.1.1 Consumo de energía eléctrica

El uso de la energía eléctrica en cuanto a la utilización de las bombas de riego es bastante variado, ya que durante periodos de frío, en promedio se utilizan de cuatro a cinco horas diarias, y en periodos de alta temperatura, se suelen utilizar entre seis a siete horas diarias. Además, cabe destacar que se utilizan ocho bombas, los siete días de la semana, todas en simultaneo, entre agosto y mayo.

En la Tabla 5 se puede observar la cantidad de kWh consumidos y su valor asociado, cabe destacar que se toman en cuenta los meses de agosto de 2021 a mayo de 2022, debido a que ese es el periodo de riego.

Tabla 5: Consumo de kWh y su costo asociado

Año	Mes	Consumo (kWh)	Costo (\$)
2021	Agosto	450	\$ 288.662
2021	Septiembre	1.350	\$ 348.836
2021	Octubre	3.000	\$ 468.495
2021	Noviembre	11.175	\$ 1.170.935
2021	Diciembre	9.675	\$ 1.106.749
2022	Enero	6.150	\$ 813.025
2022	Febrero	7.800	\$ 933.961
2022	Marzo	6.975	\$ 889.300
2022	Abril	2.550	\$ 494.204
2022	Mayo	300	\$ 267.298

Fuente: elaboración propia en base a datos proporcionados por Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

3.1.2 Estudio técnico

Este apartado consiste en analizar las variables técnicas que tienen directa incidencia con el diseño de la planta fotovoltaica, tales como, la superficie disponible y la radiación solar que llega al lugar. En los siguientes puntos se describen los aspectos técnicos mencionados.

- **Superficie disponible:** el huerto cuenta con 900.000 m² disponibles, de los cuales posee 845.000m² utilizados. Al ser un huerto, lo que se puede evaluar es solo el terreno donde tendrá ubicación la planta fotovoltaica, ya que no hay techumbres disponibles -además de una pequeña oficina- para la instalación de paneles solares. Para la implementación de la planta fotovoltaica se tomará en cuenta el único lugar disponible para la implementación de la planta, sector que se puede apreciar en la Ilustración 10 pintado de color celeste. Es necesario mencionar que esta área es disponible, no área factible.

Ilustración 10: Área disponible para diseño de planta fotovoltaica



Fuente: elaboración propia en base a (Google Maps, 2022)

3.2 Radiación solar

Para poder calcular la radiación que podrá recibir la planta fotovoltaica a diseñar, es necesario obtener información certera de la zona en la cual se requiere diseñar dicha planta. Por este motivo es que se utiliza la página *web* del Ministerio de Energía llamada explorador solar. En el siguiente apartado se describen sus características y funciones.

3.2.1 Explorador solar

El Explorador Solar es la herramienta pública más completa y detallada sobre el recurso solar en Chile. Con trece años de información permite, a través de sus herramientas de cálculo, estimar el potencial fotovoltaico de manera simple y rápida, permitiendo una cobertura en todo el territorio nacional, incluidas la Isla de Pascua y la isla Robinson Crusoe. Además, cuenta con nuevas herramientas para calcular generación de sistemas fotovoltaicos y sistemas solares térmicos (Ministerio de Energía, 2022).

Para el reporte de la radiación de la planta es necesario conocer la ubicación de la planta en latitud y longitud, siendo 35.135745°S y 71.137463°O respectivamente. Esta ubicación permite observar los datos presentes en la Tabla 6, compuestos por la radiación solar directa, difusa, difusa reflejada y la radiación global, la cual es la suma de las anteriormente mencionadas. En ella se puede ver una radiación global promedio de 223,07W/m² en el año. Por otro lado, se pueden distinguir ciertas variaciones a través del año, siendo las estaciones de primavera y verano las que mayor radiación capta. Aunque en el verano se presenta una mayor potencia por metro cuadrado, llegando a 329,04W/m² durante el mes de enero.

Tabla 6: Radiación solar durante el año 2021 en Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

Tipos de radiación				
Mes	Radiación directa (W/m ²)	Radiación difusa (W/m ²)	Radiación difusa reflejada (W/m ²)	Radiación global (W/m ²)
Enero	274,89	46,13	8,02	329,04
Febrero	268,79	43,74	6,94	319,47
Marzo	244,84	39,82	5,43	290,09
Abril	164,29	42,15	3,43	209,87
Mayo	102,14	30,96	1,98	135,09
Junio	84,36	23,68	1,48	109,52
Julio	77,96	27,90	1,56	107,42
Agosto	90,51	40,58	2,21	133,29
Septiembre	128,10	60,36	3,62	192,08
Octubre	166,46	69,69	5,12	241,27
Noviembre	223,08	66,52	6,99	296,58
Diciembre	243,88	61,39	7,82	313,09
Promedio	172,44	46,08	4,55	223,07

Fuente: elaboración propia en base a (Ministerio de Energía, 2022)

3.3 Conclusiones del diagnóstico

Como primer punto, es factible inyectar energía a la red por parte de la empresa, esto es posible debido a que la empresa posee una potencia conectada inferior a 500kW, siendo catalogada como cliente regulado (EMOAC, 2021). Según dice la ley 21.118, conocida también como *Net billing*, los clientes que quieran utilizar energías renovables para autoconsumo deben ser clientes regulados y la capacidad instalada del proyecto no debe superar los 300kW.

Como segundo punto, y final, la superficie disponible es un solo sector, pero es bastante amplio, por lo que se pueden evaluar diferentes alternativas para la instalación de la planta fotovoltaica.

CAPÍTULO 4: CONFIGURACIÓN TÉCNICA DE PLANTA FOTOVOLTAICA

*En este capítulo se presenta el diseño de la planta fotovoltaica, con sus respectivos cálculos, con ayuda de la plataforma Explorador Solar y el software PV*Sol.*

4.1 Configuración de la planta fotovoltaica

Para diseñar la planta fotovoltaica con la capacidad necesaria, se consideran dos datos de gran relevancia, el área factible para la instalación y el consumo anual que posee la empresa. A continuación, se describen los puntos mencionados.

4.1.1 Área factible

Para poder estimar la capacidad de la planta fotovoltaica, es primordial conocer el área factible que se tiene para el diseño, lo que conlleva a considerar parámetros como la superficie de seguridad y obstáculos que puedan utilizar espacio extra en el lugar de instalación, además de las sombras aledañas al lugar, ya que pueden disminuir la radiación que llegue a los paneles. En el siguiente apartado se presenta el área factible para la instalación.

- **Área factible de la zona coloreada:** esta zona es una planicie, por lo que las restricciones de seguridad no son aplicables, además, no hay ningún obstáculo dentro de este espacio que pueda reducir el área factible. Por otra parte, la restricción de sombra generada se calcula utilizando la medida del árbol de mayor tamaño, cuya medida es de 18 metros aproximadamente. Posteriormente, se calcula la sombra generada utilizando la altura del árbol y la latitud del sol a la que genera mayor sombra, tal como se puede observar en la Ecuación 3, entregando un valor de 26m.

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 3: Estimación de sombra} \\ \tan(\alpha) &= \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Cateto adyacente}} \\ \text{Cateto adyacente} &= \frac{\text{Cateto opuesto}}{\tan(\alpha)} \\ \text{Cateto adyacente} &= \frac{18\text{m}}{\tan(35^\circ)} \\ \text{Cateto adyacente} &= 25,7\text{m} \\ \text{Cateto adyacente} &\approx 26\text{m} \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia en base a (Varsity Tutors, s.f.)

Luego de tener la estimación de sombra proyectada hacia el terreno, es necesario estimar el área con dicha proyección de sombra, las cuales se pueden observar en el Anexo 2. El área total de proyección de sombra es de 6.727m² aproximadamente, por lo que el área factible será la resta

del área disponible con el área de sombra generada, entregando un valor de 48.273m² para el diseño de la planta fotovoltaica.

4.1.2 Tamaño de la planta fotovoltaica por rendimiento solar

El tamaño de la planta depende del consumo anual del huerto, el cual es de 50MWh/año aproximadamente. Una vez teniendo los parámetros necesarios, se realiza la simulación solar en la ubicación del huerto como se observa en la Ilustración 11. Cabe destacar que, al no haber techumbre, el azimut utilizado es 0°, ya que es el ángulo en cual los paneles solares quedan apuntando al norte, mientras más al suroeste apunte el panel solar, mayor será el azimut (Pons, s.f.).

