



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**PROPUESTA DE PUESTA EN MARCHA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO
PARA ELECTROLIZADOR ALCALINO EN LA PRODUCCION DE
HIDROGENO VERDE PARA LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de ingeniero de ejecución en electricidad

Profesor guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Profesora guía: Alejandra Andrea Tello Zamorano

David Edgardo Barriga Aguilera

Orlando Manuel Zepeda Diaz

Copiapó, Chile, año 2023

DEDICATORIA

Con el fin de demostrar el aprecio y apoyo por todas esas personas que estuvieron presentes en este proceso, dedico este trabajo a mi familia, que fueron un pilar fundamental para mí, fueron ellos los que me entregaron todas las facilidades para poder cumplir mi objetivo, me entregaron siempre ánimo y ganas de continuar con el proceso, siempre queriendo cumplir con sus expectativas y esperanzas puestas en mí, todo esto me motivo en continuar y no rendirme ante nada. A mi compañero de proyecto que pese a las dificultades no nos dejamos vencer y seguimos adelante, por todo el camino recorrido y superado, esto es para ellos.

David Edgardo Barriga Aguilera.

DEDICATORIA

El proceso universitario es sumamente importante, además de hacer posible la obtención de un título, genera un aumento en el conocimiento personal y el aprendizaje de diferentes formas de ver la vida. A pesar de la dificultad que conlleva obtener el título universitario, el proceso hizo conocer personas increíbles que me ayudaron en el día a día.

Me gustaría dedicarle el título a cada una de las personas que me ayudaron en este difícil proceso como lo es ser estudiante universitario, primero mi familia, que siempre estuvo para apoyarme en lo que necesité, el título es de ellos que fueron mi pilar en este proceso, dándome la energía y motivación necesaria para poder culminar con la ingeniería. También me gustaría agradecer a los compañeros que hicieron más entretenido este proyecto de vida, en especial a mi compañero de proyecto con el cual nos hemos ayudado mutuamente para poder lograr este enorme desafío, el cual sé que nos ayudará mucho en el futuro. Por último, agradecer a los profesores y docentes que estuvieron siempre en el proceso, ayudando en cada paso, resolviendo incomodidades y dudas, me enseñaron muchas cosas que me ayudarán para ser un mejor profesional.

Orlando Manuel Zepeda Díaz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer enormemente a todas las personas que estuvieron presentes en el transcurso que realizamos nuestro proyecto de titulación, pero en especial a nuestros profesores guía, la profesora Alejandra Tello y el profesor Juan Madrigal, siempre presentes con consejos y directrices que nos facilitaron el camino hacia el objetivo que tuvimos en mente, por esto y mucho más nos llevamos una enorme satisfacción de su parte, viendo con gusto que son académicos profesionales con vocación y actitud positiva que ayudaran en un futuro a muchos más estudiantes como nosotros. La mano que nos tendieron fue fundamental en el inicio de nuestro proceso, con esto pudimos dar forma y enfoque al proyecto de titulación, terminado así una etapa fundamental en nuestras vidas.

También agradecer a las personas que nos prestaron su ayuda en el lugar donde se realizó el trabajo, a todos los empleados por parte de la universidad que realizaron un gran esfuerzo en las labores que les pedimos, y a las personas presentes en los laboratorios de química y laboratorio de Nanotecnología, Energía y Sistemas complejos, que tuvieron siempre buena disposición hacia nosotros, facilitando nuestro ingreso a sus lugares de trabajo para obtener información.

En la realización de este proyecto tuvimos la suerte de contar con la ayuda de varias personas, agradecerles de todo corazón por su colaboración y sepan que nunca se olvida una buena acción, gracias.

Orlando Manuel Zepeda Díaz.

David Edgardo Barriga Aguilera.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes del proyecto.....	3
1.2 Necesidad del proyecto	3
1.3 Problemática del proyecto	4
1.4 Soluciones propuestas al problema	4
1.5 Estrategias de trabajo	5
1.6 Objetivo general.....	5
1.7 Objetivos específicos	5
1.8 Resumen de capítulos.....	6
CAPÍTULO II	7
MARCO TEORICO	7
2.1. Producción de hidrógeno	9
2.1.1 Producción de H ₂ desde agua.....	10
2.2 Hidrógeno Verde.....	13
2.3 Electrolizador Alcalino	14
2.4 Sistema solar fotovoltaico Off - Grid.....	16
2.4.1 Radiación solar	18
2.4.2 Celda fotovoltaica.....	20
2.4.3 Controlador de carga.....	23
2.4.3.1 Controlador de carga MPPT y PWM.....	23
2.4.4 Almacenamiento energético	24
2.4.4.1 Baterías de Litio.....	25
2.4.5 Inversor	26
2.4.6 Normativas vigentes	29

2.4.6.1 RIC N°9.1/2021	29
2.4.6.2 RIC N°4 DS N°8/2020.....	30
2.4.6.3 RIC N°5.....	30
2.4.6.4 RIC N°6.....	30
2.4.6.5 RIC N°18.....	31
2.4.6.6 RIC N°19.....	31
2.4.7 Protecciones eléctricas en instalaciones fotovoltaicas.....	31
2.4.7.1 Relé de potencia inversa	32
2.4.7.2 Protección de sobre corriente CC	33
2.4.7.3 Fusibles y porta fusibles CC.....	34
2.4.7.4 Interruptor magnetotérmico tetrapolar	35
2.4.7.5 Protección diferencial	35
CAPÍTULO III	37
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y SUS COMPONENTES... 37	
3.1 Información general de la planta	37
3.2 Modulo fotovoltaico del sistema.....	39
3.3 Controlador de carga.....	41
3.4 Sistema de almacenamiento.....	43
3.4.1 Batería Pylontech Litio US3000C	44
3.5 Inversor.....	45
3.6 Posicionamiento de los módulos fotovoltaicos y cableado de conexión	46
3.7 Área destinada a conexión de componentes	47
3.8 Ubicación geográfica del arreglo fotovoltaico y Explorador Solar	49
3.8.1 Radiación solar	51
3.8.2 Generación fotovoltaica	54
3.8.3 Sombras topográficas.....	54
3.8.4 Nubosidad	55
3.8.5 Temperatura	56
3.8.6 Velocidad del viento	58

3.9 Posibles variables que intervengan con el funcionamiento de la planta	58
3.10 Diagrama unilineal del proyecto	59
CAPITULO IV	60
DESCRIPCION DEL SISTEMA DE PRODUCCION DE HIDRÓGENO VERDE	60
4.1 Electrolizador Alcalino	60
4.2 Funcionamiento del equipo	62
4.3 Electrólisis Alcalina	62
CAPITULO V	64
DESCRIPCIÓN DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y ELECTROLIZADOR	64
5.1 Metodología de puesta en marcha.....	64
5.1.1 Mantenimiento al sistema de generación	64
5.1.2 Limpieza y aprovechamiento de espacios destinados a la instalación	68
5.2 Materiales con necesidad de compra.....	70
5.2.1 Descripción de materiales cotizados.....	72
5.3 Calculo de conductores en CC y CA	74
5.4 Protecciones eléctricas	76
5.4.1 Protección DC	77
5.4.1.1 Protección sobre corriente.....	80
5.4.1.2 Fusibles y porta fusibles.....	81
5.4.2 Protección AC	82
5.4.2.1 Interruptor magnetotérmico tetrapolar	83
5.4.2.2 Protección diferencial	84
5.4.3 Banco de condensadores	85
5.5 Trabajo en terreno	87
5.5.1 Paso a paso de la propuesta de puesta en marcha.....	88
5.5.1.1 Recopilación de material necesario	88

5.5.1.2 Realizar cotización y compra de materiales faltantes	90
5.5.1.3 Planificación e intervención de terreno.....	93
5.5.1.4 Dimensionamiento e instalación de equipos.	97
5.5.1.5 Conexionado de equipos	102
5.5.1.6 Medición de seguridad y puesta en marcha.	112
CAPÍTULO VI.....	116
RESULTADOS ESPERADOS DE LA PROPUESTA	116
CAPÍTULO VII	119
CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXO A.....	125
Figura N° A.1: Diagrama unilineal del proyecto.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Principio de funcionamiento de la electrolisis.....	12
Figura N° 2.2: Esquema de un sistema fotovoltaico Off - Grid.	18
Figura N° 2.3: Radiación Solar.....	20
Figura N° 2.4: Esquema de conexión serie y paralelo.	22
Figura N° 2.5: Controladores de carga.....	24
Figura N° 2.6: Características de una batería.	25
Figura N° 2.7: Esquema del interior de una batería Ion-Litio.	26
Figura N° 2.8: Diferentes tipos de inversores fotovoltaicos.....	29
Figura N° 2.9: Relé potencia inversa.	33
Figura N° 2.10: Protección de sobre corriente CC.....	33
Figura N° 2.11: Porta fusible CC.	34
Figura N° 2.12: Fusible CC.	34
Figura N° 2.13: Interruptor magnetotérmico tetrapolar.	35
Figura N° 2.14: Protección diferencial trifásica.	36
Figura N° 3.1: Suciedad presente en toda la instalación.	37
Figura N° 3.2: Módulos fotovoltaicos con abundante polvo en su superficie.....	38
Figura N° 3.3: Modulo fotovoltaico utilizado en la instalación.	39
Figura N° 3.4: Placa técnica del panel fotovoltaico A.	39
Figura N° 3.5: Curva P-V modulo fotovoltaico.....	40
Figura N° 3.6: Curva I-V modulo fotovoltaico.....	40
Figura N° 3.7: Placa técnica del panel fotovoltaico B.	41
Figura N° 3.8: Controlador de carga destinado a la instalación.	42
Figura N° 3.9: Entradas de conexión del controlador de carga.	42
Figura N° 3.10: Datos técnicos del controlador de carga.....	43

Figura N° 3.11: Batería de ciclo profundo.	43
Figura N° 3.12: Datos técnicos de las baterías de ciclo profundo.	44
Figura N° 3.13: Batería de ciclo profundo Pylontech Litio US3000C.	45
Figura N° 3.14: Especificaciones técnicas Batería Pylontech Litio US3000C.	45
Figura N° 3.15: Inversor para instalación fotovoltaica.	46
Figura N° 3.16: Entradas de conexión del inversor de corriente.	46
Figura N° 3.17: Datos técnicos del inversor de corriente.....	46
Figura N° 3.18: Bodega destinada para la instalación de elementos importantes.	48
Figura N° 3.19: Vista general de bodega para instalación fotovoltaica.	48
Figura N° 3.20: Imagen satelital de la planta fotovoltaica.	49
Figura N° 3.21: Ubicación de la planta fotovoltaica con explorador solar.	50
Figura N° 3.22: Datos técnicos proporcionados por explorador solar.	51
Figura N° 3.23: Grafico promedio mensual de insolación incidente.	52
Figura N° 3.24: Grafico promedio de radiación global incidente.....	52
Figura N° 3.25: Grafico promedio de radiación global incidente.....	53
Figura N° 3.26: Variabilidad año a año radiación incidente.	53
Figura N° 3.27: Promedio generación total en cada mes.	54
Figura N° 3.28: Promedio generación para cada hora.	54
Figura N° 3.29: Porcentaje de tiempo con sombras cada mes.....	55
Figura N° 3.30: Porcentaje del año con sombras en cada hora.	55
Figura N° 3.31: Porcentaje del mes con nubosidad diurna.	55
Figura N° 3.32: Porcentaje de la hora con nubosidad.....	55
Figura N° 3.33: Porcentaje de tiempo con nubes para cada hora y mes.	56
Figura N° 3.34: Temperatura promedio mensual.	57
Figura N° 3.35: Temperatura promedio para cada hora.....	57

Figura N° 3.36: Temperatura promedio para cada mes y hora.....	57
Figura N° 3.37: Promedio mensual de la magnitud del viento.....	58
Figura N° 3.38: Promedio de la magnitud del viento para cada hora.	58
Figura N° 4.1: Electrolizador alcalino.....	60
Figura N° 4.2: Filtros de desecado y purificación de oxígeno e hidrogeno.	62
Figura N° 4.3: Proceso de electrolisis alcalina.	63
Figura N° 5.1: Módulos fotovoltaicos antes de limpieza.	65
Figura N° 5.2: Polvo y secreciones pegadas en la superficie del módulo.....	66
Figura N° 5.3: Módulos fotovoltaicos después de limpieza.	66
Figura N° 5.4: Conexiones en el lado posterior de los módulos fotovoltaicos.....	67
Figura N° 5.5: Bodega con materiales de laboratorio ya retirados.	69
Figura N° 5.6: Suciedad dentro de la bodega.	69
Figura N° 5.7: Diagrama conexión mixta arreglo fotovoltaico.	78
Figura N° 5.8: Cotización empresa Sonepar.....	91
Figura N° 5.9: Cotización empresa Gobantes.....	92
Figura N° 5.10: Cotización empresa Dartel.....	93
Figura N° 5.11: Escaleras de acceso a módulos solares.....	94
Figura N° 5.12: Limpieza de módulos solares.....	94
Figura N° 5.13: Esquema de segmentación sobre lugar donde se debe hacer la zanja ...	96
Figura N° 5.14: Bodega de almacenamiento con necesidad de mejoras.....	96
Figura N° 5.15: Dimensiones de gabinete para inversor de 3000 VA.	98
Figura N° 5.16: Dimensiones de soporte para gabinete.	98
Figura N° 5.17: Especificaciones técnicas del inversor según manual.	99
Figura N° 5.18: Dimensiones del controlador de carga.	100
Figura N° 5.19: Medidas del controlador de carga.	100

Figura N° 5.20: Especificaciones técnicas del controlador de carga en el manual.....	101
Figura N° 5.21: Diagrama de bloques inversor.	103
Figura N° 5.22: Diagrama de conexión trifásico para inversor 3000 VA.	103
Figura N° 5.23: Resumen conexiones inversor 3000 VA.	105
Figura N° 5.24: Accesorios necesarios para conexión de inversor.....	106
Figura N° 5.25: Ubicación de batería para conexión con inversor.	107
Figura N° 5.26: Anclaje y tapa de seguridad del inversor.....	107
Figura N° 5.27: Conexión positiva y negativa de batería hacia inversor.....	108
Figura N°5.28: Conexión mediante cable UTP.....	109
Figura N° 5.29: Conexión a tierra del inversor.....	109
Figura N° 5.30: Salida de corriente alterna del inversor.	110
Figura N° 5.31: Cierre cubierta de seguridad.	110
Figura N° 5.32: Esquema de conexión para controlador de carga.....	111
Figura N° 6.1: Sistema de carga de electromovilidad.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Propiedades físicas del hidrogeno molecular (H ₂).	8
Tabla N° 2.2: Comparación energética entre los principales combustibles y equivalencia energética respecto al H ₂	9
Tabla N° 2.3: Emisiones de CO ₂ asociados a la combustión de algunas fuentes de energía a evaluar.	9
Tabla N° 2.4: Modelos gama Piel McPhy.	15
Tabla N° 2.5: Tipos de materiales para módulos fotovoltaicos.	22
Tabla N° 4.1: Características del equipo Electrolizador Alcalino disponible.	61
Tabla N° 5.1: Cotización de materiales con necesidad de compra.	71
Tabla N° 5.2: Características técnicas del módulo.	78
Tabla N° 5.3: Parámetros eléctricos del string.	80
Tabla N° 5.4: Valores técnicos del electrolizador.	83
Tabla N° 5.5: Planificación de materiales necesarios para proyecto	89
Tabla N° 5.6: Características mínimas para canalizaciones subterráneas.	95
Tabla N° 5.7: Detalle de resumen de conexiones.	106
Tabla N° 5.8: Indicaciones generales de error inversor.	112
Tabla N° 5.9: Indicaciones generales de error controlador.	114

RESUMEN

La gran contaminación que se produce a nivel mundial aumenta la necesidad de crear sistemas de generación de electricidad a partir de energías renovables no contaminantes tales como la energía solar, eólica e hidráulica, entre otras. Para la puesta en marcha, se requiere información de los diversos componentes que son necesarios para la instalación del sistema, además de la adecuada conexión entre los equipos para que estos tengan un correcto funcionamiento. El proyecto consiste en una propuesta que tiene el fin de idealizar y describir la puesta en marcha de un sistema fotovoltaico, que al estar en funcionamiento le suministrara energía eléctrica a un equipo electrolizador alcalino, el cual funciona con un método llamado electrólisis, que es uno de los procesos que permite la producción limpia de hidrógeno. Estos equipamientos se encuentran ubicados en el laboratorio de Nanotecnología, Energía y Sistemas complejos de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad De Atacama. Actualmente se encuentran disponibles para su uso, pero hace falta la compra de algunos materiales para el conexionado del sistema completo. La propuesta contempla la puesta en marcha de manera física, materiales requeridos para conexión, las cotizaciones de los materiales faltantes y el paso a paso de la conexión entre sistemas, además se entrega información respecto a las características y equipos principales presentes que se utilizaran en la puesta en marcha de los sistemas, todo lo mencionado anteriormente se basa en normativas eléctricas y normativas de instalaciones fotovoltaicas. Dentro del documento, se desarrollan capítulos donde se describe el sistema fotovoltaico y también el sistema de producción de hidrogeno, el más relevante es aquel donde se entrega las directrices para realizar el proyecto. Una vez interiorizado el proyecto los resultados esperados se darán a conocer de manera general junto a las conclusiones detalladamente. El proyecto es sumamente beneficioso en todos los aspectos, la inversión que se debe realizar será totalmente recompensada con la entrega de nuevos recursos y aplicaciones para la Universidad de Atacama.