Ilustración 11: Simulación solar con azimut 0°

Mi Sitio					
Latitud	-35,1357	Longitud	-71,1375	Altura	392 msnm
Tipo de Panel:	TSAT	Inclinación:	0	Azimut:	0

Resultados de generación fotovoltaica		
Total Diario	Total Anual	Factor de Planta
4,92 kWh	1.794 kWh	20,0 %

Fuente: extraído de (Ministerio de Energía, 2022)

A continuación, en la Ecuación 4, se calcula el tamaño de la planta fotovoltaica. Hay que recordar que, en este cálculo no se toma en cuenta el área factible calculada anteriormente.

Ecuación 4: Tamaño máximo de planta fotovoltaica

$$Tamaño_{max} \text{ de la planta} = \frac{49.425 \frac{kWh}{año}}{1.794 \frac{kWh}{kWp}}$$

$$Tamaño_{max} \text{ de la planta} = 27.55kWp$$

$$Tamaño_{max} \text{ de la planta} \approx 28kWp$$

Fuente: elaboración propia




4.1.3 Tamaño de la planta fotovoltaica por área factible

A continuación, se describirá el tamaño de la planta para el área factible según su diseño, considerando los diferentes factores como son la selección del panel solar y la definición de la estructura de montaje para los respectivos paneles.

Como se mencionó en el punto Aspectos técnicos de planta fotovoltaica, existen tres tipos de paneles monocristalinos, policristalinos y capa fina. De estas alternativas se seleccionaron tres paneles a evaluar, dos son monocristalinos y uno policristalino como se muestra en la Tabla 7. Es importante mencionar que los paneles de capa fina son utilizados para situaciones domésticas, ya que requieren una menor capacidad, por lo que en este proyecto se descartan completamente. En cuanto a los policristalinos, el panel solar de mayor capacidad que se cotizó es el que se asignó para realizar la evaluación. Por último, los monocristalinos son los más utilizados en los proyectos fotovoltaicos de gran magnitud, ya que son los que mayor eficiencia disponen a la hora de generar energía eléctrica.

En la Tabla 7 se pueden observar cada uno de estos tipos de paneles y sus características. Estas características, a excepción de la vida útil, ya que no genera diferencia en ninguna de las tres alternativas al ser el mismo valor para todas, se utilizarán como criterios para evaluar la mejor alternativa.

Tabla 7: Alternativas de paneles fotovoltaicos

Alternativa			
Modelo	Monocrystalino Sunergy	Monocrystalino Risen	Policristalino Sunergy
Potencia (W)	440	500	340
Vida útil (años)	25	25	25
Eficiencia (%)	20,26	20,4	17,52
Precio (\$)	175.622	194.950	124.361

Fuente: elaboración propia en base a (Natura Energy, 2022)

Para la evaluación, se utilizará el método de los factores ponderados, en donde la potencia y la eficiencia son criterios que inciden directamente de forma positiva en la empresa. En tanto el precio incide de forma indirecta, ya que, la empresa desea abaratar costos en este tipo de proyecto. Los resultados de este análisis se visualizan en el Anexo 3 y Anexo 4.

El panel solar adecuado para la empresa es el monocristalino Risen de 500W, el cual contiene los parámetros que se observan en la Tabla 8.

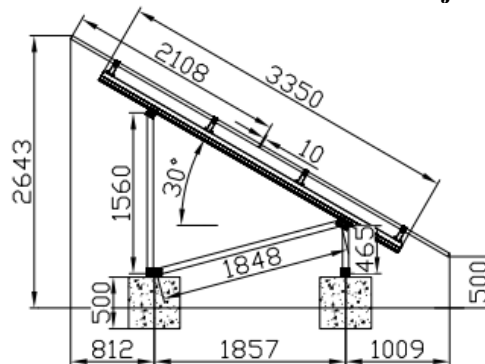
Tabla 8: Características del panel solar seleccionado

Tipo de panel		Monocristalino Risen
Potencia (W)		500
Eficiencia (%)		20,4
Dimensiones (m)	Largo	2,22
	Ancho	1,1
	Espesor	0,035

Fuente: elaboración propia en base a (Natura Energy, 2022)

Para el diseño de la planta fotovoltaica en este sector plano, se debe contemplar una estructura de montaje con el cual el panel solar sea sostenido y elevado con un cierto ángulo en proyección al sol. Para ello, se cotizó una estructura apta para el panel anteriormente seleccionado, considerando sus dimensiones para la instalación. Asimismo, se utilizará una estructura de doble fila para la colocación de los paneles, ya que, este tipo de estructura es de mayor utilización en los proyectos fotovoltaicos. Por otra parte, no existe un criterio de comparación para estos montajes, solamente tener en cuenta que entre más paneles se pongan verticalmente, mayor será la sombra proyectada hacia la siguiente mesa de paneles. En la Ilustración 12 se observa la estructura tipo para la instalación de paneles.

Ilustración 12: Estructura de montaje



Fuente: extraído de (RBRENERGY, 2022)

Es necesario mencionar que, las dimensiones de los paneles que referencia la ilustración son levemente menores, con una diferencia de 10cm en el largo del panel. Por medio de los parámetros de la estructura cotizada, se estimó la altura que tendrá con el panel monocristalino Risen de 500W desde el suelo hasta la cima del panel. En base el teorema de Tales, se obtuvo una altura de 2,7 metros de alto. En la Ecuación 5 se denota el cálculo de la sombra que proyectará una vez instalado los paneles con sus estructuras.

Ecuación 5: Cálculo de sombra proyectada entre mesas de paneles

$$\begin{aligned}\tan(\alpha) &= \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Cateto adyacente}} \\ \text{Cateto adyacente} &= \frac{2,7m}{\tan(35^\circ)} \\ \text{Cateto adyacente} &= 3,88m \\ \text{Cateto adyacente} &\approx 3,9m\end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia en base a (Varsity Tutors, s.f.)

En la Tabla 9 se visualiza la cantidad de paneles y la potencia total factible, la cual se obtiene al multiplicar la potencia del panel a utilizar (500W) y la cantidad de paneles que se utilizará.

Tabla 9: Cantidad de paneles y potencia total factible

Potencia panel (W)	Cantidad de paneles	Potencia total factible (kWp)
500	56	28

Fuente: elaboración propia

4.2 Selección del inversor

Es el punto más crítico de inversión, donde más fallas pueden ocurrir. Este equipo transforma la corriente continua (CC) generada por los módulos solares en corriente alterna (CA), y al mismo tiempo optimiza la producción de energía mediante un seguidor denominado MPPT y se coordina con la red para entregar energía eléctrica según los parámetros requeridos por esta (ACESOL, 2016). Por lo tanto, se hace necesario una correcta elección de un inversor que cumpla con los parámetros de la planta a diseñar.

4.2.1 Marca del inversor

La selección del inversor será conforme a la calidad y ranking que existen en la actualidad, referente a las marcas. Dentro de las marcas con mayor dominio global se encuentra Huawei,

Sungrow y SMA (Solar Technology AG) como se puede visualizar en la Ilustración 13: Mayores proveedores de inversores fotovoltaicos Ilustración 13.