ELECTRICIDAD - HIDRÓGENO - ENERGÍA

ABSTRACT

The high level of pollution that occurs worldwide increases the need to create electricity generation systems from non-polluting renewable energies such as solar, wind and hydropower, among others. For start-up, information is required on the various components that are necessary for the installation of the system, as well as the proper connection between the equipment so that they have a correct operation. The project consists of a proposal that aims to idealize and describe the implementation of a photovoltaic system, which when in operation will supply electrical energy to an alkaline electrolyzer, which works with a method called electrolysis, which is one of the processes that allows the clean production of hydrogen. This equipment is located in the Nanotechnology, Energy and Complex Systems laboratory of the Faculty of Natural Sciences of the University of Atacama. They are currently available for use, but some materials are required for the connection of the complete system. The proposed contemplates the physical commissioning, materials required for connection, the quotations of the missing materials and the step by step of the connection between systems, in addition information is provided regarding the characteristics and main equipment present that will be used in the commissioning of the systems, all of the above mentioned is based on electrical regulations and regulations of photovoltaic installations. Within the document, chapters are developed where the photovoltaic system and also the hydrogen production system are described, the most relevant is the one where the guidelines to carry out the project are delivered. Once the project has been internalized, the expected results will be made known in a general way, along with the conclusions in detail. The project is extremely beneficial in all aspects, the investment that must be made will be fully rewarded with the delivery of new resources and applications for the University of Atacama.

ELECTRICITY - HYDROGEN - ENERGY

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estado actual del mundo, donde la demanda energética es cada vez mayor, con una población que se aferra a un estilo de vida poco sustentable, sin duda, acrecienta en pasos gigantescos el cambio climático y con él, sus consecuencias, ingiriendo los recursos naturales y contaminando la atmosfera. Dado este escenario, se hace clara la necesidad que existe de desarrollar procesos eficientes y libres de contaminación, sobre todo en el sector de energía. Bajo la tela de esta problemática surge la investigación y aplicación de modernas fuentes de energía, tomando protagonismo dentro de las últimas décadas las energías renovables no convencionales, conocidas por sus siglas ERNC, de las cuales Chile posee un potencial enorme para su aplicación, siendo las más utilizadas la energía solar, la energía eólica y la energía hidroeléctrica, ya que, el país se considera alto en recursos naturales, tiene un gran potencial en impacto tecnológico.

Las energías renovables en Chile se han vuelto fundamentales, dado a que se producen a través de fuentes naturales inagotables, lo que permite la generación de energía de forma natural, no contaminante. En la actualidad el país cuenta con un 48,7% de energía renovable incluida en el sistema eléctrico nacional y se espera finalizar el año con el 50% de energía renovable en el sistema [1]. Dentro de las energías renovables utilizadas con más aporte para llegar a estos porcentajes se encuentran la energía hidroeléctrica, energía solar, y energía eólica, mientras la que cuentan con menor aporte son las energías geotérmicas y de biomasa.

Aunque se buscan nuevas fuentes de energías renovables para en un futuro depender 100% de ellas, aún se deben utilizar energías no renovables, que en su mayoría son altamente contaminantes en su proceso de producción y en su uso a través de su combustión. A pesar de la contaminación que estas generan, son necesarias para el funcionamiento de gran parte de procesos industriales, además, están presentes en la vida cotidiana de los humanos, en estufas, cocinas y vehículos, entre otras cosas y es aquí donde radica, la urgencia de transitar hacia una matriz energética más limpia.

Una de las fuentes de energía que más será utilizada en el mundo es el hidrógeno, ya que este elemento es el más abundante en el planeta. Este puede ser encontrado como átomo y como molécula, en su estado molecular posee unas características energéticas excepcionales, sin embargo, este no se encuentra de manera pura en la naturaleza ya que se encuentra siendo parte de otros compuestos y debe ser producido a partir de otras fuentes de energía tales como gas natural, refinación de petróleo, carbón, electrolisis, biomasa, entre otras.

El proceso para la producción de hidrógeno tiene una alta demanda de energía y necesita una logística avanzada para su almacenamiento y transporte, sin embargo, es un combustible prometedor dado su gran poder energético más alto que los derivados de los combustibles fósiles. Su producción ha sido en su mayoría realizada en base a hidrocarburos que producen una gran cantidad de gases de efecto invernadero que contaminan en gran medida la atmósfera.

El avance tecnológico cada vez es más amplio, y en este sentido, ha permitido utilizar las ERNC para producir “hidrógeno verde”, esta fuente de energía no contaminante se produce en base a una fuente de energía renovable no convencional y agua, haciendo que el proceso de su producción sea limpio y sin emisiones de gases contaminantes, lo que puede ser visto como una forma de descarbonizar gran parte de las industrias mundiales, minería, químicas, etc.

El hidrógeno verde es un recurso que tiene un potencial increíble en varias áreas de la industria mundial, no solo se proyecta como una tecnología asociada a la producción de electricidad, también sustituye el depender de combustibles fósiles en procesos que requieran la utilización de una energía por la utilización de una fuente no contaminante, puede ser utilizado como combustible limpio y eficiente para sustentar vehículos, procesos industriales y usos domésticos entre otros. Siendo los procesos industriales el cambio más importante ya que estas industrias son altamente dependientes de combustibles.

1.1 Antecedentes del proyecto

El proyecto se enfoca en crear una propuesta de instalación eléctrica que permita la puesta en marcha de un sistema fotovoltaico que posteriormente debe ser conectado a un equipo electrolizador alcalino, para gestionar la producción de hidrógeno verde dentro de la Universidad de Atacama.

Según diversas fuentes bibliográficas, el hidrógeno verde ha demostrado ser un recurso prometedor para el avance tecnológico, que permitiría reemplazar los combustibles fósiles por esta fuente de energía no contaminante, además se cree que su adopción a nivel mundial aumentará en un futuro cercano.

Su generación mediante fuentes de energías renovables no convencionales, como los sistemas solares fotovoltaicos, presenta un potencial significativo para mejorar la eficiencia energética y contribuir a la descarbonización de los procesos industriales. Por lo tanto, este proyecto se enmarca en la búsqueda de soluciones sostenibles y ambientales amigables en el sector energético e industrial.

1.2 Necesidad del proyecto

Si bien existe un gran problema con la contaminación ambiental y el daño irreparable que se hace con la liberación de gases contaminantes, hoy en día hay métodos de producción de energía que pueden reemplazar los procesos actuales, es aquí donde el proyecto juega un papel fundamental, ya que se tiene al alcance la producción de energía solar y con ella la producción de hidrógeno verde, que tiene el potencial de sustituir combustibles fósiles, almacenar energía y no emitir gases de efecto invernadero. El beneficio presente en estos recursos es muy amplio y la utilidad que se le pueda dar puede generar nuevas oportunidades en la universidad, para estudiantes y docentes. Es clave aplicar un método sustentable y eficiente para aportar a la descarbonización de los procesos industriales.

1.3 Problemática del proyecto

El inevitable agotamiento de los combustibles fósiles ha puesto en marcha la búsqueda de nuevos avances tecnológicos, con el fin de reemplazar las fuentes actuales de energía. Muchas ERNC se implementan día a día buscando disminuir el impacto ambiental, el daño que se ha producido por utilizar estas fuentes de energía contaminantes a propulsado la innovación en movilidad basada en energías limpias, debido a esto surgen gran cantidad de formas para producir energías mucho más eficientes y sin liberar gases contaminantes. Esta es la razón de la proliferación de muchos proyectos al día de hoy, que buscan dejar su marca apoyando con la descarbonización de procesos industriales u otras actividades en las que se pueda aplicar energías ERNC. Este proyecto contribuye con la mitigación de la problemática mundial del cambio climático y se enfoca en introducir una mentalidad nueva, con visión a futuro, pensando en las nuevas aplicaciones que se le dará a las ERNC.

1.4 Soluciones propuestas al problema

Con la finalidad de contribuir con la mitigación del cambio climático y la descarbonización, se propone esta tesis. Se realiza una propuesta de puesta en marcha de sistemas eléctricos para la producción de hidrógeno verde, que servirá para facilitar el proceso en la planificación de materiales necesarios y en la posterior instalación de estos componentes para que se pueda concretar con un perfecto funcionamiento por parte de los equipos fotovoltaicos y electrolizador.

Para realizar de manera íntegra el desarrollo de la propuesta, se deberán aplicar todo el conocimiento adquirido en los años de estudios dentro de la Universidad de Atacama acompañado de la experiencia técnica adquirida en los laboratorios prácticos. Por otra parte, los recursos económicos se deberán gestionar con la Universidad de Atacama de tal manera que sea posible la realización del proyecto.

1.5 Estrategias de trabajo

Para que el proyecto se pueda realizar de manera efectiva se debe recopilar toda la información existente de los equipos que se manipularan en el proyecto, como también todo lo legal y normativo relacionado a ellos, desde estos puntos se evaluarán las mejores alternativas para llevar a cabo todo el proceso. Una vez teniendo claro los métodos que se utilizarán, se pondrá en práctica todo lo aprendido en los años de estudio cursados y la experiencia adquirida en el ámbito laboral, además se realizarán inspecciones de terreno para complementar información y se corregirán todos los factores que pueden afectar con la correcta realización de esta iniciativa.

1.6 Objetivo general

Realizar una propuesta para una futura puesta en marcha de un sistema fotovoltaico de 10 kW conectado a un electrolizador alcalino con el fin de gestionar la producción de hidrógeno verde en la Universidad de Atacama.

1.7 Objetivos específicos

- ✚ Describir un sistema fotovoltaico y sus componentes.
- ✚ Describir el sistema de producción de hidrógeno verde desde el proceso de electrolisis alcalina, alimentado por energía solar fotovoltaica.
- ✚ Describir los pasos para poner en marcha el sistema fotovoltaico y posterior conexión con equipo electrolizador alcalino.
- ✚ Analizar los resultados de la propuesta.

1.8 Resumen de capítulos

En el **Capítulo II:** Marco teórico, este capítulo plantea todo el fundamento teórico del proyecto en general, corresponde a conceptos, conocimientos, aplicaciones, normativas, pliegos técnicos, etc.

En el **Capítulo III:** Descripción del sistema fotovoltaico y sus componentes, se describe por partes el sistema fotovoltaico instalado actualmente de forma detallada.

En el **Capítulo IV:** Descripción del sistema de producción de hidrógeno verde, en este capítulo se entrega información sobre la producción de hidrógeno verde a través de un equipo de electrólisis alcalina, detallando el proceso que permite la obtención de este recurso.

En el **Capítulo V:** Descripción de puesta en marcha del sistema fotovoltaico con electrolizador, aquí está el paso a paso de todos los procesos que se deben llevar a cabo, de manera física, para poner en marcha el sistema fotovoltaico y posterior conexión de este, con el electrolizador alcalino.

En el **Capítulo VI:** Resultados hipotéticos esperados de la propuesta, se estudia y analiza posibles mejoras y acciones que se deben tomar una vez la puesta en marcha se completará, también se entrega recomendaciones y sugerencias de mantenimiento.

En el **Capítulo VII:** Conclusiones, he aquí todo el resultado final de la propuesta, se plasma el análisis de este estudio y se entregan respuestas al planteamiento de los objetivos propuestos, finalizando con un análisis general.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

En el presente capítulo se dará a conocer los conceptos principales, recursos e implementos que se utilizarán durante el proyecto, como también las normativas y leyes más relevantes en torno a la puesta en marcha de un sistema fotovoltaico. Las instalaciones hoy en día cuentan con estándares de calidad que se deberán cumplir para poder realizar el proyecto, al tener la característica de propuesta, todos estos aspectos deberán cumplirse al pie de la letra como indique la normativa vigente correspondiente. Algunos de estos documentos son, instrucción técnica general RIC N°9.1/2021, pliego técnico normativo RIC N°4, RIC N°5, RIC N°6, RIC N°18 y RIC N°19, entre otros. La instalación fotovoltaica al ser de tipo off-grid y tener la característica de autogeneración deberá ser declarada ante la SEC mediante un TE1, correspondiente al tipo de instalación a la que pertenece. Estos aspectos se detallarán más adelante.

El hidrógeno, es el elemento más liviano de la tabla periódica con masa atómica de 1,00797, es uno de los elementos más simples y abundantes dentro del planeta tierra, constituye aproximadamente el 75 % de la materia del mundo, aunque físicamente no se encuentra de forma pura, ya que se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno o el carbono, por lo que no puede tomarse directamente de la naturaleza. El hidrógeno tiene un símbolo químico (H), en su fórmula molecular (H_2) es gaseoso, no tiene olor y tampoco color, y es un combustible que produce en grandes instalaciones centrales o en pequeñas unidades distribuidas cerca del sitio de utilización. La popularidad del hidrógeno gaseoso ha aumentado significativamente en los últimos años debido a una serie de factores, uno de los más importantes es su proceso de combustión, en el que se produce mucha energía, siendo su subproducto, vapor de agua. Si el H_2 es producido desde ERNC no produce sustancias a base de carbono, por lo que se considera una alternativa neutra en carbono a los combustibles fósiles tradicionales, que tienden a producir gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), o el monóxido de carbono (CO), durante la combustión. La Tabla N° 2.1 resume las principales propiedades físicas del hidrógeno molecular.

Una cadena de producción de H₂, generalmente consta de tres partes principales: manufactura, almacenamiento y transporte. Además, se incluyen aplicaciones primarias tanto para sistemas eléctricos como para uso de H₂ en diversas industrias. En la Tabla N° 2.1, también se destaca su uso como combustible, como se muestra, ya que su alto calor de combustión da como resultados equivalentes energéticos mayores para H₂ en comparación con combustibles fósiles que se muestran en la Tabla N° 2.2. Sin embargo, si bien no hay emisiones directas durante la combustión, el resto del proceso de hidrógeno puede producir emisiones, por lo que las emisiones de hidrógeno deben considerarse de acuerdo con el ciclo de vida.

Tabla N° 2.1: Propiedades físicas del hidrogeno molecular (H₂).

Parámetro	Valor	Unidad
Peso molecular	$2,016 \times 10^{-3}$	$Kg \times m^{-3}$
Punto de fusión	14,1	K
Punto de ebullición	20,3	K
Densidad/ Sólido	89	$Kg \times m^{-3}$
Densidad/ Liquido	71	$Kg \times m^{-3}$
Densidad/ Gaseoso	$8,99 \times 10^{-2}$	$Kg \times m^{-3}$
Conductividad térmica a 25°C	$1,842 \times 10^{-1}$	$WxK^{-1} \times m^{-1}$
Calor bruto de combustión	$2,650 \times 10^5$	$KJxKg^{-1} \times mol^{-1}$
Calor neto de combustión	$2,419 \times 10^5$	$KJxKg^{-1} \times mol^{-1}$
Temperatura de auto ignición	858	K
Rango de inflamabilidad en oxígeno	4-94	%
Rango de inflamabilidad en aire	4-74	%

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2020.

Tabla N° 2.2: Comparación energética entre los principales combustibles y equivalencia energética respecto al H₂.

Combustible (unidad)	Poder calorífico (kWh/unidad)	Equivalencia energética (unidad/kg H ₂)
H₂ (kg)	33,3	1
Diésel (lt)	10,2	3,3
Gas Natural (m³)	9,6	3,5

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2020.

En la Tabla N° 2.3 se mencionan algunos combustibles asociados a su cantidad de emisiones de CO₂, producidas por la combustión de estos combustibles, demostrando los beneficios del uso de H₂, al observarse cero emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Si bien no hay emisiones directas de CO₂ durante la combustión de H₂ en su aplicación, en el proceso de producción de este, pueden producirse emisiones si este es fabricado de fuentes de energías no renovables.

Tabla N° 2.3: Emisiones de CO₂ asociados a la combustión de algunas fuentes de energía a evaluar.

Combustible (unidad)	Emisiones (kg CO ₂ / Unidad)
H₂ (kg)	0
Diésel (lt)	3,18
Gas Natural (m³)	1,97

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2020.

2.1. Producción de hidrógeno

La combustión del hidrógeno gaseoso libre de carbono es una parte importante del plan global de descarbonización, el hidrógeno molecular se encuentra en pequeñas cantidades en la naturaleza y mayormente en cavernas subterráneas, por lo que debe obtenerse desde otros compuestos, que requieren energía para su obtención. Ciertas consideraciones son necesarias para producirlo.

El hidrógeno se puede obtener de muchas formas diferentes, algunas de las cuales son más eficientes que otras. Un factor clave para que el hidrógeno gaseoso encaje en el modelo de energía limpia es que todo el ciclo del gas esté libre de carbono. Para ello, es importante obtener energía de recursos con poca o ninguna emisión de gases de efecto invernadero u otros residuos contaminantes. En este sentido, la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables como la solar y la eólica es una alternativa atractiva.

Una de las alternativas a nivel industrial es la producción de hidrógeno gaseoso desde agua por electrólisis. Aunque también, existen otros métodos igualmente efectivos, que se utilizan actualmente en la industria. Los principales se mencionan a continuación:

- ✚ Reformado por vapor a partir de gas natural.
- ✚ Descomposición catalítica a partir de gas natural.
- ✚ Oxidación parcial de aceites pesados.
- ✚ Gasificación del carbón.
- ✚ Procesos fotoquímicos, fotoelectroquímicos y fotobiológicos.

2.1.1 Producción de H₂ desde agua

Existen procesos que utilizan principalmente agua como materia prima para la producción de hidrógeno. Para ello hay que separar las moléculas de agua inyectándole la energía necesaria para que se produzca la fotólisis. Esta energía se puede añadir en forma de calor o electricidad.

Por efecto de la fotólisis (rompimiento de las moléculas de agua), el único subproducto que se genera es vapor de agua, obteniendo como productos principales oxígeno e hidrógeno gaseosos, este último puede ser utilizado para otros usos que van desde la química industrial hasta la optimización de la combustión. Sin embargo, estos procesos requieren energía, y si esta energía no se obtiene de forma libre de carbono, el ciclo del hidrógeno generado dejará de cumplir las expectativas deseadas de carbonneutralidad.