Ilustración 13: Mayores proveedores de inversores fotovoltaicos
Global PV inverter market share rankings by shipment, 2020

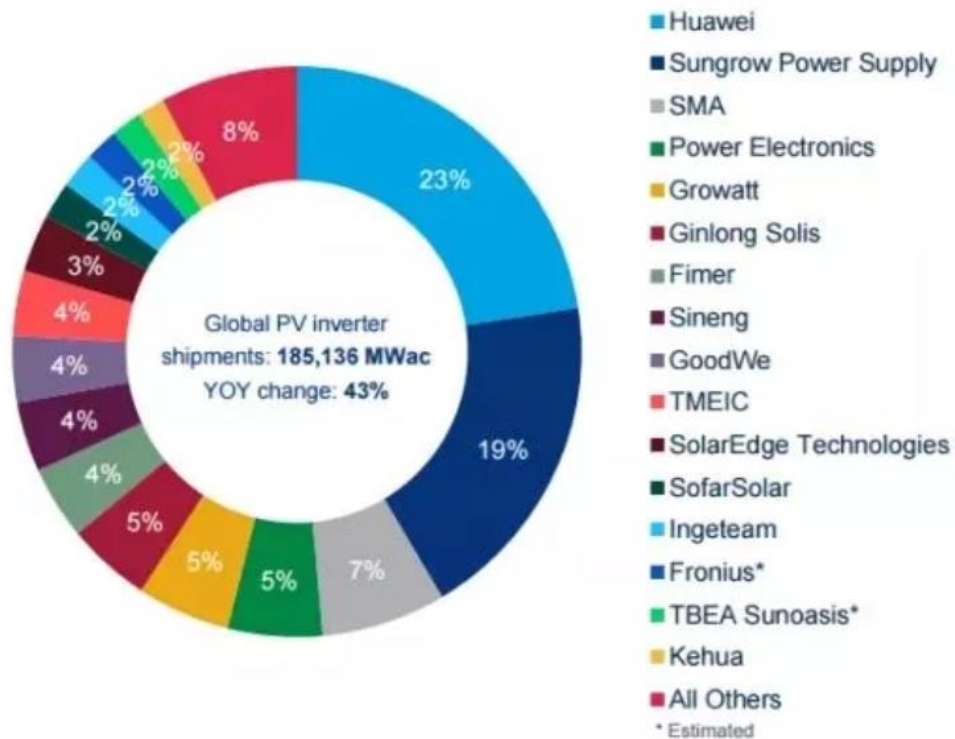


Image: 2020 Global transformer supplier shipment percentage ranking. Source: Wood Mackenzie

Fuente: extraído de (CDS Solar, 2021)

Bajo el ranking señalado, se procede a realizar una comparación de cinco marcas relevantes en el mercado. Esta comparación se realizará mediante una matriz multicriterio, en donde se evaluarán cada una de estas marcas. Luego del análisis, se seleccionará la que mayor resultado pondere.

Los criterios por evaluar son características relacionadas con la marca y que son fundamentales para la selección del inversor. Estos criterios se definen a continuación:

- **Ranking mundial:** este criterio consiste en la posición que se encuentran las marcas en el marco de inversores fotovoltaicos dentro del mercado mundial, en donde el uno es la mejor posición. Este criterio influye directamente con Agrofritícola San Andrés de Cordillerilla LTDA., ya que, entre mejor posición se encuentre la marca, más

confiabilidad y calidad de productos encontrará para una futura implementación e instalación de la planta fotovoltaica.

- **Representante de la marca:** la representación de la marca en el mercado nacional que se encuentra la empresa es esencial, ya que de esta forma se interactuará de manera eficiente con los clientes. Esta representación influye de manera directa con la empresa, dado que se facilita la obtención de los diferentes equipos fotovoltaicos para una futura implementación del proyecto.
- **Precio:** este criterio consiste en analizar un inversor del mismo tipo para todas las marcas (en este caso se analizará un inversor de 50kWp), para así, visualizar la diferencia de precios que existe entre ellas. Este criterio es uno de los más importantes a analizar, ya que entre mayor sea el precio del inversor menos conveniente le será para la empresa, considerando que el inversor es de la misma utilidad.
- **Trayectoria:** la trayectoria está definida por la cantidad de años que la marca lleva en el mercado de energía fotovoltaica. Este criterio es esencial para garantizar un producto adecuado y de calidad. Por lo que en este caso para la empresa le es favorable depositar la confianza en una empresa de gran trayectoria.
- **Garantía:** este último criterio consiste en la cantidad de años de garantía en caso de fallas que ofrece la marca por su producto que en este caso es el inversor. Por consecuencia, entre mayor es la cantidad de años de garantía mejor será para la empresa, dado que cuando falla el inversor afecta todo el sistema fotovoltaico, lo cual trae mayor costo para la empresa.

En la Tabla 10 se observan los criterios mencionados con las marcas correspondientes a comparar.

Tabla 10: Criterios a evaluar según marca

Datos					
Marcas	Ranking Mundial	Representante de marca	Precio (\$)	Trayectoria (años)	Garantía (años)
Huawei	1	Si	\$2.501.979	5	10
Sungrow	2	Si	\$4.692.550	20	10
SMA	3	Si	\$7.601.500	40	10

Fuente: elaboración propia en base a (Orduña, 2019), (Springers, 2022), (Solartex, 2022) y (SecondSol, 2022)

Luego, se realiza las respectivas puntuaciones para cada marca según el criterio a evaluar y la matriz de importancia relativa para cada uno de ellos, las cuales se denotan en el Anexo 9. Posteriormente, se realizó una matriz de ponderación, en donde la marca Huawei es la que mayor relevancia tiene para la empresa. Esto se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11: Matriz de ponderación de las marcas

	Ponderación	Huawei	Sungrow	SMA
Ranking Mundial	20%	7,00	3,50	2,33
Representante de marca	16%	7,00	7,00	7,00
Precio	23%	7,00	3,73	2,30
Trayectoria	24%	0,88	3,50	7,00
Garantía	17%	7,00	7,00	7,00
Total		5,5125	4,70308977	4,993295148

Fuente: elaboración propia

4.2.2 Potencia del inversor

Luego de seleccionar la marca del inversor, se procede a determinar la potencia de este, la cual está ligada al precio por kilo *watt* del equipo.

Es necesario mencionar que los inversores son puntos críticos en cuento a fallas, por ende, es importante considerar que al utilizar un solo inversor de gran tamaño que abastezca todo un sector de paneles, es un riesgo importante en una empresa en donde la producción es constante y no debe ser interrumpida, ya que, al caerse un inversor que abastece el 100% de la planta fotovoltaica, todo ese sector no producirá energía eléctrica a la empresa, por lo que provocará que la producción se detenga. Ante esto se debe analizar la cantidad y el tamaño de los inversores a utilizar.

Por otro lado, un punto crítico que se debe considerar es el costo de cada inversor por kilowatt que producen, ya que, es necesario analizar por un lado la alternativa de usar muchos inversores pequeños o pocos inversores de mayor tamaño según el costo de ellos. En base a lo anterior se analizó por medio de la cotización realizada en las empresas *Solar Store* y *Natural*

Energy. En la Tabla 12 se observa las características de cada inversor junto con el costo por kilowatt.

Tabla 12: Costo por kW según inversor

Inversores Huawei			
Tipo	Potencia (kW)	Precio (\$)	Valor (\$/kWh)
SUN2000-8KTL	8	\$ 1.220.168	\$152.521
SUN2000-12KTL	12	\$ 1.738.647	\$144.887
SUN2000-20KTL	20	\$ 2.358.824	\$117.941

Fuente: elaboración propia en base a (Solarstore, 2022) y (Naturaenergy, 2022)

Al observar la tabla anterior, se puede desprender que el precio por kilowatt disminuye a medida que el inversor es más grande en potencia. Por lo tanto, este criterio es de suma importancia para evaluar la mejor opción en donde se reduzcan costos, por otra parte, es necesario no pasar por alto el criterio de no abastecer solamente con inversores que abarquen el 100% de la planta, ya que aumenta la probabilidad de que cuando exista una falla en el inversor, se caiga completamente la generación eléctrica fotovoltaica inhabilitando el riego en Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

4.2.3 Factibilidad técnica

Para dimensionar la planta fotovoltaica, hay que tener en consideración los parámetros de los inversores, ya que son estos valores los que restringen la cantidad de paneles que puede soportar el mismo. Para ello se utilizará, a modo de ejemplo, el inversor SUN2000-12KTL, para poder determinar la factibilidad que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar la planta fotovoltaica. Además, el panel solar utilizado será el seleccionado en el apartado Tamaño de la planta fotovoltaica por área factible.

- a) **Según potencia:** se debe considerar la potencia máxima del inversor, en donde la cantidad de paneles que pueden ser utilizados no debe sobrepasar los 13,5kW. Este cálculo se puede visualizar en la Ecuación 6.