En lo referido a métodos de producción de hidrógeno en base a fuentes renovables de energía, y ligados a la implementación masiva de plantas de generación de energía renovable de implementación a nivel mundial, la electrolisis del agua combinada con esta energía renovable, solar, eólica, mareomotriz, entre otras, es uno de los métodos de producción que presenta mayor interés por parte de las industrias y administración de diferentes países. La electrólisis es un proceso electroquímico, el cual, luego de un proceso electrónico obtiene hidrógeno y oxígeno gaseoso a través de la descomposición de las moléculas de agua (H₂O). Es un método que permite producir hidrógeno de manera limpia siempre y cuando la energía utilizada para el proceso provenga de fuentes renovables, como fue ya mencionado. Su importancia generalizada frente al resto de tecnologías de producción de hidrógeno renovables se debe principalmente:

- ✚ Este método utiliza electricidad como fuente primaria para realizar la ruptura de la molécula de agua, abarcando una gran disponibilidad de aplicación para las diferentes instalaciones de producción de energías renovables.
- ✚ El proceso de electrólisis tiene la capacidad de operar en cargas parciales y variar la carga de manera muy rápida, lo que dispone una gran flexibilidad de acoplamiento.
- ✚ El electrolizador tiene la característica de estar compuesto de sistemas modulares que permiten un escalado desde bajas potencias hacia altas potencias.
- ✚ El electrolizador tiene la posibilidad de formar parte de un sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno, lo que permite manipular su gestión y aplicación en micro redes y redes inteligentes.
- ✚ El hidrógeno que resulta de este método es generalmente de alta calidad y pureza, totalmente apto para su uso en todas las aplicaciones industriales, incluidas las de pilas de combustible.
- ✚ Se trata de una tecnología disponible en el mercado actual con costos aceptables y eficientes, mucho menores que el resto de las tecnologías en desarrollo.

La electrólisis es un proceso electroquímico que consiste en someter a las moléculas de agua a un campo eléctrico externo que entregue una energía mayor, que el campo eléctrico interno de la misma molécula, obteniendo así la separación interna de las moléculas de agua dando como resultado hidrógeno y oxígeno de forma gaseosa por separados.

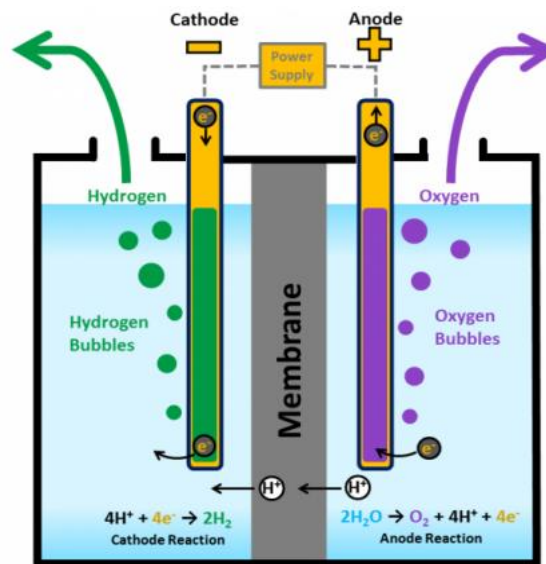


Figura N° 2.1: Principio de funcionamiento de la electrólisis.

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2020.

Para llevar a cabo el proceso de electrólisis, se sumergen dos electrodos, sujetos a una diferencia de potencial, en una solución acuosa que debe tener un electrolito disuelto para permitir el transporte de las cargas eléctricas, como se muestra en la figura N° 2.1. De esta manera, los electrodos crean un campo eléctrico lo suficientemente fuerte para separar H₂O en los iones (O⁻ y H⁺) a través de un mecanismo electródico que presenta semirreacciones de oxidación y reducción, las cuales se combinan para formar la reacción global que tiene como producto gases (O₂ y H₂). Una ventaja de los métodos basados en agua es que no involucran productos basados en carbono.

2.2 Hidrógeno Verde

Es un gas sin olor, ni color, al cual se le da este nombre tras su producción desde métodos que no generen contaminantes, es un gas que no posee carbono, por lo cual no existe su emisión. La emisión de carbono se genera cuando se quema un combustible fósil base de hidrocarburos, lo cual es altamente contaminante, la mayoría de los combustibles utilizados en la actualidad, contienen esta materia.

Una de las maneras de obtención de hidrógeno verde es a partir del agua a través de un proceso de electrólisis combinado con una ERNC. Como ya se mencionó, la electrolisis consta en la ruptura de moléculas de H_2O separándolas en hidrógeno (H_2), y moléculas de oxígeno (O_2). Este proceso de extracción de hidrógeno necesita energía eléctrica, por lo que se utiliza energía renovable para su alimentación energética, obteniendo así el nombre de hidrógeno verde, al no generar contaminación ni en su producción, ni al ser utilizado en alguna aplicación, ya que el proceso de combustión H_2 tiene como producto vapor de agua y energía utilizable.

Este producto sirve como combustible sustentable para equipos de transporte, para el almacenamiento de energía eléctrica y para equipos de calefacción, además sirve para procesos químicos en la industria del metanol, amoniaco, propano entre otros, sin emisión de compuestos a base de carbono.

El hidrógeno verde es una posible respuesta a una gran cantidad de aplicaciones diarias contaminantes, sirve para generar energía, almacenar energía, gases, metales, entre otros y lo mejor es que se puede obtener en cualquier lugar siempre y cuando se cuente con los equipos necesarios, además el proceso de extracción genera nula contaminación y en caso de generar es una cantidad mínima, no destacable.

Las ventajas que tiene la implementación de hidrógeno verde hoy en día son muy amplias, por su cantidad de posibles usos, las ventajas más destacables son:

- ✚ Hidrógeno sumamente puro.
- ✚ No contamina.
- ✚ Se puede producir en casi cualquier lugar.
- ✚ Si es usado en industrias, ayuda a la descarbonización.
- ✚ En la actualidad tiene un bajo costo su producción en comparación con otras energías, el único costo importante, sería la compra e implementación de los equipos de electrolisis y la fuente para producir electricidad.

La generación de hidrógeno verde es fundamental para el avance tecnológico, ya que ayuda en gran cantidad de tareas, siendo amigable con el medio ambiente y sumamente productivo, aunque para que el proceso no sea contaminante debe generarse a partir de energía eléctrica renovable, como energía eólica o solar, sino no se considera verde.

2.3 Electrolizador Alcalino

Una de las piezas o equipos más importantes para la generación de hidrógeno es el electrolizador. Este equipo a través de energía eléctrica, utilizando un proceso electroquímico llamado electrólisis, es capaz de separar las moléculas del agua (H_2O), resultando oxígeno e hidrógeno altamente puro, como fue mencionado previamente.

El electrolizador que se tiene disponible en el laboratorio es de tipo alcalino. Estos para su funcionamiento usan agua y un electrolito alcalino, este electrolito acuoso puede ser hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH). Cuando se aplica electricidad a las celdas de electrólisis, los iones se mueven entre el cátodo hasta el ánodo, donde se crean las burbujas de gas de oxígeno. En el otro electrodo, por su parte se genera gas H_2 . El funcionamiento de estos electrolizadores genera hidrógeno de pureza 99%.

El electrolizador alcalino disponible, es diseño de la empresa McPhy, que es una empresa que ha concentrado su experiencia en la energía limpia, particularmente en

hidrógeno verde durante aproximadamente un siglo. Esta empresa tiene el objetivo de “contribuir al despliegue de energía limpia haciendo que las aplicaciones de hidrógeno sean accesibles en todo el mundo”.

Tras la búsqueda de innovación para concretar la generación de hidrógeno verde se crearon equipos con menos dificultad en su traslado y su instalación, con esto se busca poder facilitar el avance tecnológico expandiendo la generación de este recurso y así a través de la obtención de este producto poder dar el uso requerido por la persona o empresa que adquiera uno de estos equipos.

Los equipos que distribuye esta empresa como generadores de hidrógeno y oxígeno, generadores de nitrógeno, además de accesorios, cubren una amplia gama de aplicaciones como soldaduras, joyería, combustibles, fertilizantes, gases, metalurgia además tratamientos térmicos. La tabla N° 2.4 detalla los diferentes modelos de la marca.

Tabla N° 2.4: Modelos gama Piel McPhy.

Serie	Presión (bar)	Rango de salida de H ₂ (Nm ₃ /h)	Rango de salida de O ₂ (Nm ₃ /h)	Potencia eléctrica, carga nominal (kW)
Baby	1	0,4	0,2	3
P	1 - 2,5	1 - 1,16	0,5 - 0,8	6 - 9
M	1 - 2,5	2,4 - 4,4	1,2 - 2,2	14 - 26
H	4 - 8	3 - 10	1,5 - 5	1,8 - 60

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2020.

Ventajas del modelo Piel McPhy:

- ✚ Da solución e innovación, ya que produce hidrógeno y oxígeno en cualquier lugar donde se instale, tiene baja demanda y es una inversión a largo plazo, ya que no es costosa la producción de los gases, solo la compra inicial del equipo.
- ✚ Industria 4.0, monitoreo y control remoto a través de la interfaz hombre-máquina, esta interfaz facilita la operación diaria del equipo.

- ✚ Separa moléculas de oxígeno e hidrógeno quedando los 2 componentes, de forma particular como gases puros.
- ✚ Respeto el medio ambiente, aumenta la flexibilidad reduciendo tiempos, aumentando considerablemente la eficiencia y mayor cantidad de producto generado a través del sistema de hidrógeno.

El equipo con el cual cuenta la Universidad de Atacama, en el laboratorio de nanotecnología, energía y sistemas complejos del departamento de química y biología es de la gama Piel, esta gama cuenta con electrolizadores perfectamente adaptados para cumplir con los requisitos de las industrias ligeras, en concreto es el McPhy Piel 1.5 este es un generador de gas de hidrógeno y oxígeno, su nivel de trabajo es de grado industrial ligero, además cuenta con un sistema automatizado que permite optimizar los procesos que se realizarán durante la producción de hidrógeno verde, agilizando aún más su manipulación.

2.4 Sistema solar fotovoltaico Off - Grid

La generación directa de electricidad a partir de la luz se denomina efecto fotovoltaico. La existencia de este fenómeno fue descubierta en 1839 por el físico Antoine Becquerel. Para lograr esto, se necesitan materiales que puedan absorber la luz solar y convertir la energía radiante absorbida en energía eléctrica, un ejemplo de esto son las células solares a base de silicio.

La corriente que puede producirse en el dispositivo (celda solar), consiste en un flujo de electrones que ocurre cuando hay una diferencia de potencial. Toda la materia está constituida por átomos que albergan en su interior electrones que corresponden a una de las tantas partículas subatómicas que se encuentran en el interior de estos átomos. Un átomo consiste en un núcleo cargado positivamente rodeado por una nube de electrones cargados negativamente.

En contexto de lo anterior, existen materiales conductores de electricidad, según su distribución electrónica atómica, por ejemplo, el cobre y otros elementos metálicos, son conductores de electricidad dada su distribución, donde las bandas de energía de valencia y conducción se encuentran una al lado de la otra, lo que permite movilidad libre de electrones en el material, logrando así que este sea conductor.

En el caso de materiales semiconductores, ellos no son ni conductores ni aislantes. Estos se comportan presentando una separación energética entre las bandas de conducción y la banda de valencia, esta separación es llamada banda prohibida, que es el caso de celdas solares fotovoltaicas a base de silicio, el cual necesita de energía proveniente de la radiación electromagnética (Fotones) para permitir el paso de electrones desde la banda de valencia rumbo a la de conducción con la finalidad de generar corriente eléctrica que circule por el circuito.

Una célula fotovoltaica de silicio u otro material semiconductor como CdTe, sólo puede generar electricidad cuando se cumplen tres condiciones:

- ✚ Se ha de poder modificar el número de cargas positivas y negativas.
- ✚ Se han de poder crear cargas que permitan la aparición de una corriente.
- ✚ Es preciso que se establezca una diferencia de potencial o campo eléctrico.

Un sistema fotovoltaico consiste en una serie de dispositivos interconectados que suministran energía eléctrica a una carga o equipo determinado. Se entiende por cargas los elementos de generadores, acumuladores y cargas. Es difícil calcular el consumo de energía exacto de las cargas individuales, por lo que se debe tener en cuenta márgenes de consumo respecto al dimensionamiento del sistema que se está realizando.

Dentro del sistema, el módulo fotovoltaico recibe directamente la luz solar, la cual mediante el efecto fotovoltaico se convierte en energía eléctrica.

El controlador de carga, que es alimentado por el panel, regula el voltaje de carga en las baterías protegiéndolas de sobrecargas o sobre descargas prolongando su vida útil, adema de controlar los tiempos de consumo. Las baterías, a su vez, alimentan los inversores, el cual se encarga de convertir el voltaje de 12, 24, 48 V de corriente continua (CC), entregado por las baterías, a un voltaje de 220 V de corriente alterna (CA).

Los sistemas fotovoltaicos aislados dependen de la energía recolectada de módulos y baterías. Estos sistemas suelen estar respaldados por un generador para evitar que el sistema se quede sin energía en caso de emergencia. Por lo general se trata de sistemas de baja potencia, utilizados para cubrir el consumo energético doméstico. No suministran su energía a la red y se concentran exclusivamente en el autoconsumo.

Al instalar un sistema de batería, es necesario conectar un regulador que controle la entrada y salida de energía de la batería para no dañar la batería. (Ver la figura N° 2.2).

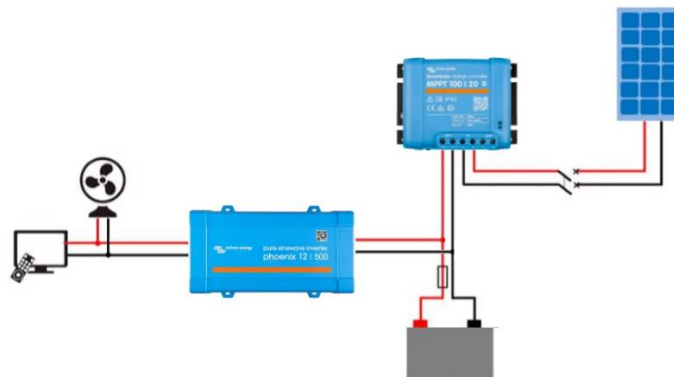


Figura N° 2.2: Esquema de un sistema fotovoltaico Off - Grid.

Fuente: ADN Solar Energías Renovables.

2.4.1 Radiación solar

Esta hace referencia a la radiación electromagnética que es emitida por el sol y llega a la atmosfera de nuestro planeta considerablemente debilitada, 1360 W/m^2 aproximadamente, una vez atravesada la atmósfera la radiación sufre una atenuación, por lo que en la superficie terrestre la radiación es de 1000 W/m^2 aproximadamente.

El valor de la radiación solar dependerá del momento del día en que se realice la medición, las condiciones atmosféricas y la ubicación.

Se destacan tres tipos de radiación solar según como incida está en la superficie del planeta:

- ✚ Directa, aquella recibida desde el sol sin que se desvíe en su paso por la atmosfera.
- ✚ Difusa, aquella que sufre cambios en su dirección debido a las condiciones de la atmosfera.
- ✚ Albedo o reflejada, aquella radiación que es directa o difusa y se recibe por la reflexión desde el suelo u otras superficies.

También existen dos conceptos relacionados a la radiación:

- ✚ Irradiancia: Potencia de la radiación solar por unidad de área (W/m^2)
- ✚ Irradiación: Energía por unidad de área (Wh/m^2)

El concepto de constante solar hace referencia a la radiación que llega fuera de la atmosfera, la cual tiene un valor medio de $1360 \text{ W}/\text{m}^2$, su máximo valor se alcanza en el punto de la tierra más cercano al sol, llamado perihelio, es de $1395 \text{ W}/\text{m}^2$, su valor más bajo lo alcanza en el afelio, el punto más lejano al sol, con un valor de $1308 \text{ W}/\text{m}^2$. (Ver la figura N° 2.3).

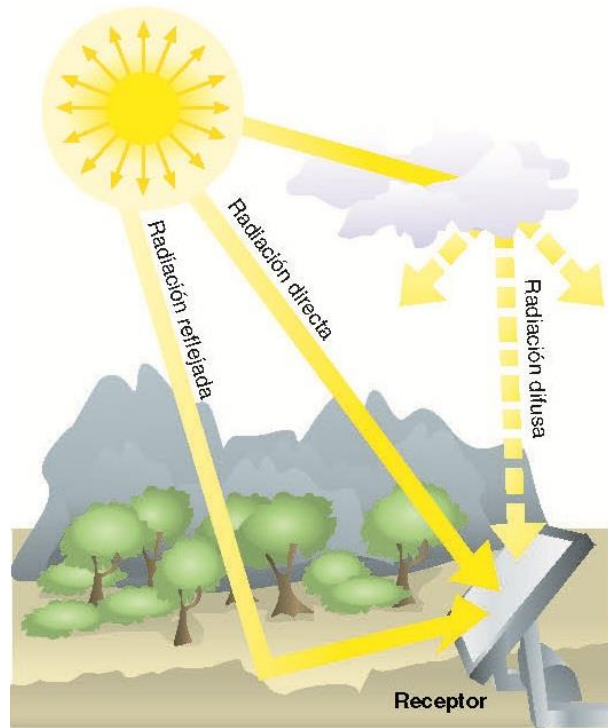


Figura N° 2.3: Radiación Solar.

Fuente: Solar Action 2013.

2.4.2 Celda fotovoltaica

El principal componente para el sistema fotovoltaico es el generador, que recibe el nombre de “celda fotovoltaica”. Esta se caracteriza por convertir directamente en energía eléctrica los fotones incidentes que provienen de la luz solar. Se basa en el “efecto fotovoltaico”.

Las células solares utilizan el efecto fotovoltaico para convertir la luz solar directamente en electricidad. La luz está compuesta de fotones. Cuando un fotón de suficiente energía golpea un átomo de un material semiconductor, el átomo absorbe la energía del fotón, dejando un electrón del material en un estado excitado con la energía absorbida, permitiendo que este pase a la banda de conducción, permitiendo así, la libre circulación. La eficiencia de las celdas solares es muy importante para reducir el costo de un sistema fotovoltaico, su correcta selección es fundamental para el propósito que se le quiere dar al sistema.

Cada módulo fotovoltaico tiene una placa que indica sus propiedades físicas y eléctricas. Las propiedades físicas son la carcasa, el encapsulado, la parte posterior, el marco de soporte, las dimensiones, el peso y la garantía. En base a un catálogo de módulos fotovoltaicos, los parámetros eléctricos característicos para un determinado nivel de radiación son: Potencia, número de celdas conectadas en serie, eficiencia del módulo, corriente de punto de máxima potencia, tensión de punto de máxima potencia, corriente de cortocircuito, tensión de circuito abierto, coeficiente de temperatura y tensión máxima del sistema. En la tabla N° 2.5 se muestran características y tipo de tecnologías.

La potencia máxima que puede entregar un módulo fotovoltaico se puede saber en base a las siguientes Condiciones Estándar de Prueba (STC: Standard Test Conditions):

- ✚ Radiación 1000 W/m^2 .
- ✚ Temperatura de la célula fotovoltaica 25°C .
- ✚ Masa de aire ($AM=1,5$).

Bajo estas condiciones se pueden medir los parámetros de corriente de corto circuito (I_{sc}) y tensión de circuito abierto (V_{oc}).

- ✚ **Isc:** Refiere a la corriente máxima en amperios que puede producir un módulo cuando a este se le conectan los terminales positivo y negativo del mismo entre sí, sin tener resistencia alguna. El valor depende de la superficie y la radiación incidente en el módulo.
- ✚ **Voc:** Refiere a la tensión máxima que produce el módulo cuando a este no hay conectada ninguna carga, es decir los terminales positivo y negativo se encuentran abiertos.

Existen tres opciones de conexión: conexión en paralelo, conexión en serie y conexión mixta (serie - paralelo). En general, no se conecta módulos con diferentes características o módulos de diferentes fabricantes.

Se dice que cuando una de las celdas de un módulo fotovoltaico está dañada o sombreada, puede ocasionarse un punto caliente, dañando el módulo o inutilizando el conjunto de estos. (Ver la figura N° 2.4).

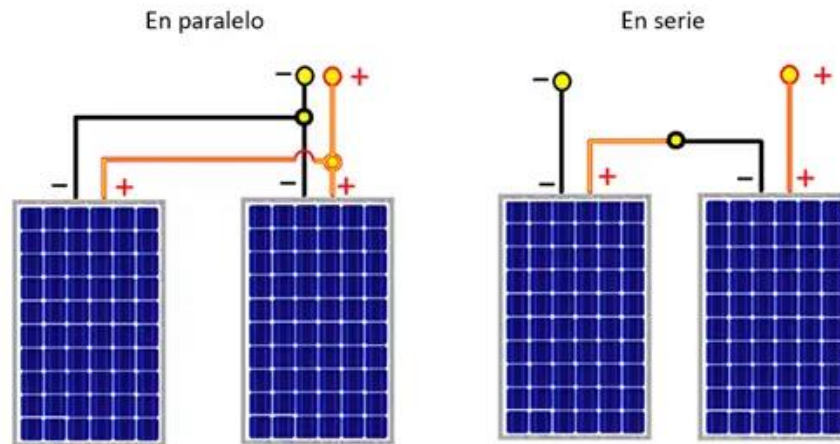


Figura N° 2.4: Esquema de conexión serie y paralelo.

Fuente: Edp Energía 2023.

Tabla N° 2.5: Tipos de materiales para módulos fotovoltaicos.

Tecnología	Símbolo	Característica	Eficiencia de celdas en laboratorio (%)	Eficiencia típica en módulos comerciales (%)
Silicio monocristalino	Sc-Si	Tipo oblea	24	13 - 15
Silicio policristalino	mc-Si	Tipo oblea	19	12 - 14
Película de silicio cristalino sobre cerámica	f-Si	Tipo oblea	17	(8 - 11)
Películas de silicio cristalino sobre vidrio		Película delgada	9	
Silicio amorfo	a-Si	Película delgada	13	6 - 9
Di seleniuro de cobre-indio/galio	CIGS	Película delgada	18	(8 - 11)
Telurio de cadmio	CdTe	Película delgada	18	(7 - 10)
Celdas orgánicas		Película delgada	11	
Celdas tandem de alta eficiencia	III-V	Tipo oblea y película delgada	30	
Celdas concentradoras de alta eficiencia	III- V	Tipo oblea y película delgada	33 (tándem) 28 (solo)	

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Controlador de carga

La función básica de este dispositivo es prevenir las descargas y sobre descargas de las baterías. Se implementa además para la protección de las cargas en condiciones extremas de operación. La capacidad de regulación de carga idealmente debe depender directamente del estado de carga en las baterías, éste, gracias a la simplicidad del equipo, reduce sustancialmente el mantenimiento y hace que las averías en el sistema fotovoltaico sean escasas. (Ver la figura N° 2.5).

2.4.3.1 Controlador de carga MPPT y PWM

El controlador MPPT, seguimiento del punto de máxima potencia, está compuesto por un convertidor que ajusta la tensión de CC y un seguidor que maximiza la potencia. A diferencia del controlador PWM, que tiene un diodo de protección, el MPPT permite trabajar con diferentes salidas, de tensiones y corrientes, tanto en el campo fotovoltaico como en las baterías a través del convertidor de tensión CC. El seguidor MPPT adapta el voltaje operativo del generador fotovoltaico para alcanzar la máxima potencia disponible.

La principal distinción entre MPPT y PWM radica en que la cantidad de energía que ingresa y sale del controlador es igual, pero en MPPT, el voltaje y la corriente en la entrada y salida son distintos. Esto posibilita aumentar el voltaje del módulo fotovoltaico y, en comparación con los controladores PWM, elevar la producción de energía solar hasta en un 30%. Además, resulta especialmente útil en momentos de nubosidad temporal.

La gran ventaja es que los altos voltajes en el campo fotovoltaico ayudan a reducir las pérdidas de energía por los bajos voltajes. Por eso, los controladores de carga MPPT se convierten en una solución sumamente atractiva e incluso esencial en campos fotovoltaicos de mediana y alta potencia, donde el objetivo es maximizar la generación de energía.

Esto permite emplear módulos con diferentes voltajes, lo que amplía significativamente su aplicación en términos de potencia en comparación con los módulos disponibles en el mercado que funcionan con PWM y que verían un aumento del 30% en su potencia generada.



Figura N° 2.5: Controladores de carga.

Fuente: ECOFENER 2017.

2.4.4 Almacenamiento energético

Con un conjunto de baterías se puede hablar de un sistema de almacenamiento energético, generalmente las baterías utilizadas son de plomo-ácido, aunque también pueden ser de ion litio, entre otras. Las de plomo-ácido, suelen ser económicas y capaces de transformar la energía química en energía eléctrica de forma funcional. Las baterías en general acumulan la energía eléctrica generada durante las horas de radiación, para su utilización posterior en los momentos de baja o nula insolación.

Para seleccionar las baterías se analizan características técnicas como profundidad de descarga, ciclos, duración de uso y madurez de la tecnología, eficiencia de los materiales con las cuales están fabricados, entre otros parámetros. Las principales características básicas que debería tener una de la batería se describen a continuación. (Ver la figura N° 2.6).

- ✚ Eficiencia, la relación entre la energía extraída de la batería y la energía puesta en la batería. Esto se debe a las pérdidas de la batería durante la carga y descarga, especialmente debido a los efectos térmicos.
- ✚ Profundidad de descarga, este es el porcentaje de energía que se puede extraer de una batería completamente cargada durante la descarga. Por ejemplo, si tiene una batería de 100 Ah y recibe 20 Ah de descarga, esto corresponde a una profundidad de descarga del 20 %.
- ✚ Ciclos de carga/descarga, número de veces que se puede cargar y descargar una batería durante su vida útil. La descarga profunda reduce el número de ciclos y acorta la vida.

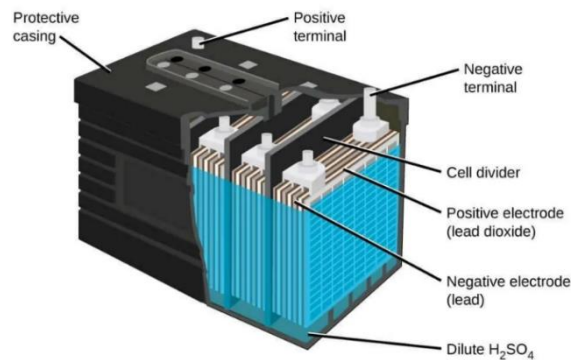


Figura N° 2.6: Características de una batería.

Fuente: DIREENERGY 2020.

2.4.4.1 Baterías de Litio

En la actualidad, las baterías de ion-litio se encuentran en el centro de numerosos esfuerzos de investigación y desarrollo a nivel global. Sus excelentes capacidades eficientes de carga y descarga, junto con su amplio rango de usos, tanto fijos como móviles, la posicionan como una tecnología de mercado que tiene una alta durabilidad en el uso de aparatos electrónicos.

El término "ion-litio" abarca una diversidad de reacciones electroquímicas en las que los iones de litio se desplazan entre los electrodos durante los procesos de carga y

descarga. Durante la carga, los electrones fluyen desde el cátodo hacia el ánodo a través del circuito externo, lo que provoca el movimiento de iones desde el cátodo al ánodo. Normalmente, el litio se encuentra en el cátodo, combinado con otros materiales en forma de óxidos metálicos o fosfatos, mientras que el ánodo suele estar compuesto de grafito.

El electrolito, por su parte, consiste en un compuesto orgánico disuelto con sales iónicas, como el Hexafluorofosfato de litio disuelto en etileno.

Las baterías de ion-litio sobresalen por su gran capacidad de almacenar energía y potencia con relación a su tamaño, por funcionar eficientemente, ser adaptables en cómo se cargan y descargan, y por perder poca energía cuando están en reposo.

Sin embargo, tienen sus puntos en contra: son costosas y pueden volverse inestables y peligrosas si se sobrecargan, por lo que necesitan sistemas de control adicionales que hacen que su precio suba.

La figura N° 2.7 es un esquema que muestra el interior de una batería de Li.

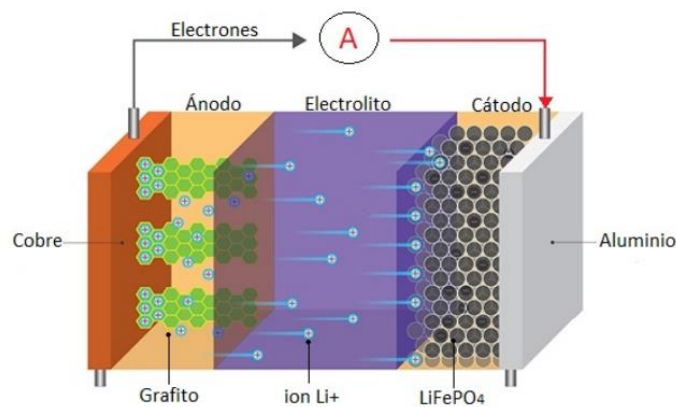


Figura N° 2.7: Esquema del interior de una batería Ion-Litio.

Fuente: Repositorio Universidad de Chile 2022.

2.4.5 Inversor

Cumple la función de adecuar las características de la energía generada a las demandas por las aplicaciones de la instalación. El sistema inversor es el encargado de transformar la corriente continua (CC) de las baterías en corriente alterna (CA), que se utiliza en los domicilios (220 V, 50 Hz).

Los generadores fotovoltaicos producen corriente continua. En sistemas fotovoltaicos off - grid, para poder utilizar cargas variables, se requiere de un dispositivo electrónico llamado inversor para convertir directamente en corriente eléctrica. En la mayoría de los casos, en los sistemas fotovoltaicos off - grid, el inversor está conectado a la batería, y en los sistemas fotovoltaicos on - grid, el inversor está conectado directamente al sistema generador.

Las funciones principales del inversor son la inversión CC/CA, la modulación de la onda de salida CA y la regulación del valor RMS de la tensión de salida.

Los inversores comúnmente utilizados son monofásicos o trifásicos a 50 Hz, con varias clasificaciones de voltaje de entrada y una amplia gama de potencia disponible.

Estos pueden funcionar directamente desde baterías o generadores fotovoltaicos y pueden conectarse a varios consumidores o suministrar energía a la red eléctrica.

El funcionamiento típico de un inversor se basa en un puente de interruptores semiconductores de potencia con ciclos controlados de apertura y cierre para generar una onda de pulso variable (más pulsos significa menor distorsión armónica, más cerca de una onda sinusoidal pura).

Los inversores se pueden clasificar según la forma de onda del voltaje de salida:

- ✚ De onda cuadrada.
- ✚ De onda modificada o quasi-senoidal.
- ✚ De onda senoidal.

El inversor de onda cuadrada es el que tiene un menor costo económico en el mercado, estos se basan en un simple "corte" de la potencia de CC de entrada con poca modulación o filtrado.

Este tipo de inversor tiene una forma de onda resultante que contiene muchos armónicos no deseados, su distorsión armónica total (THD) es muy alta, alrededor del 40 %, la eficiencia es de alrededor del 50 – 60 %.

La potencia de sobrecarga del equipo es pequeña, entre 10 a 20 % de la potencia nominal, además la regulación de voltaje también es muy baja. Por lo general, se usan con cargas inductivas o resistivas pequeñas, pero es posible que no funcionen satisfactoriamente con algunos tipos de carga. El THD del inversor de onda semi - sinusoidal o quasi - sinusoidal es del 20 % y su rendimiento es superior al 90 %. Se utilizan en la electrificación rural para alimentar los electrodomésticos más comunes, como computadoras y reproductores de música.

Algunas cargas, como impresoras láser, hornos de microondas y relojes (que se pueden aumentar hasta en un 50 %), pueden causar problemas de funcionamiento con este tipo de inversor. Un inversor de onda sinusoidal filtra cuidadosamente la señal generada.

En general, es la mejor opción para alimentar cargas de CA y no tiene problemas en términos de THD o estabilidad de voltaje.

En los inversores autónomos, el valor rms de la tensión de salida suele estar regulado por control PWM. A medida que cambia el voltaje de entrada de CC del inversor, también cambia la producción de corriente de carga, que a su vez cambia el voltaje de apagado de los interruptores de estado sólido que componen el inversor. Como resultado, se necesita modular (estrechar o ampliar), la duración del pulso de onda de salida. En algunos inversores, la tensión de salida se regula mediante un transformador o regulando la tensión delante del inversor. Diferentes tipos de inversores se pueden apreciar en la figura N° 2.8.



Figura N° 2.8: Diferentes tipos de inversores fotovoltaicos.

Fuente: ECOFENER 2021.

2.4.6 Normativas vigentes

Para lograr la puesta en marcha de los sistemas se debe conocer todas las normativas y reglamentos que se relacionen a la instalación fotovoltaica y su respectiva puesta en marcha, de estos documentos se regirá la instalación con estándares de calidad internacionales para lograr seguridad y aprobación de los organismos reguladores en el ámbito eléctrico. Cumplir con estas exigencias son condiciones mínimas de operación, ya que entrega seguridad y confiabilidad a los sistemas presentes en el proyecto.

Se debe tener en cuenta que los pliegos técnicos normativos y las instrucciones técnicas generales, son una base para regularizar toda instalación eléctrica y así obtener un correcto funcionamiento de esta, también evitar riesgos en todo tipo de aspectos.

2.4.6.1 RIC N°9.1/2021

Esta instrucción técnica general corresponde al “Diseño y ejecución de las instalaciones fotovoltaicas aisladas de las redes de distribución”, el objetivo de esta instrucción es acotar los requerimientos que se deben contemplar para el diseño, ejecución, inspección y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas aisladas, con la finalidad de que el servicio entregado sea eficiente y salvaguardar la seguridad de las personas que operan o hacen uso de ellas.

El respaldo de las instalaciones fotovoltaicas aisladas por medio del almacenamiento de energía a través de baterías está contemplado dentro de esta instrucción técnica. Esta se deberá leer en conjunto con los pliegos técnicos normativos RIC establecidos en el Decreto Supremo N°8/2020 del Ministerio de energía.

2.4.6.2 RIC N°4 DS N°8/2020

Este pliego técnico normativo se centra en la materia que son conductores, materiales y sistemas de canalización.

El objetivo que tiene es establecer requisitos de seguridad que deben cumplir, los conductores, materiales y sistemas de canalización a utilizar en las instalaciones de consumo de energía eléctrica de nuestro país.

2.4.6.3 RIC N°5

Este pliego técnico normativo se centra en las medidas de protección contra tensiones peligrosas y descargar eléctricas. El objetivo de este pliego técnico es establecer medidas de protección contra tensiones peligrosas y descargas electricas que se deben tener en cuenta para la ejecución y el uso de las instalaciones de energía eléctrica en el país.

2.4.6.4 RIC N°6

Este pliego técnico normativo se centra en la materia de puesta a tierra y enlace equipotencial, el objetivo de este pliego es establecer los requisitos de seguridad que deben cumplir las materias antes mencionadas. Los sistemas de puesta a tierra y protección contra rayos tienen como objetivo principal limitar las tensiones con respecto a tierra que puedan presentarse en las masas metálicas de los elementos que componen una instalación eléctrica, asegurando la operación de protecciones y controlando el riesgo para las personas como también los equipos.

2.4.6.5 RIC N°18

Para la presentación de nuestro proyecto, este pliego nos entrega las disposiciones técnicas que se deben cumplir en la elaboración y presentación de un proyecto con instalaciones de consumo de energía eléctrica, con el objeto de ser ejecutados posteriormente y presentados a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). En base a este pliego técnico se deberá recopilar toda la información que será necesaria para validar la puesta en marcha del proyecto, en él se detallan planos, memoria explicativa, informes, check list, entre otros.

2.4.6.6 RIC N°19

La materia de este pliego técnico corresponde a la puesta en servicio, aquí se establece el procedimiento general para realizar la puesta en servicio y aplicara a todas las instalaciones de consumo que se ejecuten y deban ser declaradas ante la SEC.

2.4.7 Protecciones eléctricas en instalaciones fotovoltaicas

El método que ha tenido más impacto a la hora de proteger y salvar la vida de las personas y las condiciones operativas de los equipos son las protecciones eléctricas, de estas existen para todo tipo y diferentes parámetros eléctricos, la correcta elección de estos es fundamental para cualquier instalación fotovoltaica, en este caso, las protecciones deberán ser para corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), de esta manera tendremos protecciones a ambos lados de la instalación fotovoltaica.

Como se menciona anteriormente, las protecciones para el tipo CC son de una manera, mientras que las de CA actúan de otra distinta, es aquí donde debemos tener presentes las normativas que rigen las protecciones destinadas a cada tipo de instalación. Elegir la protección correcta dependerá del tipo de instalación, la corriente, tensión, tiempo de operación y dimensionamiento de los sistemas.