Ecuación 6: Cantidad de paneles máximos a instalar

$$N^{\circ} \text{ paneles}_{max} = \frac{13.500W}{500W}$$

$$N^{\circ} \text{ paneles}_{max} = 27 \text{ paneles}$$

Fuente: elaboración propia

- b) **Según voltaje máximo de entrada:** el voltaje tanto en el panel como en el inversor es clave, ya que los paneles al ser unidos en serie, los voltajes se suman. Por lo que, la sumatoria de paneles no debe superar los 1.000V. Este cálculo se muestra en la Ecuación 7.

Ecuación 7: Cantidad de paneles máximos a instalar

$$N^{\circ} \text{ paneles}_{max} = \frac{1.000V}{42,88V}$$
$$N^{\circ} \text{ paneles}_{max} = 23,32 \text{ paneles}$$
$$N^{\circ} \text{ paneles}_{max} \approx 23 \text{ paneles}$$

Fuente: elaboración propia

- c) **Según voltaje de arranque:** el voltaje de arranque corresponde al voltaje que requiere el inversor para comenzar a funcionar, sin ese voltaje el inversor nunca partirá. Por lo tanto, la cantidad de paneles que se requieren se observa en la Ecuación 8.

Ecuación 8: Cantidad de paneles máximos a instalar en string

$$N^{\circ} \text{ paneles}_{min} = \frac{250V}{42,88V}$$
$$N^{\circ} \text{ paneles}_{min} = 5,83 \text{ paneles}$$
$$N^{\circ} \text{ paneles}_{min} \approx 6 \text{ paneles}$$

Fuente: elaboración propia

- d) **Según MPPT (*Maximum Power Point Tracker*):** corresponde al rango de voltaje en el cual el inversor funciona de forma óptima, y para que funcione como tal, la cantidad de paneles a instalar deben sumar entre los 320V a 800V. Esto no quiere decir que mayor a ese rango de voltaje el inversor no funcionará, sino que operará de igual manera hasta los 1.000V, pero no de forma óptima.
- e) **Según MPPT y corriente de entrada:** el inversor SUN2000-12KTL contiene cuatro MPPT con dos entradas en paralelo, en donde cada MPPT soporta 25A. Esto quiere decir que, al sumarse las líneas de paneles en cadena, no deben sobrepasar los 25A, ya que, en caso contrario el inversor no funcionará. Esto es debido a que las cadenas se encuentran paralelo, por lo que el amperaje de cada cadena se suma.

4.2.4 Interconexión por inversor

El número de inversores define la potencia de generación de energía en un sector fotovoltaico, aunque por otro lado establece la cantidad de paneles o módulos en serie y cadenas en paralelo que puede soportar según la configuración de interconexión.

Para el caso de la planta fotovoltaica que se está diseñando en Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA., se realizó un análisis evaluando cada inversor según la potencia a abastecer en el sector. El lugar de instalación de la planta tiene una potencia de 28.000W, en donde alcanza una instalación de 56 paneles solares. En base a esta información se evalúa cada inversor y su cantidad, teniendo en cuenta que la potencia de los inversores a usar sea la más cercana a la potencia del galpón, teniendo una tolerancia del $\pm 15\%$. Esto quiere decir que el uso de inversores puede ser tanto sobredimensionado o subdimensionado. Aquellas alternativas que se salgan del margen de tolerancia se descartarán, dado que estaría provocando un despilfarro de energía considerable. Cada una de estas alternativas se visualizan en el Anexo 10.

Para la selección de la alternativa óptima, se realizó un análisis en la página web Explorador Solar, con respecto a la generación anual, donde fueron simuladas todas las alternativas, tal como se visualiza en el Anexo 11. Para esta simulación, fue necesario ingresar los parámetros del panel y la cantidad a instalar junto los datos del inversor y su eficiencia. Posterior a la estimación de la generación anual, dicho valor se multiplica por el precio de la energía con el cual se obtiene el ahorro que producirá. Además, considerando la cantidad de inversores a utilizar, se estimó el costo de cada una de estas alternativas que, al ser dividida por el ahorro anual calculado da como resultado el payback de la inversión. Este análisis es fundamental, ya que, no porque la alternativa de inversores tenga menor costo será la mejor alternativa, sino que se debe equilibrar los costos con la generación anual y junto con ello el ahorro anual que tendrá aquella alternativa, en donde se evidencia el periodo de retorno de aquella inversión. Dichos análisis se presentan en Anexo 12 En la Tabla 13 se puede ver el inversor seleccionado para la planta fotovoltaica.

Tabla 13: Inversor seleccionado

Tipo inversor	Potencia del inversor (kW)	Cantidad
SUN2000-8KTL	8	3

Fuente: elaboración propia

En cuanto al transformador, la empresa posee uno que soporta la potencia de la planta fotovoltaica, por lo que no es necesario realizar esa inversión.

4.3 Distribución de la planta fotovoltaica

Ya teniendo las características principales de la planta fotovoltaica, se realiza el diseño de la planta en el *software* PV*Sol, el cual se puede visualizar en la Ilustración 14.

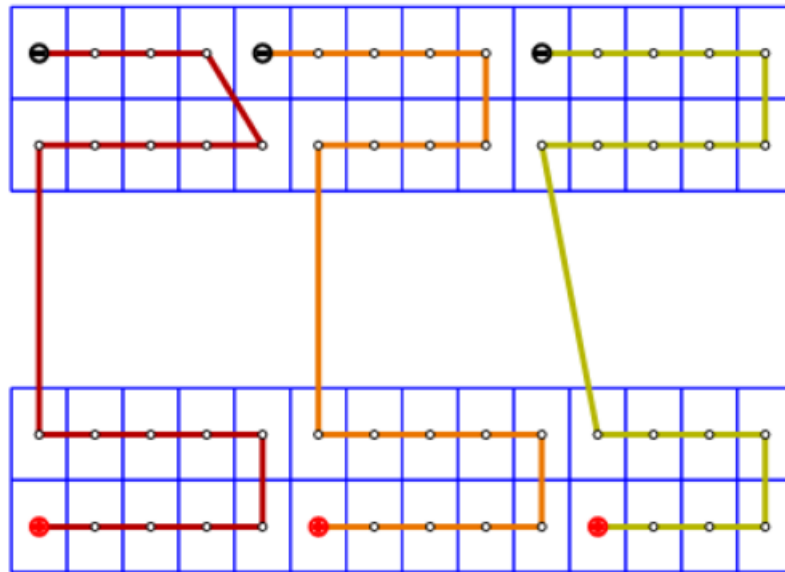
Ilustración 14: Diseño 3D de planta fotovoltaica



*Fuente: elaboración propia con ayuda de software PV*Sol*

Junto con ello, en la Ilustración 15, se aprecian las conexiones que existen entre los paneles denotados por un color, además de los paneles que van en conjunto hacia un MPPT de un determinado inversor. También se observan los puntos desde que panel hasta que panel va conectado el MPPT.

Ilustración 15: Plano de conexión



Fuente: elaboración propia con ayuda de software PV*Sol

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE IMPACTOS

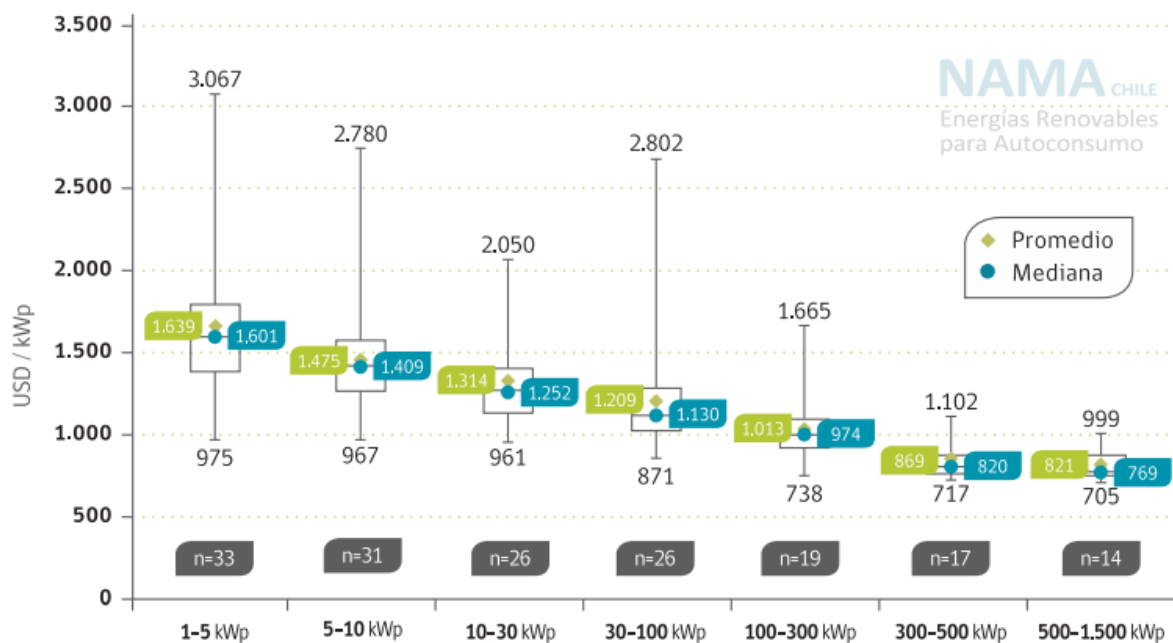
En este capítulo se realizará el estudio económico para la planta solar fotovoltaica, de manera de conocer la rentabilidad del proyecto y analizar la factibilidad de este para Agrofriticola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

5.1 Impacto económico

Este apartado se realizará teniendo en cuenta un estudio realizado el año 2020 por el ministerio de energía, en donde se establece un índice de precios de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución comercializados en Chile. Este estudio consistió en una encuesta dirigida a los proveedores que cuentan con experiencia en la instalación de sistemas fotovoltaicos. A partir de bases de datos de proveedores fotovoltaicos se construyó una base de datos de 306 empresas, el cual fue acotado a 58, de los cuales 44 contestaron la encuesta correspondiente a proyectos “llave en mano” entre 2019 al 2020

La Ilustración 16 representa el tamaño de la planta en el eje horizontal, lo que quiere decir, la potencia instalada en aquella empresa, en tanto en el eje vertical se aprecia el precio en dólares por kWp de la misma. Además, presenta rangos de potencia, ya que el costo por kWp instalado dentro de ese rango es similar.

Ilustración 16: Análisis estadístico de precios de sistemas fotovoltaicos comercializados en Chile 2020, sin IVA



n = tamaño de muestra. Corresponde a la cantidad de respuestas obtenidas de la encuesta y que fueron consideradas para el rango de potencia correspondiente.

Fuente: extraído de (Ministerio de Energía, 2020)

El rango en el cual se encuentra Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA. es 10-30kWp, en donde tiene un costo promedio de 1.314USD/kWp. En la Tabla 14, se visualiza el costo total de inversión de la planta solar.

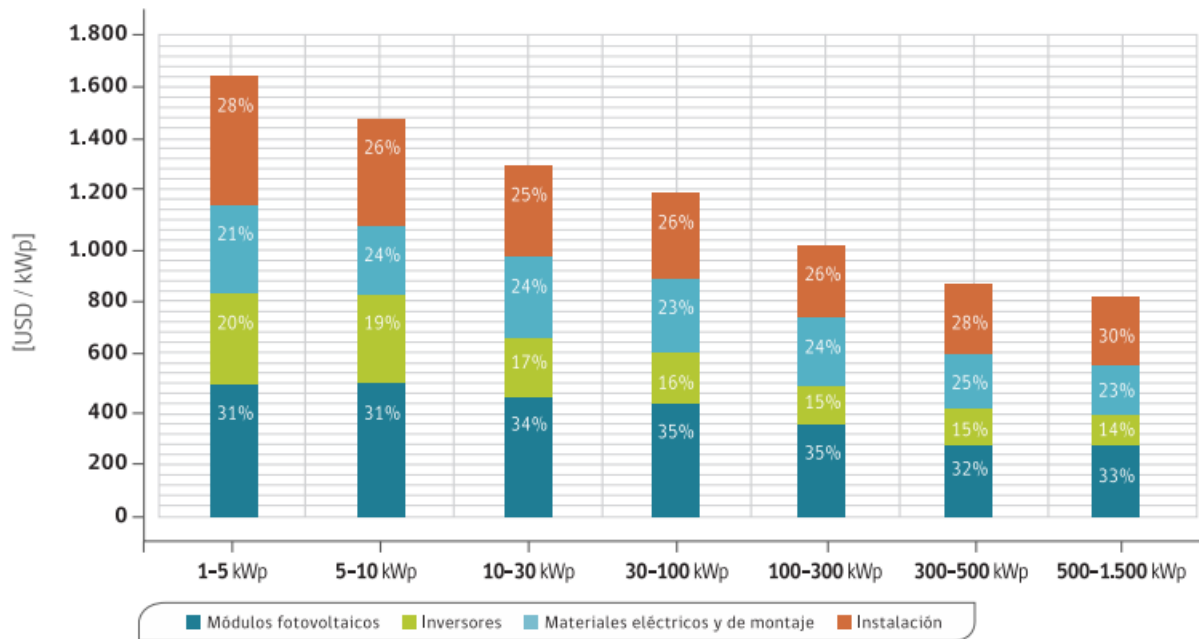
Tabla 14: Inversión de planta fotovoltaica

Inversión por kWp (USD/kWp)	Potencia factible (kWp)	Inversión total (USD)
1.314	28	36.792

Fuente: elaboración propia

Es necesario mencionar que la inversión calculada tiene contemplados todos los costos asociados a la implementación de una planta fotovoltaica, como lo son los materiales eléctricos y de montaje, inversores, paneles y la propia instalación. En la Ilustración 17 se desglosan los porcentajes correspondientes a cada costo mencionado. Además, en el Anexo 13 se calcularon los costos para cada uno de los cuatro apartados mencionados en la Ilustración 17 utilizando la inversión de equipos realizada en apartados anteriores.

Ilustración 17: Distribución de costos de proyectos fotovoltaicos por rango de potencia



Fuente: extraído de (Ministerio de Energía, 2020)

Luego de estimar la inversión, es necesario calcular el flujo de caja del proyecto. A continuación, se puede ver el flujo de caja neto del proyecto.

Tabla 15: Ahorro anual de planta FV

Potencia Nominal :	28	kWp														
AÑO/ÍTEM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos		7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873
Costos Operac.		488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488
Capital de Trabajo	1708															
UAI		7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385
Impto												1994	1994	1994	1994	1994
Activo Fijo	24397															
Instalación y Montaje	8132															
Valor Residual																3424
RESULTADO =	-34237	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	7385	5391	5391	5391	5391	8815
VAN (TREMA) :		6366	5488	4731	4079	3516	3031	2613	2253	1942	1674	1054	908	783	675	951
VAN (Acum):		-27870	-22382	-17651	-13572	-10056	-7025	-4412	-2159	-217	1457	2510	3419	4202	4876	5828
TREMA =	16	%														
VAN (16%) =	5828															
TIR =	20,36%															

Fuente: elaboración propia

En la tabla anterior, se observa que la TREMA utilizada es de 16% y el VAN es de 5828 dólares, con una TIR asociada de 20,36%, entregando un periodo de recuperación durante el año diez.

5.1.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad para este proyecto será realizado teniendo en consideración la variación del precio del dólar, ya que es el factor más influyente en este tipo de proyectos, además, la incertidumbre a nivel nacional y global por todo lo que se vive actualmente puede hacer variar el precio de la energía.

Considerando esa nueva condición, en la Tabla 16 se observan dos escenarios diferentes, el escenario pesimista, en el cual la tasa de cambio aumenta un 10%, y el escenario optimista, en el cual la tasa de cambio disminuye 10%.

Los flujos de caja asociados a este análisis de sensibilidad se encuentran en los anexos Anexo 14 y Anexo 15.

Tabla 16: Análisis de sensibilidad tasa de cambio

T/C	VAN	TIR
10% Aumento	4307	18,99%
10% Reducc	5845	20,01%

Fuente: elaboración propia

Luego, se realiza el mismo cálculo, pero teniendo en cuenta el cambio en el apartado de mantenimiento, tal como se observa en la Tabla 17.