2.4.7.1 Relé de potencia inversa

La protección reactiva del inversor centralizada tiene la función de gestionar la corrección del factor de potencia en la red eléctrica ante fluctuaciones de energía reactiva generadas por fenómenos como nubosidad, cambios en las condiciones ambientales o acciones no controladas dentro del sistema. Estas variaciones pueden impactar la calidad del voltaje en la red y la estabilidad general del sistema eléctrico al no mantener un control adecuado sobre la producción de energía reactiva.

La energía reactiva es un elemento esencial en la electricidad que se necesita para mantener los voltajes estables en la red y asegurar el funcionamiento confiable del sistema. La disposición de inversores o convertidores en lugares estratégicos de la red, como subestaciones o puntos de conexión, posibilita el control automático y la regulación de la cantidad de energía reactiva que se agrega o se retira de la red. Los inversores bajo la supervisión de la protección inversa tienen la capacidad de suministrar o absorber energía reactiva según los requerimientos del sistema, permitiéndoles cumplir con distintos objetivos. En la figura N° 2.9 se puede apreciar un relé de potencia inversa.

- ✚ Compensación Reactiva: Cuando el voltaje es bajo, los inversores pueden importar potencia reactiva para aumentarlo, y cuando es alto, pueden importar potencia reactiva para reducirlo.
- ✚ Regulación de voltaje: la protección IR centralizada regula la potencia reactiva para mantener los voltajes dentro de rangos aceptables en toda la red.
- ✚ Estabilidad del sistema: al regular los voltajes y la potencia reactiva, la protección IR central contribuye a la estabilidad general del sistema eléctrico.
- ✚ Reducción de pérdidas: el control efectivo de la potencia reactiva puede ayudar a reducir las pérdidas de energía en la red reduciendo las temperaturas por transmisión en los conductores instalados.



Figura N° 2.9: Relé potencia inversa.

Fuente: RHONA 2023.

2.4.7.2 Protección de sobre corriente CC

La protección de doble polo tiene la función de interrumpir la corriente en ambos conductores, tanto positivo como negativo, al mismo tiempo. Su objetivo es prevenir daños por sobrecargas, picos de voltaje y cortocircuitos durante tareas de mantenimiento en equipos de corriente continua (CC). Esto mejora la seguridad del sistema fotovoltaico, asegura intervenciones más seguras y reduce los riesgos de choques eléctricos o fallos durante su funcionamiento. Ver la figura N° 2.10.



Figura N° 2.10: Protección de sobre corriente CC.

Fuente: RHONA 2023.

2.4.7.3 Fusibles y porta fusibles CC

Los fusibles en sistemas de corriente continua son vitales para proteger los dispositivos y circuitos. Su función es evitar daños por sobrecargas, cortocircuitos y otros problemas eléctricos. Al usar los fusibles adecuados, se asegura la seguridad y la integridad de los dispositivos electrónicos y los sistemas de energía. Además, estos fusibles son útiles para identificar y resolver problemas en el circuito: si se funden, indican posibles fallos o sobrecargas en el sistema. Los fusibles son insertados en una porta fusible donde funcionan como piezas de un único uso, la porta fusible toma las conexiones de los terminales del string y en caso de falla el fusible se acciona, basta con identificar la falla, solucionar el problema y cambiar el fusible para normalizar el sistema. Ver la figura N° 2.11 y N° 2.12.



Figura N° 2.11: Porta fusible CC.

Fuente: Schneider electric 2023.



Figura N° 2.12: Fusible CC.

Fuente: Schneider electric 2023.

2.4.7.4 Interruptor magnetotérmico tetrapolar

La función del interruptor magnetotérmico es bloquear el paso de la corriente cuando se detecta que esta sobre pasa ciertos límites que tiene establecido el equipo, por sus materiales de fabricación, protegiendo así el circuito eléctrico de sobrecargas y cortocircuitos. Estos equipos se clasifican según su curva de operación y esta se basa en los parámetros de efecto térmico y magnético para diferenciarse. El interruptor tetrapolar se usa comúnmente en instalaciones trifásicas ya que posee más polos de apertura en caso de una falla. Ver la figura N° 2.13.



Figura N° 2.13: Interruptor magnetotérmico tetrapolar.

Fuente: Schneider electric 2023.

2.4.7.5 Protección diferencial

El funcionamiento del interruptor diferencial es bastante directo. Evalúa la corriente eléctrica al inicio y al final del circuito para confirmar que los valores en ambos puntos sean idénticos. Esto indica que el circuito está en condiciones adecuadas y no está experimentando pérdidas.

En el sistema interno de protección, el equipo trifásico con neutro está dotado de una bobina de fase para cada una de las fases, una bobina para el neutro y una bobina residual que pueda generarse en el circuito de carga conectado al interruptor en caso de falla.

La corriente que fluye por la bobina de fase crea un campo electromagnético que se compara con el campo generado por la corriente en la bobina del neutro. Si existe una discrepancia del orden de los 30 mA, la bobina de corriente residual se activa automáticamente, indicando que hay una diferencia entre la corriente de entrada y la de salida del interruptor. El campo magnético generado por esta corriente residual activa un solenoide incorporado, provocando la apertura automática del interruptor. Ver la figura N° 2.14.



Figura N° 2.14: Protección diferencial trifásica.

Fuente: Schneider electric 2023.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y SUS COMPONENTES

3.1 Información general de la planta

Actualmente el arreglo fotovoltaico instalado, no se encuentra bajo las indicaciones de la “instrucción técnica general RIC N°9.1/2021: Diseño y ejecución de las instalaciones fotovoltaicas aisladas de las redes de distribución”, por lo que la puesta en marcha deberá contemplar todos los aspectos necesarios a modificar para cumplir con la normativa. También se indicará algunos aspectos correspondientes a los RIC 09, RIC 18 y RIC 19, los cuales se deberán implementar teniendo en cuenta los requisitos asociados al proyecto. La condición del arreglo es operativa, por lo que produce energía sin la conexión de una carga en específico. El arreglo fue instalado en el techo correspondiente a la Facultad de Ciencias Naturales que se encuentra ubicada en el área sur de la Universidad de Atacama. El propósito fundamental de este arreglo de 10 kWp es la alimentación energética de un electrolizador alcalino. El acceso hacia la instalación actual de la planta es expedito y sin mayores problemas, exceptuando que no cuenta con pasillo de mantención, por lo que su intervención y manipulación es relativamente apropiada, siempre que se realice con los métodos de seguridad apropiados, se encuentran los cables correspondientes a su conexionado a un costado de los paneles fotovoltaicos, lo que permite dimensionar las distancias y ubicación donde irán instaladas en un futuro. Ver las figuras N° 3.1 y N° 3.2.



Figura N° 3.1: Suciedad presente en toda la instalación.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe mencionar que en la actual instalación la canalización de los conductores correspondientes a cada string no cumple con lo estipulado en el pliego técnico normativo RIC N°4, ya que los cables solares se encuentran expuestos a la intemperie y sobre el techo, sin ninguna canalización o material que los proteja de las condiciones climáticas adversas, es aquí donde se debe dar énfasis en lograr normalizar estas condiciones para cumplir con la normativa.

Detallado en las imágenes se puede observar el desorden presente en el conexionado de los módulos fotovoltaicos, esto se contempla como medida para mejorar la condición e instalar las canalizaciones en la mejor ubicación posible.



Figura N° 3.2: Módulos fotovoltaicos con abundante polvo en su superficie.

Fuente: Elaboración propia.

Los módulos fotovoltaicos se encuentran soportados por una estructura rígida de Metalcom galvanizado, con una inclinación de entre 40° y 45° aproximadamente, esto debido a la inclinación del techo en donde fue instalada. El rango de inclinación óptimo es hasta los 45° o en posición azimut respecto del norte.

3.2 Modulo fotovoltaico del sistema

El arreglo fotovoltaico cuenta con tres strings separados, de seis módulos cada uno, conectados en serie por pares, y luego en paralelo, por lo que nos da un total de dieciocho módulos fotovoltaicos utilizados en toda la instalación, el módulo utilizado en la instalación se muestra en la figura N° 3.3.



Figura N° 3.3: Modulo fotovoltaico utilizado en la instalación.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras N° 3.4 y N° 3.7, nos muestran la placa técnica del módulo fotovoltaico utilizado en la instalación.

JASOLAR 晶澳 Crystalline Silicon Photovoltaic Modules		TYPE	JAM72S30-540/MR
 WARNING Avertissement Electrical Hazard Risque électrique This unit produces electricity if exposed to light. Cette unité produit de l'électricité si elle est exposée à la lumière. Do not disconnect under load. Ne débranchez pas en charge.	All technical data at standard test condition: AM=1.5 E=1000W/m ² Tc=25°C	Peak power (P _{max})	540 W
		Open circuit voltage (V _{oc})	49.60 V
		Max. power voltage (V _{mp})	41.64 V
		Short circuit current (I _{sc})	13.86 A
		Max. power current (I _{mp})	12.97 A
		Power Selection	0~+5 W
			Made in China

Figura N° 3.4: Placa técnica del panel fotovoltaico A.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran las curvas P-V y I-V del módulo fotovoltaico, las cuales se simularon en el software ETAP. Ver las figuras N° 3.5 y N° 3.6.

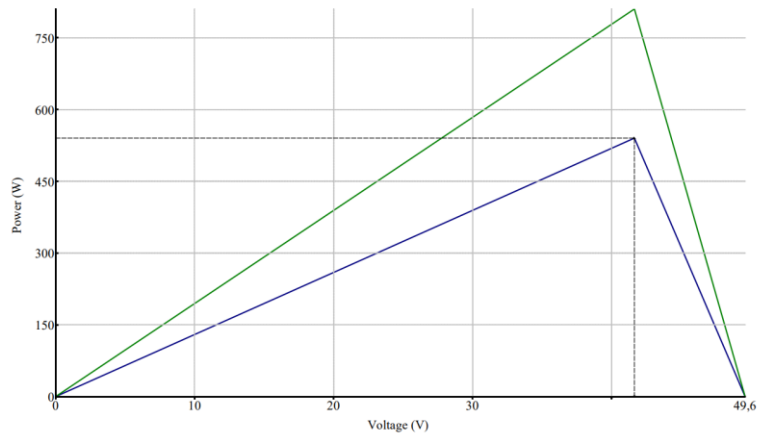


Figura N° 3.5: Curva P-V modulo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

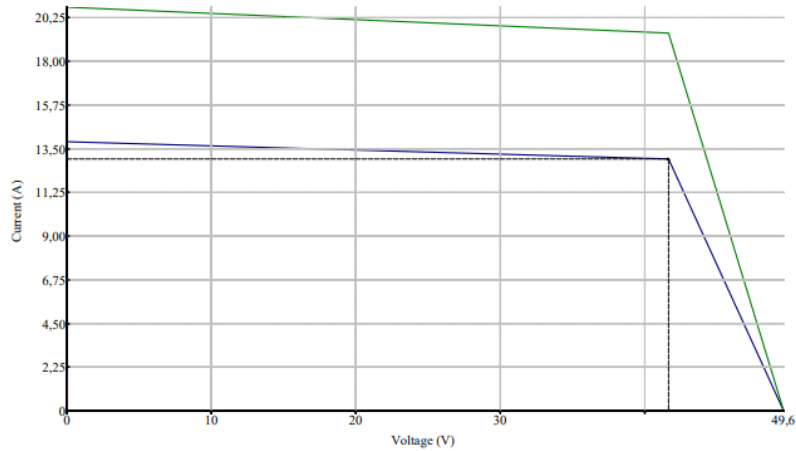


Figura N° 3.6: Curva I-V modulo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Capacidad del sistema por string

La tensión de circuito abierto del módulo (V_{oc}) es de 49.6 V, la corriente de corto circuito (I_{sc}) es 13.86 A y la potencia máxima es de 540 W, todos estos parámetros en base a las condiciones de operación que se especifican, una temperatura de celda de 25°C, una irradiación incidente en el módulo de 1000 W/m² y una constante atmosférica de 1,5. Con estos datos es posible calcular la capacidad de cada string en base a la potencia, utilizando la siguiente expresión:

$$P_{dc0}(kW) < kW = \frac{P_{mp}(W) \times N}{1000}$$

IEC 61215-1/-1-1/-2: 2016 and IEC 61730-1/-2: 2016	Power production tolerance	±3%	
Maximum overcurrent protection rating	25 A	Open circuit voltage tolerance	±3%
Safety class based on IEC 61140	Class II	Short circuit current tolerance	±4%
Maximum system voltage	1500V		

2190108120355433

Current Class- L

Figura N° 3.7: Placa técnica del panel fotovoltaico B.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Controlador de carga

La instalación en general constará de tres controladores de carga, cada uno destinado a un inversor, así se manipulará de manera práctica los parámetros necesarios para obtener la corriente deseada.

El controlador de carga será de tipo MPPT, lo que permitirá una mayor generación por string, un controlador de este tipo permitirá equiparar las tensiones de los módulos de cada string y así aumentar la eficiencia de ellos.

El controlador de carga utilizado se muestra en las figuras N° 3.8, N° 3.9 y N° 3.10 respectivamente.



Figura N° 3.8: Controlador de carga destinado a la instalación.

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 3.9: Entradas de conexión del controlador de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Los controladores que se utilicen en la instalación de este proyecto deberán cumplir con los requisitos de seguridad de las normas IEC 62109-1 o IEC 62477-1 y autorizados por la SEC.

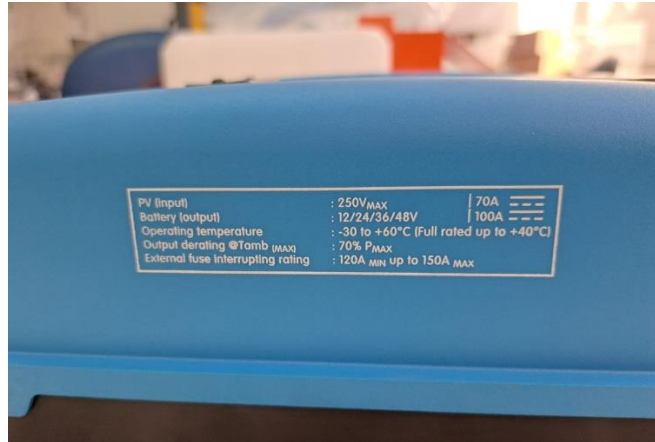


Figura N° 3.10: Datos técnicos del controlador de carga.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Sistema de almacenamiento

Las baterías disponibles que tiene la Universidad son de 250 Ah, existen cuatro de estas baterías por lo que su cantidad solo daría abasto para un string, en este caso lo mejor es cotizar otra batería de mayor tensión y potencia de salida.

A continuación, se muestran en las figuras N° 3.11 y N° 3.12, la batería que tiene disponible la Universidad.



Figura N° 3.11: Batería de ciclo profundo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 3.12: Datos técnicos de las baterías de ciclo profundo.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1 Batería Pylontech Litio US3000C

Ya que las baterías de ciclo profundo solo darán abasto para un string, sería recomendable instalar tres baterías de litio para cada string, estas baterías tienen una potencia de 3,55 kWh nominal, una tensión de 48 V lo que se adapta a la tensión de los string y una corriente de descarga de 74 Ah. Esta batería tendrá su cotización respectiva y los valores que representa su compra. Ver las figuras N° 3.13 y N° 3.14. La batería cuenta con los siguientes estándares internacionales, IEC62619, IEC63056, IEC62040, IEC62477-1, UL1973, U1642, UL9540A, VDE2510-50, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3 y UN38.3.



Figura N° 3.13: Batería de ciclo profundo Pylontech Litio US3000C.

Fuente: Elaboración propia.

Basic Parameters	US2000	Phantom-S	US3000
Nominal Voltage (V)	48	48	48
Nominal Capacity (Wh)	2400	2400	3552
Usable Capacity (Wh)	2200	2200	3200
Dimension (mm)	442*410*89	440*440*88.5	442*420*132
Weight (Kg)	24	24	32
Discharge Voltage (V)	45 ~ 53.5	45 ~ 53.5	45~53.5
Charge Voltage (V)	52.5 ~ 53.5	52.5~53.5	52.5~53.5
Charge / Discharge Current (A)	25(Recommend)	25(Recommend)	37 (Recommend)
	50 (Max)	50 (Max)	74 (Max)
	100 (Peak@15s)	100 (Peak@15s)	100 (Peak@15s)
Communication Port	RS485, CAN	RS485, CAN	RS485, CAN
Single string quantity(pcs)	8	8	8
Working Temperature/°C	0~50	0~50	0~50
Shelf Temperature/°C	-20~60	-20~60	-20~60
Humidity	5%~85%	5%~85%	5%~85%
Altitude (m)	<2000	<2000	<2000
Design life	15 ⁺ Years (25°C/77°F)	15 ⁺ Years (25°C/77°F)	15 ⁺ Years (25°C/77°F)
Cycle Life	>6000, 25 C	>6000, 25 C	>6000, 25 C
Authentication Level	UL/IEC62619/CE /UN38.3	IEC62619/CE /UN38.3	IEC62619/CE /UN38.3

Figura N° 3.14: Especificaciones técnicas Batería Pylontech Litio US3000C.

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Inversor

Destinados a la planta fotovoltaica se tienen tres inversores de corriente, ya que se realizará una configuración con el objetivo de obtener corriente trifásica (400 V), para el equipo electrolizador alcalino. Las figuras N° 3.15 y N° 3.16 muestran el inversor que se utilizara, la figura N° 3.17 corresponde a datos técnicos del inversor.



Figura N° 3.15: Inversor para instalación fotovoltaica.

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 3.16: Entradas de conexión del inversor de corriente.

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 3.17: Datos técnicos del inversor de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Posicionamiento de los módulos fotovoltaicos y cableado de conexión

El posicionamiento se definió que fuera en la techumbre de la facultad de ciencias naturales, en los laboratorios de física, el cual tiene acceso hacia ellos por el interior de este recinto que cuenta con un espacio sin techo para subir a través de una escalera hacia la instalación, es de fácil acceso y expedita, no representa mayores inconvenientes en caso de modificaciones que se quisieran realizar, la techumbre es rígida y cuenta con las aptitudes para realizar modificación a futuro, tanto como expandir las instalaciones de la

planta o su reubicación, también para realizar mantenencias y cambio de componentes es totalmente accesible.

Con respecto al cableado de conexión, estos serán distribuidos de manera que su ubicación no interfiera con el tránsito hacia la instalación, preferentemente por bordes o canalización del techo donde no se ponga en riesgo su estado físico, la dirección que tomarán estos cables serán hacia la bodega donde se instalarán los demás equipos.

Preferentemente se utilizarán tuberías galvanizadas para realizar esta modificación, las cuales cumplan con las características que propone el RIC N°4, de presentarse algún inconveniente con la ubicación de las tuberías, se busca el lugar optimo que no interfiera con otras instalaciones.

3.7 Área destinada a conexión de componentes

El área destinada para realizar las conexiones pertinentes entre los componentes será en una sala aledaña al laboratorio donde se encuentra el electrolizador alcalino, a un par de metros desde su entrada, es de estructura rígida con 2 puertas metálicas en las cuales se agregarán plataformas de soporte en caso de ser necesarias. Dentro de ella irán ubicadas los inversores, las baterías y el controlador de carga todos con sus configuraciones correspondientes. Desde este punto saldrá la corriente trifásica que será canalizada hacia el laboratorio de Nanotecnología, Energía y Sistemas complejos con el fin de proporcionar energía necesaria para que el equipo electrolizador alcalino funcione.

En el interior de esta bodega se encontraban implementos de laboratorio que fueron reubicados para despejar la zona de instalación. También se instalarán los tableros con las protecciones eléctricas correspondientes a las instalaciones, los cuáles se calculan en base a los requerimientos del RIC N°9. La bodega donde se instalarán los equipos deberá ser modificada, en caso de ser necesaria, para que cumpla con todos los requerimientos estipulados en el RIC N°9.1/2021, en temas de canalizaciones el RIC N°4 y temas de puesta a tierra RIC N°6. Ver las figuras N° 3.18 y N° 3.19.



Figura N° 3.18: Bodega destinada para la instalación de elementos importantes.

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 3.19: Vista general de bodega para instalación fotovoltaica.

Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras de soporte o protecciones deberán satisfacer la normativa vigente en Chile, en cuanto a edificación y diseño estructural para los efectos del viento, nieve y sísmicos, como se detalla en el punto 7.1 de la instrucción técnica general RIC N°9.1/2021.

3.8 Ubicación geográfica del arreglo fotovoltaico y Explorador Solar

Mediante la utilización de Google maps se podrá ubicar geográficamente donde está instalado el arreglo fotovoltaico mencionado y así determinar todas las posibles variables que puedan intervenir con su correcto funcionamiento, además de conocer su entorno y todo lo relacionado al clima expuesto. Ver figura N° 3.20.



Figura N° 3.20: Imagen satelital de la planta fotovoltaica.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

A través del satélite se pueden apreciar los módulos fotovoltaicos instalados sobre la techumbre de la Facultad de Ciencias Naturales. Se pueden recopilar los siguientes datos de su ubicación.

- ✚ Dirección: Av. Copayapu N°485.
- ✚ Región: Copiapó, Atacama.
- ✚ Coordenadas: -27.361848, -70.348675.

Hoy en día existen programas en la web que nos ayudan a recopilar información para proyectos relacionados a la energía solar, uno de ellos es el explorador solar, el cual pertenece y es proporcionado por el Ministerio de Energía. La información y datos que se recopilaron corresponden a las figuras N° 3.21 y N° 3.22 respectivamente.



Figura N° 3.21: Ubicación de la planta fotovoltaica con explorador solar.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

RADIACION ANUAL			
Global Horizontal (kWh/m ² /día)	Global Inclinado NaN° (kWh/m ² /día)	Directa Normal (kWh/m ² /día)	Difusa Horizontal (kWh/m ² /día)
6,33	6,88	8,40	0,80
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA			
Frecuencia de Nubes (%)	Temperatura Ambiental (°C)	Velocidad del viento (m/s)	
10	16,8	2,8	

Figura N° 3.22: Datos técnicos proporcionados por explorador solar.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Con los datos que nos entrega la imagen anterior podemos destacar los siguientes:

- ✚ La radiación incidente en un ángulo inclinado es de 6,88 (kWh/m²/día), lo cual es un índice bastante elevado y muy acertado por la ubicación en la que se encuentra.
- ✚ El porcentaje de nubes que frecuentan la zona es de un 10% aproximadamente lo que indica que la producción es pareja en casi la totalidad de las horas presentes de irradiación.
- ✚ Los meses de mayor radiación en ángulo horizontal corresponden a noviembre, diciembre y enero, la temporada de verano respectivamente.

3.8.1 Radiación solar

A continuación, en la figura N° 3.23 se muestra un gráfico comparativo de la radiación incidente en un área determinada, este cuenta con un tiempo de medición de 12 meses, en los que se proyecta la radiación horizontal e inclinada con mayor fuerza, siendo los meses de verano los más elevados.

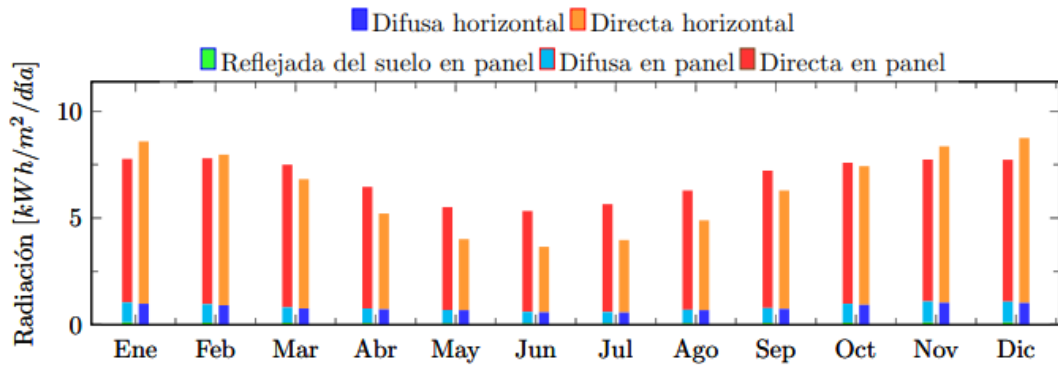


Figura N° 3.23: Grafico promedio mensual de insolación incidente.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Para la figura N° 3.24, podemos observar un gráfico de radiación incidente en plano horizontal e inclinado por el periodo de 24 horas, donde las horas del mediodía son los valores más elevados que nos entrega el software.

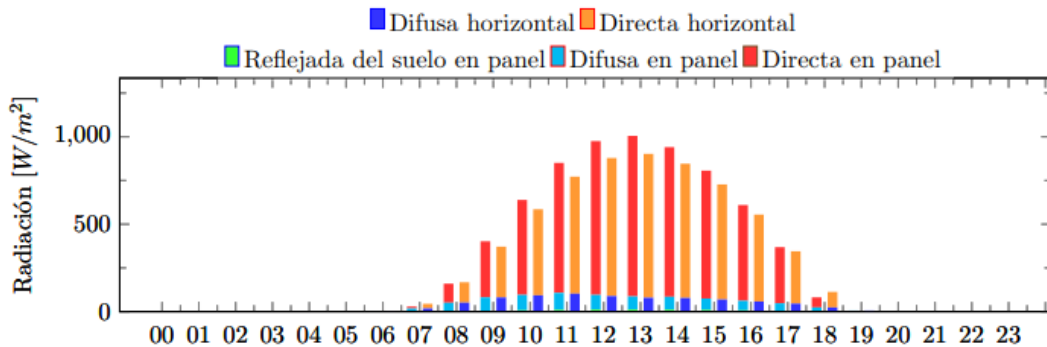


Figura N° 3.24: Grafico promedio de radiación global incidente.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

El siguiente grafico representa los patrones de la radiación solar que incide a lo largo del día y del año. En el eje horizontal se muestra la hora del día (en la zona horaria UTC-4), mientras que en el eje vertical se indican los meses del año. Los colores empleados reflejan el promedio de la radiación solar instantánea que incide en el panel por cada hora y mes, medido en [W/m²]. Ver la figura N° 3.25.

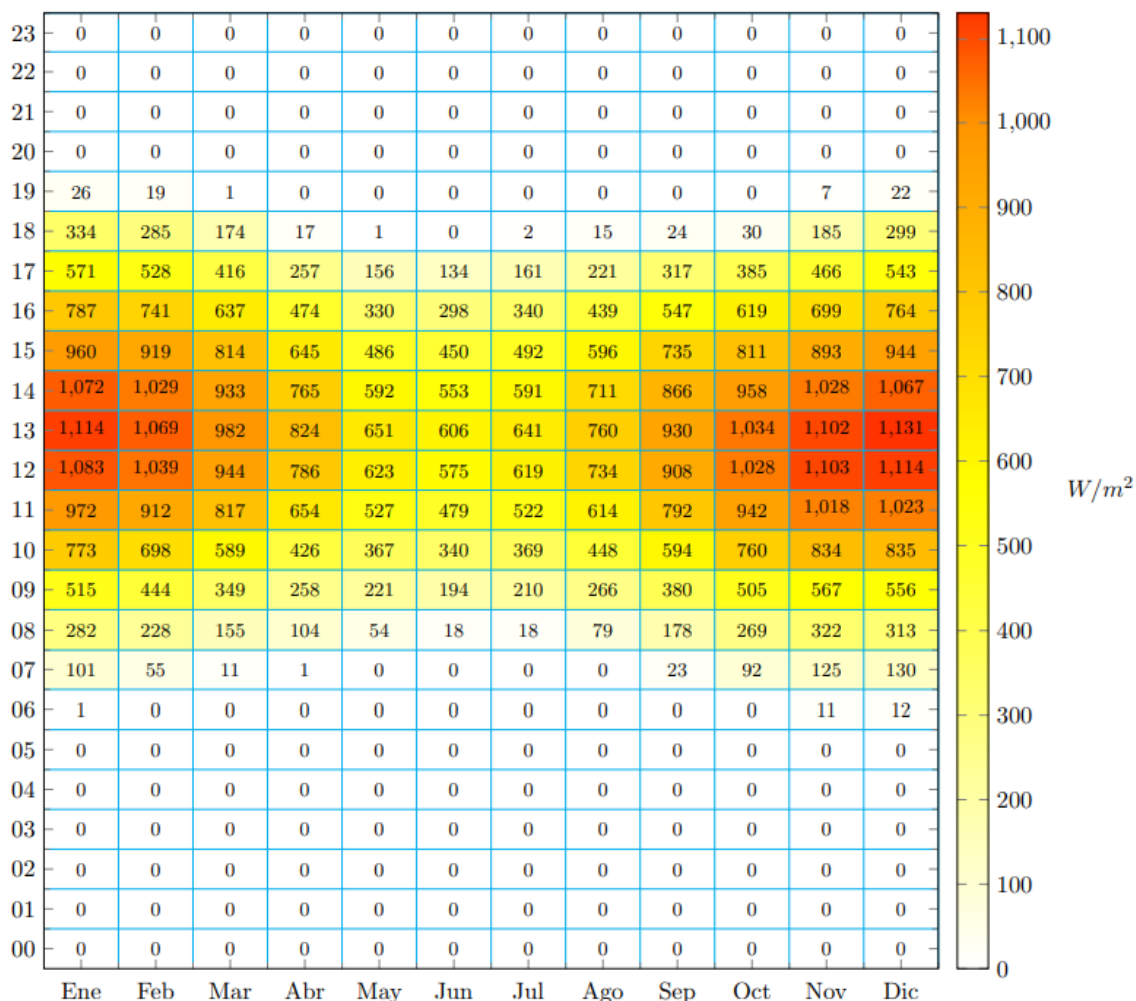


Figura N° 3.25: Grafico promedio de radiación global incidente.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

La figura N° 3.26 muestra la radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Directa	6.08	6.02	6.18	6.06	6.39	6.08	6.26	5.93	6.2	6.06	6.01	5.7	5.51
Difusa	0.78	0.82	0.73	0.76	0.65	0.72	0.68	0.77	0.71	0.73	0.75	0.87	0.85
Suelo	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Global	6.94	6.92	6.99	6.9	7.13	6.88	7.02	6.78	6.99	6.87	6.84	6.65	6.44

Figura N° 3.26: Variabilidad año a año radiación incidente.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.8.2 Generación fotovoltaica

Con la ayuda del Explorador solar es posible calcular los parámetros de generación en potencia, de los cuales permiten dimensionar y crear proyecciones de producción a corto, mediano y largo plazo, esto con información satelital de la ubicación requerida. Con esta información es posible realizar futuros proyectos ubicados en Copiapó que también utilicen un porcentaje de la energía generada. Ver las figuras N° 3.27 y N° 3.28.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
MWh	1.08	1.06	1.25	1.12	1.04	0.99	1.08	1.15	1.19	1.18	1.06	1.04

Figura N° 3.27: Promedio generación total en cada mes.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
kWh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.54	1.91	3.34	4.7
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
kWh	5.52	5.72	5.28	4.39	3.1	1.59	0.15	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura N° 3.28: Promedio generación para cada hora.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.8.3 Sombras topográficas

Saber la información respecto a la sombra que se proyecta en el módulo fotovoltaico se podrá hacer un estimativo de las horas de producción y horas en que exista mayor potencia para trabajar con el equipo destinado. Estas proyecciones no consideran el impacto de obstáculos como edificios, arboles, cables, etc. Ver las figuras N° 3.29 y N° 3.30.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
%	50.0	50.0	53.84	58.33	60.15	62.5	62.5	59.3	56.81	54.17	48.98	48.06

Figura N° 3.29: Porcentaje de tiempo con sombras cada mes.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.16	54.81	22.41	0.0	0.0	0.0
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.73	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Figura N° 3.30: Porcentaje del año con sombras en cada hora.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.8.4 Nubosidad

La cantidad más significativa de radiación que se elimina proviene de la nubosidad en la atmósfera. Con la ayuda del explorador solar, que utiliza las imágenes del satélite geoestacionario GOES, se ha estimado la frecuencia de nubosidad para cada hora y mes. Sin embargo, debido a que se emplean imágenes del canal visible para detectar nubes, esta información solo se encuentra disponible durante las horas del día en la mayor parte del país. Ver las figuras N° 3.31, N° 3.32 y N° 3.33.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
%	8.73	8.32	9.36	10.75	11.25	9.24	8.56	9.17	8.89	9.84	11.99	11.34

Figura N° 3.31: Porcentaje del mes con nubosidad diurna.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.62	36.13	46.84	37.56	26.24	17.31
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
%	11.09	8.35	8.73	8.47	8.6	9.17	2.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura N° 3.32: Porcentaje de la hora con nubosidad.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

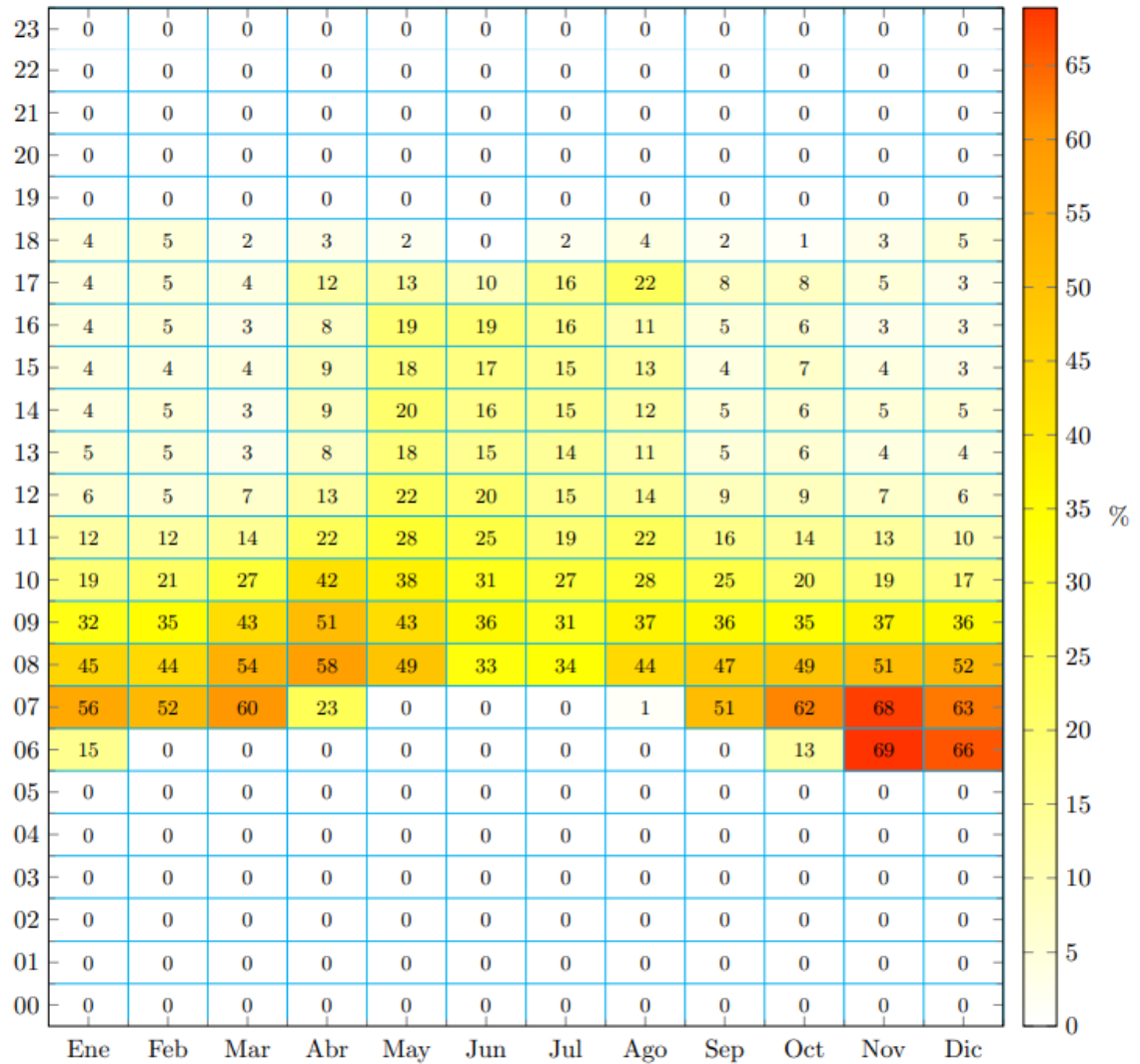


Figura N° 3.33: Porcentaje de tiempo con nubes para cada hora y mes.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.8.5 Temperatura