Tabla 17: Análisis de sensibilidad costos de mantenimiento

C/M	VAN	TIR
10% Aumento Costo Mant.	7036	20,21%
10% Reducción Costo Mant.	7580	20,53%

Fuente: elaboración propia

Los flujos de caja asociados a este análisis de sensibilidad se encuentran en los Anexo 16 y Anexo 17.

5.2 Impacto ambiental

El factor ambiental es sumamente importante en este tipo de proyectos, principalmente la huella de carbono con la que aporta una planta de estas características. La huella de carbono corresponde a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), las cuales se producen de manera directa o indirecta por las acciones de personas, organizaciones, productos, eventos o gobiernos (Asgreen, 2021).

Para estimar las emisiones que se evitan al implementar este proyecto fotovoltaico, se utiliza el factor de emisión de 390,7kgCO₂(eq)/MWh, dato investigado en el apartado

Oportunidad. En la Tabla 18 se observan los datos necesarios para el cálculo de reducción de huella de carbono junto con su resultado, el cual es de 19.535kgCO₂(eq).

Tabla 18: Cálculo de reducción de emisiones de CO₂

Emisión CO₂		
Consumo Anual (MWh)	Factor de emisión (kgCO ₂ (eq)/MWh)	Disminución (kgCO ₂ (eq))
50	390,7	19.535

Fuente: elaboración propia en base a (Energía Abierta, 2021)

CONCLUSIONES

Como se mencionó en un inicio, Agrofruticola San Andrés de Cordillerilla LTDA. es una empresa dedicada a la producción y cosecha de manzanas, siendo el riego de los manzanos lo que genera un gran consumo energético para la empresa, lo cual se ve reflejado en sus facturas.

Teniendo en consideración lo anterior es que se le propone a la empresa la realización de un proyecto fotovoltaico, con el principal objetivo de disminuir ese costo. Además, el valor de la energía eléctrica va en un aumento constante y considerable debido a las políticas que están en proceso de implementación en el país.

La elección de utilizar energía solar fotovoltaica como ERNC fue por el lugar geográfico que posee la empresa, es ideal para aprovechar el recurso del sol, siendo esta razón la motivación por reducir los costos de la empresa, dado que la posibilidad de implementarla existía. Tras el desarrollo de la primera etapa del proyecto, se pudo observar que existe un consumo de energía eléctrica importante, directamente proporcional con los periodos de riego, siendo mucho más alto el consumo en los meses de verano, y disminuyendo en los meses de menos calor.

En relación con el estudio técnico, la empresa no cuenta con proyectos de ampliación que influya a la planta fotovoltaica, sin embargo, el sector que se está evaluando para instalar la planta puede ser de mucha utilidad para la empresa, ya que es una planicie con un área considerablemente grande con la que cuenta actualmente. Por lo que a futuro podría ser una superficie de mucha utilidad para aumentar su plantación de manzanos.

Con respecto al diseño y potencia de la planta, se concluyó que la potencia máxima que la planta puede producir sin que exista desperdicio de energía es de 28kWp.

Desde un comienzo, el propósito de este proyecto era encontrar la mejor relación costo/oportunidad, ya que no solamente el equipo o componente de menor costo será el mejor, sino que aquel que genere la mayor oportunidad de ahorro y reducción de costos será el más conveniente para la empresa, sin dejar de lado la calidad y confiabilidad del producto.

Teniendo en cuenta el alto costo de la inversión del proyecto, el periodo de retorno de la inversión se encuentra dentro de un rango aceptable para una planta fotovoltaica, en donde menor a los diez años se considera un proyecto fotovoltaico rentable, aunque el capital inicial debe ser alto para poder implementar el proyecto.

Finalmente, la reducción de la huella de carbono avanza rápidamente, considerando la política de cero emisiones de carbono para el año 2050, sin embargo, no hay que pasar por alto el valor de la energía, teniendo en cuenta el inminente cierre de las termoeléctricas, el precio puede aumentar mucho más, ya que la producción de energía eléctrica mediante carbón es una de las más económicas al día de hoy, por lo que es necesario estar preparado para este tipo de escenarios.

Bibliografía

- Acciona. (2020). *Energía solar*. Obtenido de https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/?_adin=02021864894
- ACESOL. (Diciembre de 2016). *Guía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de http://edu.phineal.com/wp-content/uploads/2016/03/Guia_SOLAR_FOTOVOLTAICA_hogares.pdf
- ACFotovoltaica. (7 de Julio de 2021). *¿En qué consiste el seguimiento del punto de máxima potencia: MPPT?* Obtenido de <https://acfotovoltaica.es/punto-maximo-de-potencia-mppt/>
- Agrofruticola San Andrés - Google Maps. (s.f.). *Agrofruticola San Andrés*. Obtenido de <https://www.google.com/maps?q=-35.1342123,-71.1443368&z=17&hl=es>
- Asgreen. (21 de Abril de 2021). *Huella de Carbono: todo lo que debes saber*. Obtenido de <https://asgreen.cl/2021/04/21/huella-de-carbono-todo-lo-que-debes-saber/>
- Atacama Solar Lab. (s.f.). *Energía solar fotovoltaica*. Obtenido de http://atacamasolarlab.cl/energia_solar_fotovoltaica.html
- Burgos, A. (2017). *Preparación de proyectos*. Obtenido de http://www.xprtraining.com/proyectos_inversion/preparacion_proyectos.html#:~:text=Etapas%20de%20Preparaci%C3%B3n%20y%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Proyectos&text=Es%20una%20herramienta%20que%20contribuye,costos%20asociados%20a%20un%20proyecto
- CDS Solar. (6 de Septiembre de 2021). *In the global PV inverter shipment 185GW in 2020, six Chinese companies occupy the TOP10 list*. Obtenido de Mayores proveedores de inversores fotovoltaicos
- Cifuentes, R. (9 de Mayo de 2016). *MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA MINERÍA*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139884/Manual-de-eficiencia-energetica-para-mineria.pdf>
- CNE. (s.f.). *¿Quiénes somos?* Obtenido de <https://www.cne.cl/quienes-somos/>
- Conexión ESAN. (4 de Mayo de 2016). *Las cuatro etapas para la mejora continua en la organización*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/las-cuatro-etapas->