La temperatura ambiental afecta de manera directa la eficiencia de las celdas fotovoltaicas, demasiada temperatura en un módulo produce pérdidas de energía, por lo que, al conocer los datos de temperatura en el tiempo, se pueden realizar pruebas de termografía a los módulos en busca de puntos calientes o fallas por temperatura, así también contrastar con la información que se entrega a continuación. Ver las figuras N° 3.34, N° 3.35 y N° 3.36.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
°C	20.51	20.6	19.32	17.16	15.21	13.66	12.96	13.77	15.07	16.24	17.63	19.08

Figura N° 3.34: Temperatura promedio mensual.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
°C	13.03	12.75	12.47	12.19	11.91	11.63	11.42	11.81	13.23	15.57	18.29	20.89
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
°C	22.94	24.28	24.85	24.65	23.75	22.1	19.63	17.29	15.6	14.51	13.84	13.37

Figura N° 3.35: Temperatura promedio para cada hora.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

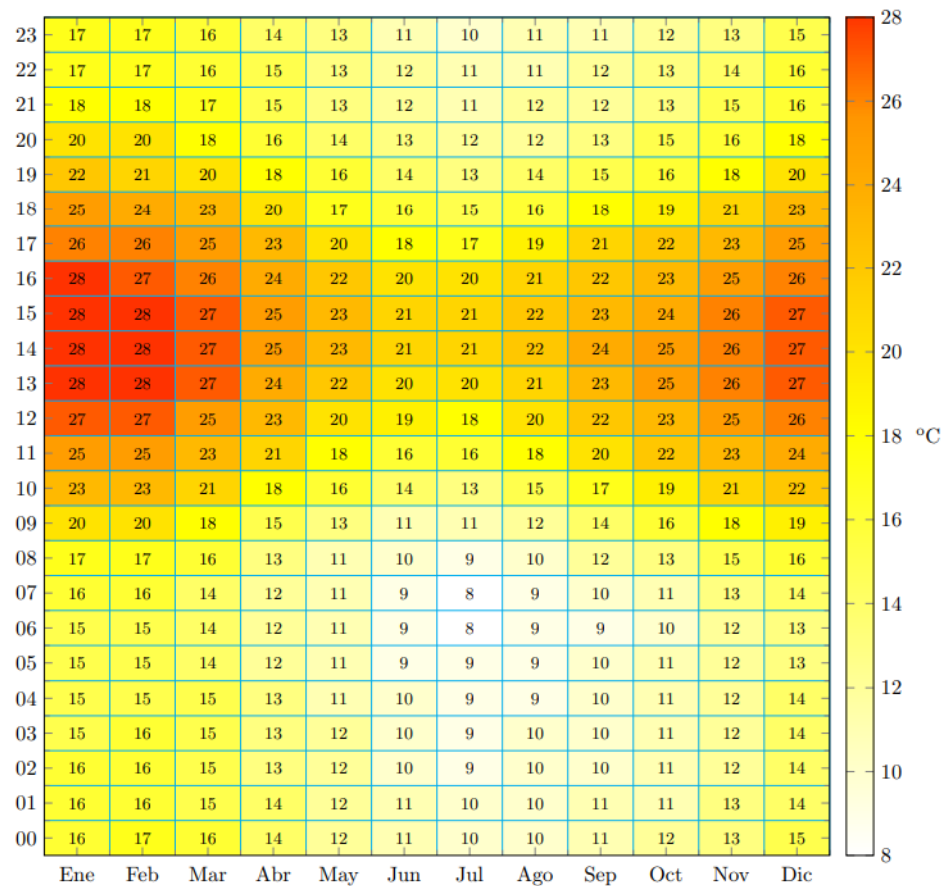


Figura N° 3.36: Temperatura promedio para cada mes y hora.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.8.6 Velocidad del viento

La velocidad del viento interviene en el enfriamiento directo de las celdas fotovoltaicas, y por lo tanto en su eficiencia, esto se ve reflejada en la producción de energía. También puede afectar la integridad de las estructuras de montaje de los módulos, dañándolas de manera mecánica o por fatiga de material. Ver las figuras N° 3.37 y N° 3.38.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>m/s</i>	3.32	3.11	2.61	2.26	2.22	2.34	2.46	2.71	2.86	2.95	3.01	3.34

Figura N° 3.37: Promedio mensual de la magnitud del viento.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
<i>m/s</i>	1.49	1.56	1.62	1.67	1.69	1.68	1.72	1.69	1.58	1.62	2.08	2.92

Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<i>m/s</i>	4.05	5.0	5.62	5.73	5.44	4.77	3.89	3.15	2.47	1.9	1.56	1.44

Figura N° 3.38: Promedio de la magnitud del viento para cada hora.

Fuente: Explorador Solar Ministerio de Energía.

3.9 Posibles variables que intervengan con el funcionamiento de la planta

Se estudió teóricamente en detalle todos los factores posibles que tengan el potencial de intervenir, interrumpir, dañar o manipular de manera errónea las instalaciones de la planta fotovoltaica, y estas afecten directamente en su funcionamiento, dejándola inoperativa.

Cabe destacar que al estar dentro de un recinto privado y el tránsito constante de estudiantes en el área, diversas de las variables que se mencionan a continuación pueden ocurrir en casos muy puntuales:

- ✚ **Robos / hurtos:** Los robos ya se han hecho presentes dentro de la universidad, mayoritariamente en las noches, por lo cual los componentes de la instalación fotovoltaica no están exentos de ser usurpados.
- ✚ **Mantenimiento escaso:** La falta de mantenimiento es un grave problema que afecta a largo plazo a toda la instalación, por lo que se entregarán recomendaciones de los periodos en que se deberán realizar mantenimiento general.
- ✚ **Suciedad excesiva:** La acumulación excesiva de polvo en la superficie de los paneles afectará directamente a su rendimiento, llegando a no ser capaz de cumplir la función para la cual fue diseñada, este aspecto debe ir de la mano con un mantenimiento periódico, y no despreocuparse del tema.
- ✚ **Fallas internas:** Las fallas internas pueden ocurrir por malas conexiones, errores de fabricación en componentes, golpes accidentales, fatigas de materiales, en fin, cualquier falla que se presente se deberán tomar las medidas respectivas para identificar y solucionar el problema.
- ✚ **Sismos / terremotos:** Chile es un país altamente sísmico y presenta movimientos muy a menudo, por lo que, en caso de la ocurrencia de uno de estos, existe la posibilidad de un daño estructural dentro de la instalación, en caso de terremotos esta posibilidad se incrementa exponencialmente. El chequeo y revisión luego de las actividades sísmicas es fundamental para descartar fallas a corto plazo.

3.10 Diagrama unilineal del proyecto

Dentro de la proyección de puesta en servicio del sistema fotovoltaico, las normativas vigentes, para la puesta en servicio de instalaciones aisladas que serán declaradas ante la SEC mediante un TE-1, exigen un diagrama unilineal de la instalación que se interviene, este contiene las respectivas canalizaciones, longitud de conductores, caída de tensión, datos de tablero general, datos de protecciones eléctricas, sistema de puesta a tierra y planos, entre otros. El diagrama fue realizado mediante el software AutoCAD y en él se detallan características técnicas y especificaciones según norma. Este diagrama se encuentra adjunto como anexo en el presente informe. El anexo N°1 detalla el diagrama unilineal dimensionado para el sistema fotovoltaico.

CAPITULO IV

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE PRODUCCION DE HIDRÓGENO VERDE

4.1 Electrolizador Alcalino

El primer electrolizador alcalino fue desarrollado en Suiza en el año 1902, gracias a la novedad del proyecto se instalaron varios arreglos fotovoltaicos a gran escala en Noruega, pero el último arreglo clausuro en 1992, debido a que producir hidrógeno por medio de combustibles fósiles tenía menor costo económico. La figura N° 4.1 muestra un electrolizador alcalino actual, ubicado en el laboratorio de investigación de Nanotecnología, energía y sistemas complejos de la universidad.



Figura N° 4.1: Electrolizador alcalino.

Fuente: Elaboración propia.

El electrolizador alcalino es un equipo que gracias a una fuente de energía eléctrica permite la extracción de hidrógeno y oxígeno desde una solución acuosa alcalina. Los gases H_2 y O_2 producidos deben ser almacenados para ser utilizados en las aplicaciones que sean requeridas. El proceso utilizado por el equipo es el proceso llamado electrolisis alcalina.

El equipo que se utilizó en el proyecto es de McPhy Energy oxygen and hydrogen generator microprocessor control module (según fue descrito en las primeras secciones de este documento). Este equipo cuenta con un sistema de generación o extracción de hidrógeno y oxígeno, una celda electrolizadora que incluye un conjunto de placas de electrolisis, llamadas electrodos, un módulo de control de potencia, un dispositivo de retroalimentación de voltaje y corriente, un dispositivo de retroalimentación de temperatura y un controlador servo integrado que al ser de circuito cerrado es utilizado para generar gases de hidrógeno y oxígeno de manera eficiente y efectiva. Para más características e información del equipo ver la tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1: Características del equipo Electrolizador Alcalino disponible.

Modalidad de operación	Semiautomática con lazo de control de variables eléctricas
Seguridad del sistema	Mecánica
Consumo eléctrico máximo	7,4 kW (400 V, 50 Hz)
Consumo hídrico máximo desde destilador solar, aguas contaminadas o saladas.	0,8 L/h
Pureza de H₂	>99%
Velocidad de flujos de gases máximo.	Hidrógeno 1N ² m ³ /h; Oxígeno 0,51 N ² m ³ /h
Humedad ambiental	HR < 80%
Ubicación y condiciones de funcionamiento	>12°C < 40°C, buena ventilación, funciona en condiciones de interrupción
Medición de caudal	Flujómetro de masa calibrando para hidrógeno
Almacenamiento	Hidrógeno 5,5m ³ ; Oxígeno 6m ³ C

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Funcionamiento del equipo

El electrolizador alcalino está compuesto de dos series de terminales o placas de electrólisis conocidos como electrodos o simplemente ánodo y cátodo, distanciados entre sí y sumergidos en la solución de electrodoma. El ánodo es el terminal al cual está conectado el polo positivo y el cátodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal negativo de la batería o fuente de poder. Se aplica una corriente directa en estos electrodos y se produce una serie de reacciones electroquímicas en la superficie de ellos, el conjunto de todo el sistema suele ser llamado electrolisis alcalina.

Como ya se ha mencionado a lo largo del texto, en el ánodo se produce oxígeno y en el cátodo se produce hidrógeno, que posteriormente a través de mangueras llegan a ser almacenados a sus respectivos tanques de O_2 y H_2 , que circulan previamente por un filtro de desecado y purificación, respectivamente, que pueden observarse en la figura N° 4.2.

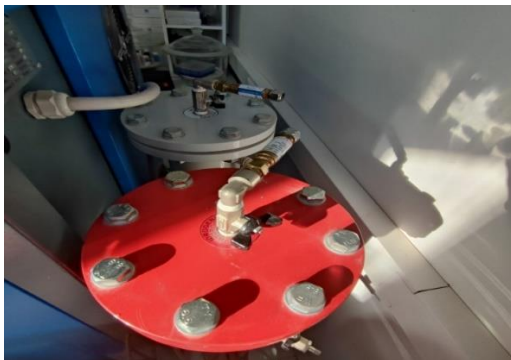


Figura N° 4.2: Filtros de desecado y purificación de oxígeno e hidrogeno.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Electrólisis Alcalina

Para obtener hidrógeno se necesita de un proceso electroquímico que consta en cambiar la forma de la materia a través de energía eléctrica. Uno de estos procesos electroquímicos es la electrólisis alcalina que funciona dentro de un equipo llamado electrolizador alcalino.

La electrólisis alcalina funciona en el agua separando sus moléculas de hidrógeno y oxígeno, haciendo pasar una corriente eléctrica por el sistema que permite la ruptura de las moléculas. (Ver la figura N° 4.3).

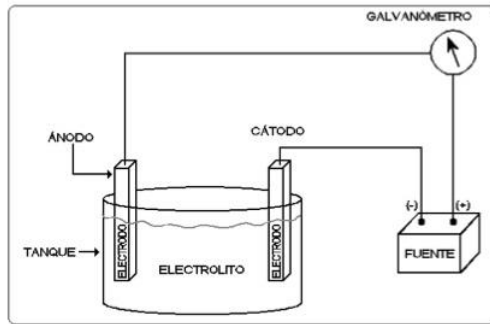


Figura N° 4.3: Proceso de electrólisis alcalina.

Fuente: Roymaplast 2023.

CAPITULO V

DESCRIPCIÓN DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y ELECTROLIZADOR

5.1 Metodología de puesta en marcha

En este apartado se detalla el paso a paso realizado para llevar a cabo el proyecto, los planes que se tienen preparados y su desarrollo respectivo. De la mano se entregará toda la información necesaria para comprender los objetivos planteados. Cabe destacar que el proyecto se regirá bajo el RIC N°9.1/2021, con la finalidad de modificar las instalaciones de acuerdo con la instrucción técnica cumpliendo con los aspectos de la normativa. Explicar cuidadosamente los procesos que se desarrollan dentro del plazo determinado requiere una mirada enfocada al ámbito técnico y práctico, lo que exactamente es el enfoque de este capítulo.

5.1.1 Mantenimiento al sistema de generación

Para comenzar, una de las primeras acciones con la idea de iniciar el desarrollo del proyecto fue realizar la limpieza del sistema de generación y su respectiva inspección, para esto se coordinó una visita junto a los profesores guías y un académico del laboratorio de física que permitiera el acceso hacia la instalación. Una vez en el lugar se comenzó a quitar la cantidad excesiva de polvo que se encontraba en la superficie de los módulos fotovoltaicos, dejándolos en su totalidad limpios, para esto se utilizó brochas, escobillas y un equipo soplador, que ayudaron a realizar la tarea más rápido. Se realizó la inspección visual de los módulos fotovoltaicos encontrándose todos en buen estado, como también la inspección de sus conexiones en la parte posterior.

Para que sea posible realizar una mantención correcta del sistema de generación se debe acondicionar el área con respecto al punto 19 del RIC N°9.1/2021, de él se obtendrá todos los aspectos de seguridad a la hora de realizar mantenimiento.

La actual instalación del sistema de generación no cuenta con un pasillo de mantención que sea seguro para trabajar sobre el techo, este se deberá construir con los requerimientos pertinentes dentro del pliego técnico.

También es preciso señalar que la estructura correspondiente al sistema de generación deberá cumplir con lo estipulado en el punto 7 del RIC N°9.1/2021, haciendo referencia a que el soporte de la unidad de generación deberá satisfacer la normativa chilena, en cuanto a edificación y diseño estructural para los efectos del viento, nieve y sísmicos. En las figuras N° 5.1, N° 5.2, N° 5.3 y N° 5.4 se puede observar el trabajo realizado en una de las primeras visitas a la instalación fotovoltaica.

La suciedad se hace presente durante el transcurso del tiempo y si no es aplicada una mantención adecuada se llegan a escenarios como este.



Figura N° 5.1: Módulos fotovoltaicos antes de limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se comenzó con la limpieza de los módulos, se presentaron secreciones y otros elementos pegados en la superficie de los módulos, los cuales dificultaron la limpieza profunda de la superficie del sistema de generación.



Figura N° 5.2: Polvo y secreciones pegadas en la superficie del módulo.

Fuente: Elaboración propia.

El panorama de los módulos fotovoltaicos comienza a cambiar una vez terminada la limpieza, el plano general toma mejor imagen.



Figura N° 5.3: Módulos fotovoltaicos después de limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

Se dio énfasis al estado de las conexiones posteriores de los módulos fotovoltaicos, revisión de conectores MC4, estado de conductores, fallas de aislación a simple vista, etiquetado de módulos, y cualquier otra característica que indique una situación anormal dentro de la instalación.

Lo que se debe hacer es aplicar la instrucción técnica general RIC N°9/2021 para normalizar el sistema de generación, donde se hace referencia a regularizar la estructura de los módulos, corroborar las exigencias de los módulos, canalizaciones, materiales, etc.



Figura N° 5.4: Conexiones en el lado posterior de los módulos fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración propia.

Realizada la primera limpieza al sistema de generación se entregó algunas recomendaciones, las cuales están enfocadas en la canalización de los cables conectores ubicados en el lado posterior de los paneles. Algunas recomendaciones son la siguientes:

- ✚ **Cable solar 6 mm:** De este conductor se deberá comprar una cantidad aproximada de 150m por color, en color rojo para el lado positivo y en negro para el lado negativo, que soporte hasta 1.8 kV y una corriente de 70 A, con material de cobre estañado. El conductor deberá cumplir con la designación tipo H1Z2Z2-K y los requisitos de la norma UNE-EN 50618 como menciona en el punto 11.12 del RIC N°9.1/2021.
- ✚ **Caja de conexión para cada string:** Dentro de esta caja se realizarán las conexiones mixtas de los string, más claro la conexión en paralelo dentro del circuito del string. También se podrán ubicar seccionadores para realizar reparaciones o cambio de módulos y si se contempla, la instalación de protecciones DC. Estas cajas van ubicadas por lo general detrás de los módulos fotovoltaicos.

- ✚ **Canalizaciones:** Para regular las conexiones entre los módulos y las bajadas de los string, se deberán utilizar canalizaciones galvanizadas resistentes a la corrosión, con una salida de aire para la condensación del agua en su interior. La canalización que se recomienda utilizar es un Conduit galvanizado de 40 mm.

- ✚ **Prensas estopa:** Estas prensas deberán ir en los puntos de entrada de los conductores para evitar que ingrese suciedad y agua dentro de las cajas de conexiones o tableros eléctricos.