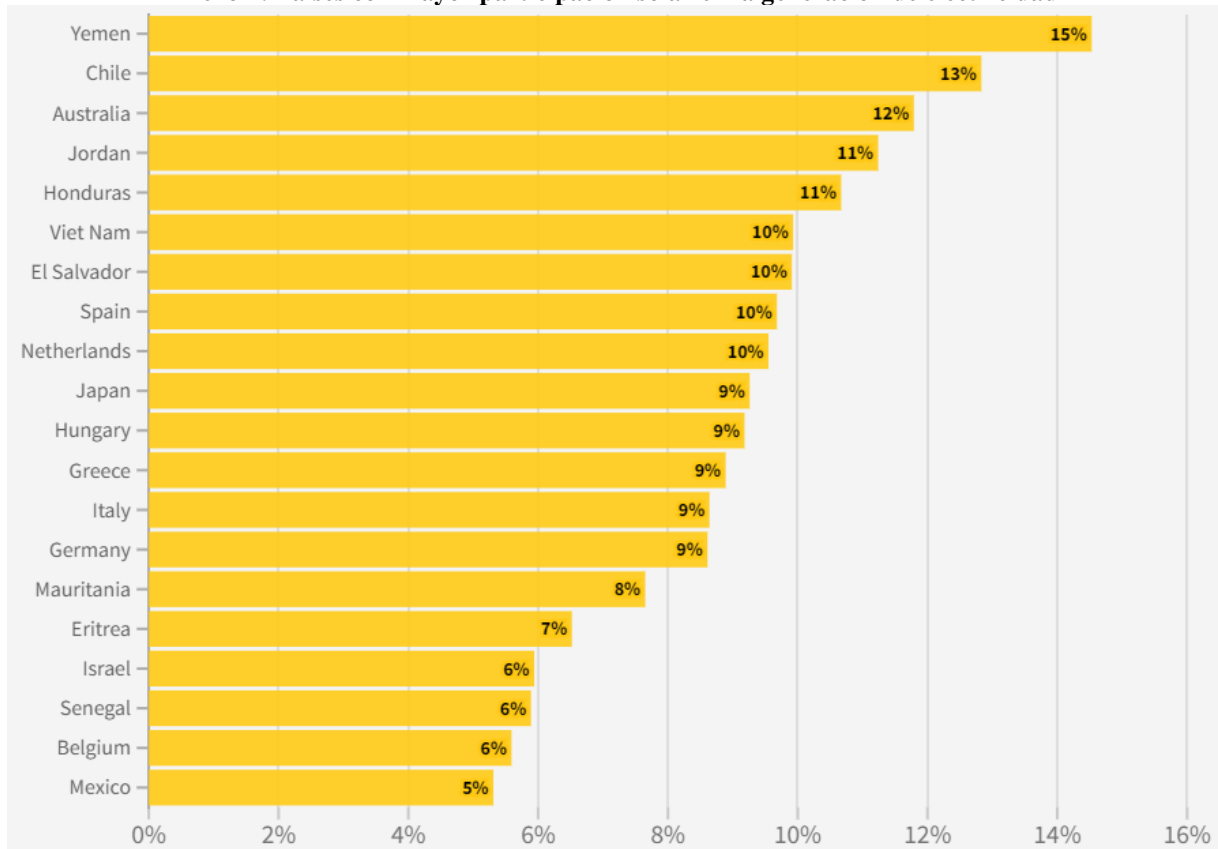
- para-la-mejora-continua-en-la-
organizacion#:~:text=El%20nombre%20del%20ciclo%20PDCA,etapas%20en%20el%20siguiente%20art%C3%ADculo.
- EMBER. (2022). *Global Electricity Review 2022*. Obtenido de <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/#data-solar>
- EMOAC. (14 de Julio de 2021). *Cliente libre vs cliente regulado de electricidad: ¿cuál conviene ser?* Obtenido de <https://www.emoac.cl/blog/cliente-libre-vs-cliente-regulado-electricidad#:~:text=Clientes%20regulados%3A%20son%20usuarios%20finales,a%20la%20regulaci%C3%B3n%20de%20precios>.
- Energía Abierta. (2021). *Factores de emisión*. Obtenido de <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- Energiasrenovablesinfo. (s.f.). *Energías Renovables*. Obtenido de <https://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- Erenovable. (2021). *ENERGÍA SOLAR VENTAJAS Y DESVENTAJAS*. Obtenido de <https://erenovable.com/energia-solar-ventajas-y-desventajas/>
- Google Maps. (2022). Obtenido de <https://www.google.com/maps/@-35.1404038,-71.1402782,653m/data=!3m1!1e3?hl=es>
- Google maps. (s.f.). *Oficina centra Agrofruticola*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/Manuel+Montt+345,+Curic%C3%B3,+Maule/@-34.9829178,-71.2530935,14.14z/data=!4m5!3m4!1s0x966457a7608f4251:0xc4c581f2f34d6f39!8m2!3d-34.9824011!4d-71.2396572?hl=es>
- Jarabo, F., & García, F. (s.f.). *MÉTODO DE LOS FACTORES PONDERADOS*. Obtenido de https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/5075/mod_resource/content/1/Problemas/Met-Local-Ponderado-ejemplo.pdf
- Lorenzo, J. A. (s.f.). *¿En qué consiste el efecto fotovoltaico?* Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-efecto-fotovoltaico/>
- Lorenzo, J. A. (2015). *Energía solar térmica*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-solar-termica/>

- Lorenzo, J. A. (s.f.). *Radiación solar*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/radiacion-solar/>
- Lozán, N. (22 de Febrero de 2022). *Entrevista no estructurada: qué es, características, ejemplos y diferencias con entrevista abierta, libre, dirigida....*. Obtenido de <https://www.cinconoticias.com/entrevista-no-estructurada/#>
- Mendoza, S. P. (17 de 09 de 2017). *Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP)*. Recuperado el 01 de 04 de 2022, de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v27n3/0718-3305-ingeniare-27-03-00348.pdf>
- Ministerio de Energía. (2020). *Índice de precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/factsheet_idp_fv_2020.pdf
- Ministerio de Energía. (2022). *Explorador solar*. Obtenido de <https://solar.minenergia.cl/exploracion>
- Nathan-Gerges, M. (30 de Abril de 2020). *Lean Six Sigma, una metodología aplicada a procesos reales*. Obtenido de <https://www.izertis.com/es/-/blog/lean-six-sigma-una-metodologia-aplicada-a-procesos-reales#:~:text=DMAIC%20es%20la%20metodolog%C3%ADa%20central,y%20el%20objetivo%20del%20proyecto.>
- Natura Energy. (2022). *Natura Energy*. Obtenido de https://www.naturaenergy.cl/search?search_text=panel+solar&limit=24&order=relevance&way=DESC
- Naturaenergy. (2022). Obtenido de www.naturaenergy.cl
- ODEPA. (Octubre de 2011). *Mercados agropecuarios*. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servicios-informacion/Mercados/oct-11.pdf>
- Orduña. (2019). *Suministros Orduña y Sungrow inician en 2019 una nueva colaboración*. Obtenido de <https://www.suministrosorduna.com/suministros-orduna-y-sungrow-inician-en-2019-una-nueva-colaboracion/>
- Perez, R. (s.f.). *EL CICLO DE MEJORA CONTINUA*. Obtenido de <https://actiongroup.com.ar/el-ciclo-de-mejora-continua/>
- Pons, R. (s.f.). *Entendiendo el Azimut y la Elevación*. Obtenido de <https://www.photopills.com/es/articulos/entendiendo-el-azimut-la-elevacion>

- RBREENERGY. (2022). *ESTRUCTURA A PISO DOBLE FILA VERTICAL ST3H (8 PANELES SOLARES)*. Obtenido de <https://www.rbrenergy.cl/estructura-a-piso-doble-fila-vertical-st3h-8-paneles-solares>
- SecondSol. (2022). *Huawei - SUN 2000-50KTL-M0 (50 kW)*. Obtenido de <https://www.secondsol.com/en/anzeige/27554//huawei/sun-2000-50ktl-m0-50-kw>
- Solarama. (s.f.). *Conoce qué son los sistemas fotovoltaicos y su función*. Obtenido de <https://solarama.mx/blog/que-son-los-sistemas-fotovoltaicos/>
- Solarstore. (2022). *Inversores On Grid*. Obtenido de <https://www.solarstore.cl/>
- Solartex. (2022). *Inversor SMA Tripower CORE1 STP 50-40 Trifasico*. Obtenido de <https://www.solartex.cl/tienda/producto/inversor-sma-tripower-core1-stp-50-40-trifasico/>
- Solcor Chile. (2022). *¿QUÉ ES ERNC?* Obtenido de <https://www.solcorchile.com/ernc-energias-renovables-no-convencionales/>
- Solcor Chile. (s.f.). *ON GRID Y OFF GRID*. Obtenido de <https://www.solcorchile.com/on-grid-off-grid/#:~:text=El%20concepto%20on%20grid%20hace,la%20generada%20por%20los%20paneles.>
- Springers. (2022). *Sungrow 50kW Three Phase Inverter*. Obtenido de <https://www.springers.com.au/shop/product/sg50cx-premium-sungrow-50kw-three-phase-inverter-13655>
- Toranzo, N., Cervantes, A., Carralero, L., Henríquez, J., & Costa, O. (Noviembre de 2014). *Scielo*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000200008
- Varsity Tutors. (s.f.). *Relaciones trigonométricas*. Obtenido de https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/trigonometric-ratios

ANEXOS

Anexo 1: Países con mayor participación solar en la generación de electricidad



Fuente: extraído de (EMBER, 2022)

Anexo 2: Área de sombra proyectada



Fuente: elaboración propia en base a (Google Maps, 2022)

Anexo 3: Análisis de importancia relativa del panel solar

	Potencia	Eficiencia	Precio	Total	Ponderación
Potencia	-	3	4	7	33%
Eficiencia	4	-	5	9	43%
Precio	3	2	-	5	24%
Total				21	100%

Fuente: elaboración propia en conjunto con Gerente de Agrofrutícola San Andrés de Cordillerilla LTDA.

Anexo 4: Matriz de ponderación del panel solar

	Ponderación	Monocristalino Sunergy	Monocristalino Risen	Policristalino Sunergy
Potencia	33%	6,16	7	4,76
Eficiencia	43%	6,951960784	7	6,011764706
Precio	24%	4,956822038	4,465385996	7
Total		6,212940821	6,396520475	5,829803922

Fuente: elaboración propia

Anexo 5: Comparación de metodologías según su factibilidad de aplicación

Factibilidad de aplicación							
Metodología	PDCA	CAPDo	DMAIC	Matriz normalizada			Vector promedio
PDCA	1	1	1/3	0,20	0,33	0,14	0,23
CAPDo	1	1	1	0,20	0,33	0,43	0,32
DMAIC	3	1	1	0,60	0,33	0,43	0,45
Total	5,00	3,00	2,33				

Fuente: elaboración propia

Anexo 6: Comparación de metodologías según su tiempo de aplicación

Tiempo de aplicación							
Metodología	PDCA	CAPDo	DMAIC	Matriz normalizada			Vector promedio
PDCA	1	1	3	0,20	0,33	1,29	0,61
CAPDo	1	1	3	0,20	0,33	1,29	0,61
DMAIC	1/3	1/3	1	0,07	0,11	0,43	0,20
Total	2,33	2,33	7,00				

Fuente: elaboración propia

Anexo 7: Comparación de metodologías según su competencia

Competencia							
Metodología	PDCA	CAPDo	DMAIC	Matriz normalizada			Vector promedio
PDCA	1	1	1/2	0,20	0,33	0,21	0,25
CAPDo	1	1	1/2	0,20	0,33	0,21	0,25
DMAIC	2	2	1	0,40	0,67	0,43	0,50
Total	4,00	4,00	2,00				

Fuente: elaboración propia

Anexo 8: Comparación de metodologías según su adaptación al cambio

Adaptación al cambio							
Metodología	PDCA	CAPDo	DMAIC	Matriz normalizada			Vector promedio
PDCA	1	1	1/3	0,20	0,33	0,14	0,23
CAPDo	1	1	1/3	0,20	0,33	0,14	0,23
DMAIC	3		1	0,60	0,00	0,43	0,34
Total	5,00	2,00	1,67				

Fuente: elaboración propia

Anexo 9: Análisis de importancia relativa de la marca

	Ranking Mundial	Representante de marca	Precio	Trayectoria	Garantía	Total	Ponderación
Ranking Mundial	-	4	2	4	4	14	20%
Representante de marca	3	-	2	3	3	11	16%
Precio	5	5	-	4	4	18	26%
Trayectoria	3	4	3	-	5	15	21%
Garantía	3	4	3	2	-	12	17%
Total						70	100%

Fuente: elaboración propia

Anexo 10: Evaluación de inversores

Potencia (W)	Potencia del inversor	Total inversores	Margen de dimensionado	Potencia máxima total (W)	Total paneles	Diferencia paneles
28.000	8kW	3	Subdimensionado	24.000	48	8
Cantidad de paneles	12kW	2	Subdimensionado	24.000	48	8
	20kW	1	Subdimensionado	20.000	40	16
	20kW + 8kW	2	-	28.000	56	0
	12kW + 2x8kW	3	-	28.000	56	0
	12kW + 20kW	2	Sobredimensionado	32.000	64	-8
	8kW + 2x12kW	3	Sobredimensionado	32.000	64	-8

Fuente: elaboración propia

Anexo 11: Ejemplo simulación de generación fotovoltaica inversor 8kW



Fuente: extraído de (Ministerio de Energía, 2022)

Anexo 12: Selección de alternativa de inversor

Potencia	Generación anual (kWh)	Ahorro anual (\$)	Costo (\$)	Payback (años)
8kW	41.324	\$5.661.388	\$3.660.504	0,6465736
12kW	30.993	\$4.246.041	\$3.477.294	0,8189497
20kW + 8kW	36.159	\$4.953.783	\$3.578.992	0,7224765
12kW + 2x8kW	36.159	\$4.953.783	\$4.178.983	0,8435943
12kW + 20kW	41.324	\$5.661.388	\$4.097.471	0,7237573
8kW + 2x12kW	41.324	\$5.661.388	\$4.697.462	0,8297368

Fuente: elaboración propia

Anexo 13: Costos de la planta fotovoltaica

Rango (kWp)	Tipo costo	Porcentaje	Costo (USD)
10 - 30	Módulos fotovoltaicos	34%	12.424
	Inversores	17%	4.166
	Materiales eléctricos y de montaje	24%	7.807
	Instalación	25%	8.132

Fuente: elaboración propia

Anexo 14: Aumento de tasa de cambio

Potencia Nominal :	28	kWp	INFLUYE DIRECTAMENTE EN EL PRECIO DE LA ENERGÍA														
AÑO/ÍTEM	0	1	2	T/C =	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos		7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022	7022
Costos Operac.		488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488
Capital de Trabajo	1554																
UAI		6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534
Impto																	
Activo Fijo	22197																
Instalación y Montaje	7399																
Valor Residual																	3115
RESULTADO =	-31150	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	6534	4770	4770	4770	4770	7885
VAN (TREMA) :		5633	4856	4186	3609	3111	2682	2312	1993	1718	1481	932	804	693	597	851	
VAN (Acum):		-25517	-20661	-16475	-12866	-9755	-7074	-4762	-2769	-1050	431	1363	2166	2859	3456	4307	
TREMA =	16	%															
VAN (16%) =	4307																
TIR =	18,99%																

Fuente: elaboración propia

Anexo 15: Disminución de tasa de cambio

Potencia Nominal :	28	kWp	INFLUYE DIRECTAMENTE EN EL PRECIO DE LA ENERGÍA														
AÑO/ÍTEM	0	1	2	T/C =	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos		8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582	8582
Costos Operac.		488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488
Capital de Trabajo	1899																
UAI		8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094
Impto																	
Activo Fijo	27130																
Instalación y Montaje	9043																
Valor Residual																	3807
RESULTADO =	-38072	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	8094	5909	5909	5909	5909	9716
VAN (TREMA) :		6978	6015	5186	4470	3854	3322	2864	2469	2128	1835	1155	995	858	740	1049	
VAN (Acum):		-31094	-25079	-19894	-15423	-11570	-8248	-5384	-2915	-786	1048	2203	3198	4056	4796	5845	
TREMA =	16	%															
VAN (16%) =	5845																
TIR =	20,01%																

Fuente: elaboración propia

Anexo 16: Aumento de costos de mantenimiento

Potencia Nominal :	28	kWp	Por Costo de Manten.: +10%														
AÑO/ÍTEM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Ingresos		7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	
Costos Operac.		537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	537	
Capital de Trabajo	1708																
UAI		7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	
Impto																	
Activo Fijo	24397																
Instalación y Montaje	8132																
Valor Residual																	3424
RESULTADO =	-34237	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	7336	5355	5355	5355	5355	8779
VAN (TREMA) :		6324	5452	4700	4052	3493	3011	2596	2238	1929	1663	1047	902	778	670	948	
VAN (Acum):		-27912	-22460	-17760	-13709	-10216	-7205	-4609	-2371	-442	1221	2268	3170	3948	4618	5566	
TREMA =	16	%															
VAN (16%) =	7036																
TIR =	20,21%																

Fuente: elaboración propia

Anexo 17: Disminución de costos de mantenimiento

Potencia Nominal :	28	kWp	Por Costo de Manten.: -10%														
AÑO/ÍTEM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Ingresos		7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	7873	
Costos Operac.		439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	439	
Capital de Trabajo	1708																
UAI		7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	
Impto																	
Activo Fijo	24397																
Instalación y Montaje	8132																
Valor Residual																	3424
RESULTADO =	-34237	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	7434	5427	5427	5427	5427	5427	8850	
VAN (TREMA) :		6408	5525	4763	4106	3539	3051	2630	2268	1955	1230	1060	914	788	679	955	
VAN (Acum):		-27828	-22304	-17541	-13436	-9896	-6845	-4215	-1947	8	1238	2298	3212	4001	4680	5635	
TREMA =	16	%															
VAN (16%) =	7580																
TIR =	20,53%																

Fuente: elaboración propia