- ✚ **Puesta a tierra:** Se recomienda realizar un sistema de puesta a tierra la estructura del sistema de generación y las canalizaciones galvanizadas que se instalarán, para esto se deberá tomar en cuenta lo estipulado en el RIC N°5 y RIC N°6 proporcionada por la SEC.

- ✚ **Redireccionamiento de los conductores:** En el techo donde está ubicado el sistema de generación, los cables provenientes de los string se encuentran enrollados a un costado de la estructura, se recomienda darles una ubicación donde su bajada hacia la bodega donde se instalaran los equipos sea favorable a la instalación de las canalizaciones, en un lado lateral del edificio se encuentran pilares de construcción que sobresalen un poco hacia la techumbre, instalar las canalizaciones en este pilar es una buena idea ya que su ubicación no interfiere con nada y la pared no presenta daños en la estructura, también se encuentra a la vista y es expedito.

5.1.2 Limpieza y aprovechamiento de espacios destinados a la instalación

Para la instalación de todos los equipos necesarios en el proyecto se debe contar con un espacio destinado a esto y fue aquí donde se presentó la oportunidad de utilizar una pequeña bodega, el espacio es adecuado para instalar todo lo necesario siempre que se haga de manera ordenada. La acción por realizar fue de limpieza y reubicación de los materiales acopiados en la bodega. Ver las figuras N° 5.5 y N° 5.6.

La ubicación de esta es muy accesible ya que se encuentra en un espacio abierto, de igual manera cuenta con puertas metálicas lo que permite la utilización de candados para restringir el acceso a terceros, al estar ubicada a unos metros del equipo electrolizador alcalino, el conexionado desde la bodega hasta el interior del recinto no deberá presentar mayores inconvenientes.



Figura N° 5.5: Bodega con materiales de laboratorio ya retirados.

Fuente: Elaboración propia.

Al momento de la limpieza se presentó bastante suciedad y basura dentro de la bodega, se utilizó ropa adecuada, guantes e insecticida para eliminar los peligros.



Figura N° 5.6: Suciedad dentro de la bodega.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de esta bodega se instalarán los tableros eléctricos con sus respectivas protecciones y los equipos que conforman el sistema fotovoltaico, para regularizar la bodega, realizar la instalación de los equipos y el conexionado de estos, se aplicara toda la información proporcionada por el RIC N°9.1/2021.

5.2 Materiales con necesidad de compra

Para saber la cantidad de materiales que son necesarios para el proyecto, se tuvo que realizar una planilla de cotejo con los materiales con los que cuenta la universidad y los no estaban disponibles en el establecimiento y es necesaria su compra. Tras conocer todos los implementos y materiales, realizados en las diversas cotizaciones presenciales dentro de Copiapó, se encontraron diversos precios acordes a la calidad de los implementos requeridos para implementar un proyecto de adecuada calidad.

La tabla N° 5.1 muestra la cotización que se tuvo que realizar en base a los implementos faltantes que se necesitan para llevar a cabo la puesta en marcha de sistema fotovoltaico conectado con electrolizador:

Tabla N° 5.1: Cotización de materiales con necesidad de compra.

Producto	Cantidad	Adquirido o compra necesaria	Valor
Conduit Galvanizado 1 ½	17	Compra necesaria	\$316.866
Conduit Galvanizado ½	3	Compra necesaria	\$20.304
Curva Conduit Galvanizado 1 ½	10	Compra necesaria	\$70.081
Curva Conduit Galvanizado ½	8	Compra necesaria	\$5.075
Copla Conduit Galvanizado 1 ½	20	Compra necesaria	\$14.603
Copla Conduit Galvanizado ½	6	Compra necesaria	\$4.672
Abrazadera Clamp ½	10	Compra necesaria	\$6.464
Cable solar rojo 1.8 kV	150 metros	Compra necesaria	\$153.090
Cable solar negro 1.8 kV	150 metros	Compra necesaria	\$153.090
Caja A-11 universal tapa y empaquetadura	6	Compra necesaria	\$5.239
Bandeja DLP3 BCA 80X35mm (Tira 2 metros)	4	Compra necesaria	\$78.613
Tapa DLP3 BCA 65mm FLEX (Tira 2 metros)	4	Compra necesaria	\$39.511
Angulo exterior DLP3 35mm	6	Compra necesaria	\$38.824
Angulo interior DLP3 35mm	6	Compra necesaria	\$78.613
Tapa final DLP3 80x35mm	6	Compra necesaria	\$15.948
Enchufe hembra 380 V, 32 A, 3P + N + T	1	Compra necesaria	\$3.275
Conector fotovoltaico MC4, 1500 V, 30 A	2	Compra necesaria	\$12.260
Regleta TIERRA DIN 8Px16mm	2	Compra necesaria	\$14.203
Regleta FASE DIN 8Px16mm	2	Compra necesaria	\$14.203
Regleta NEUTRO DIN 8Px16mm	2	Compra necesaria	\$12.509
Cinta vinil 19mm x 18 m, negra Temflex	2	Compra necesaria	\$2.345
Cinta goma ¾ x 5 m 3M	2	Compra necesaria	\$15.717

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Descripción de materiales cotizados

- ✚ **Conduit Galvanizado:** Conductos de acero galvanizado, fabricados para instalaciones eléctricas, cuyo fin es contener y proteger cables eléctricos entre otros tipos de cables.
- ✚ **Curva Conduit Galvanizado:** Curva de acero galvanizado de acople rápido que permite unir Conduit galvanizados en curva
- ✚ **Copla Conduit Galvanizado:** Sistema que permite la unión de un Conduit galvanizado a otro.
- ✚ **Abrazadera Clamp:** es un accesorio de acero inoxidable que permite la sujeción de cables, ductos, mangueras entre otros. Está diseñado para usos exteriores.
- ✚ **Cable solar:** Este cable es diseñado para uso en paneles solares, es recomendado en instalaciones expuestas al medioambiente, dentro de sus características posee un doble recubrimiento altamente resistente a la temperatura y los rayos UV.
- ✚ **Caja de distribución metálica:** es una caja metálica empotrada que tiene como objetivo ocultar los uniones o empalmes del cableado en las conexiones eléctricas para que no sean visibles además de evitar contacto con el exterior.
- ✚ **Bandeja 3 DLP:** es una bandeja porta conductores, es de una rápida instalación. diseñada para brindar protección mecánica y eléctrica a los conductores. para uso estándar de canalización eléctrica y remodelaciones en general.
- ✚ **Tapa Bandeja 3 DLP:** Es una tapa flexible y dentada que facilita la instalación, al ya estar instalada, el dentado mantiene firme el encaje de la tapa a la bandeja.
- ✚ **Angulo exterior Bandeja 3 DLP:** Se utilizan para acodar las bandejas en 60° a 120°, están diseñados para ser utilizados en el costado superior e inferior de la bandeja, la tapa dentada se encaja en los ángulos.
- ✚ **Angulo interior Bandeja 3 DLP:** Se utilizan para acodar las bandejas en 80° a 100°, están diseñados para ser utilizados en el costado superior e inferior de la bandeja, la tapa dentada se encaja en los ángulos.
- ✚ **Tapa Final Bandeja 3 DLP:** Tapa que se instala en los extremos derecho o izquierdo, se utiliza para sellar la canalización de una forma estética.

- ✚ **Enchufe hembra 380V sobrepuesto:** Este se utiliza para poder realizar contacto con un enchufe macho de las mismas características, permitiendo el paso de electricidad y con ello energizar el equipo definido.
- ✚ **Conector MC4 1500V:** Es un conector eléctrico utilizado para conectar paneles solares fotovoltaicos y el resto del sistema de energía solar. Constan de un conector macho y hembra con un mecanismo de bloqueo que garantiza una conexión segura y resistente a la intemperie.
- ✚ **Regleta Tierra DIN 8Px16mm:** Las regletas de conexión de Tierra distinguidas por el **color verde**, son dispositivos utilizados para realizar conexiones eléctricas de manera segura y ordenada dentro de un tablero eléctrico, cuenta con 8 perforaciones con tornillo de fijación que facilita la instalación y contacto de los diferentes puntos que se necesiten unir.
- ✚ **Regleta Neutro DIN 8Px16mm:** Las regletas de conexión de Neutro distinguidas por el **color azul o blanco**, son dispositivos utilizados para realizar conexiones eléctricas de manera segura y ordenada dentro de un tablero eléctrico, cuenta con 8 perforaciones con tornillo de fijación que facilita la instalación y contacto de los diferentes puntos que se necesiten unir.
- ✚ **Regleta Fase DIN 8Px16mm:** Las regletas de conexión de Fase distinguidas por el **color negro**, son dispositivos utilizados para realizar conexiones eléctricas de manera segura y ordenada dentro de un tablero eléctrico, cuenta con 8 perforaciones con tornillo de fijación que facilita la instalación y contacto de los diferentes puntos que se necesiten unir.
- ✚ **Cinta aislante:** Es una cinta adhesiva, utilizada para aislar empalmes eléctricos y reparar revestimiento de conductores, resistente a temperaturas altas, corrosión y humedad.

5.3 Calculo de conductores en CC y CA

Para elegir el conductor que transporte la carga generada se aplicará un factor de seguridad de 1,25. El cálculo de la corriente en operación que deberá soportar el conductor es la siguiente:

$$I_{operacion} = I_{SCstring} * 1,25$$

$$I_{operacion} = 38,91 * 1,25$$

$$I_{operacion} = 48,64 \text{ A}$$

Para el caso de la tensión de operación, se le aplicara una caída de tensión del 3% para los conductores de CC provenientes del string, con lo cual se obtiene su valor a través de la siguiente siguiente ecuación:

$$\text{Caída de tensión} = 3\% \times V_{nominal}(\text{string})$$

$$\text{Caída de tensión} = 3\% \times 104$$

$$\text{Caída de tensión} = 3,12 \text{ V}$$

Primero se calculará la sección del conductor en CC, con la siguiente formula:

$$S = \frac{2 * \rho * L}{3,12 \text{ V}} \times I$$

Donde:

✚ S: es la sección transversal del cable en mm², Ø diámetro.

✚ 2: dos veces (constante monofásica).

- ✚ L: longitud del cable en metros.
- ✚ ρ: Resistividad de conductor (Cobre).
- ✚ I: corriente del sistema.

$$S = \frac{2 \times 0,0175 \times 52}{3,12 V} \times 48,64$$

$$S = \frac{88,52}{3,12 V}$$

$$S = 28,37 \text{ mm}^2$$

Según el cálculo realizado la sección del conductor se debe seleccionar según lo indicado en el pliego técnico RIC N°4 Conductores y canalizaciones, en base a esta normativa el conductor elegido será de una sección nominal de 1x35mm² y una tensión de hasta 1800V, el código de identificación corresponde a H1Z2Z2-K, el material de asilamiento será de elastómero termoestable libre de halógenos.

Ahora para calcular el conductor de CA utilizaremos la siguiente formula:

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * Fp * I}{\Delta V}$$

Donde:

- ✚ S: es la sección transversal del cable en mm², Ø diámetro.
- ✚ √3: raíz de tres (constante trifásica).
- ✚ L: longitud del cable en metros.
- ✚ σ: resistividad del material cobre (59)
- ✚ I: corriente del sistema.
- ✚ Cos φ: Es el factor de potencia que en AC se divide la potencia del equipo sobre la instalada.

Al tener corriente alterna solo en la parte trifásica del circuito, se debe obtener la caída de tensión, quedando de la siguiente manera:

$$Caida\ de\ tensión = 3\% \times V_{nominal}$$

$$Caida\ de\ tensión = 3\% \times 380\ V$$

$$Caida\ de\ tensión = 11,4\ V$$

Ya con este dato se pueden remplazar todos los valores:

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,0175 * 40m * 38A * 0,76}{11,4\ V}$$

$$S = 3,07mm^2$$

En base al calculo anterior el conductor utilizado será de 4mm², según el RIC N°4 corresponde al código de clasificación “H05VVH2-F”, trabaja con niveles de tensión entre 300 a 500 V y soporta una corriente de 34A.

5.4 Protecciones eléctricas

Las protecciones destinadas al sistema fotovoltaico se instalarán separadas, lado de CC y CA, para así cumplir con el estándar básico que pide la normativa eléctrica, en esta nos basaremos utilizando los pliegos técnicos RIC N°5 y RIC N°9.1/2021. Lo establecido en el Pliego técnico RIC N° 9 en el punto 6.2 especifica que los sistemas de autogeneración que funcionen en paralelo con la red deberán contar con una protección de potencia inversa, lo cual como se menciona en el pliego técnico, no se puede aplicar inyección de red eléctrica porque el hidrógeno verde que se requiere generar pasaría a catalogarse como hidrógeno amarillo.

Se exige aterrizar cuando el sistema es mayor a 50 V y según lo establecido por el punto 15.1 del Pliego Técnico RIC N°9.1/2021 todas las partes metálicas de la instalación deberán conectarse a la tierra de protección. Carcasas, estructuras metálicas, protecciones, entre otras deben ir aterrizadas. Como lo indica el punto 6.4 del Pliego Técnico RIC N°9, la protección por falla a tierra podrá estar contenida en un interruptor diferencial o en un bloque diferencial como parte del interruptor termomagnético, el diferencial deberá ser del tipo A o B y su corriente diferencial no será superior a 30 mA para unidades de generación para potencia instalada inferiores a 10 kW, mientras que para unidades de generación igual o superior a 10 kW su corriente diferencial no será superior a 300 mA. Además, el cable que se utilice debe soportar un 25% más que la I_{sc} del equipo.

Para dimensionar el conductor para aterrizar el arreglo se requiere de un cable con buena capacidad, por lo cual es necesario un cable no menor a 8 AWG de cobre o Aluminio que sea capaz de soportar cualquier descarga y no sea un peligro para las personas.

5.4.1 Protección DC

Para la protección en la parte de corriente continua de las instalaciones, las cuales irán ubicadas en las cajas de conexiones detrás de los módulos, se calculará de tal forma que cada string cuente con sus protecciones por separado, siendo las tres similares. Los valores que se deben tomar en cuenta para la selección de protecciones en DC deberán tener un factor de seguridad para su correcto funcionamiento. El fabricante sugiere que para la selección de las protecciones en DC se tomen los valores de generación de salida de todos los módulos.

Además, instalar una “junction box”, la cual consiste en una caja de protecciones eléctricas compuesta por un seleccionador, que permite el cierre o apertura de circuito para poder realizar mantención o requerir en caso de fallas, una porta fusibles bipolar y una protección de sobre corriente, este equipo permitiría facilitar el proceso de compra, dado a que las protecciones vienen incluidas, además de proteger el circuito del exterior, gracias a que cuenta con IP 65.

El arreglo fotovoltaico consta de tres strings conformados, cada uno por seis módulos fotovoltaicos, los cuales se agrupan en tres pares en serie, estos tres pares se conectan entre sí en paralelo, para poder alcanzar la tensión y corriente deseada. Ver la figura N° 5.7.

En las tablas N° 5.2 y N° 5.3 se muestran los datos necesarios para comenzar con el cálculo de las protecciones eléctricas.

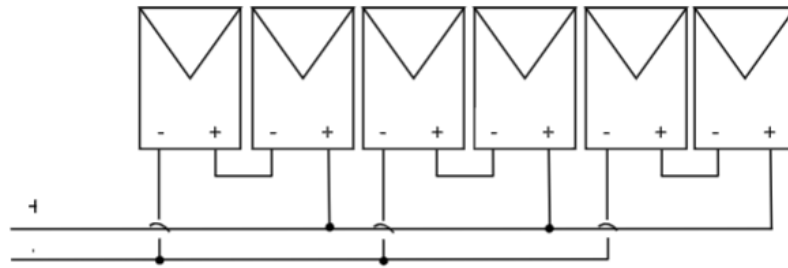


Figura N° 5.7: Diagrama conexión mixta arreglo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 5.2: Características técnicas del módulo.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS	UNIDAD	VALOR
Corriente en máxima potencia	Imp	12.97 A
Tensión en máxima potencia	Vmp	41.64 V
Corriente de corto circuito	Isc	13.86 A
Tensión de circuito abierto	Voc	49.6 V
Potencia máxima	Pmax	540 W

Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos podemos calcular la corriente de corto circuito por string (Isc), para esto se debe utilizar la corriente de corto circuito de los módulos individuales en base a la conexión mixta que se realizó por string.

$$I_{SC_{string}} = I_{SC_{modulo}} * 3$$

$$I_{SC_{string}} = 13,86 \text{ A} * 3$$

$$I_{SC_{string}} = 41,58 \text{ A}$$

Se debe realizar lo mismo para calcular la tensión de circuito abierto del string (Voc), para esto se debe utilizar la tensión de circuito abierto de los módulos individuales en base a la conexión mixta que se realizó por string.

$$V_{OC_{string}} = V_{OC_{modulo}} * 2$$

$$V_{OC_{string}} = 49,6 \text{ V} * 2$$

$$V_{OC_{string}} = 99,2 \text{ V}$$

Al conocer la corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto del string, también es importante conocer la tensión y corriente que se produce cuando los módulos trabajan a máxima potencia, esto se calcula a continuación. Una vez calculados estos parámetros del string se presentarán en una tabla ordenadamente.

Se debe realizar lo mismo para calcular la corriente en máxima potencia por string (Isc), para esto se debe utilizar la corriente en máxima potencia de los módulos individuales en base a la conexión mixta que se realizó por string.

$$I_{mp_{string}} = I_{mp_{modulo}} * 3$$

$$I_{mp_{string}} = 12,97 \text{ A} * 3$$

$$I_{mp_{string}} = 38,91 \text{ A}$$

Se debe realizar lo mismo para calcular la tensión en máxima potencia del string (V_{mp}), para esto se debe utilizar la tensión en máxima potencia de los módulos individuales en base a la conexión mixta que se realizó por string.

$$V_{mp_{string}} = V_{mp_{modulo}} * 2$$

$$V_{mp_{string}} = 41,64 \text{ V} * 2$$

$$V_{mp_{string}} = 83,28 \text{ V}$$

Tabla N° 5.3: Parámetros eléctricos del string.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS	UNIDAD	VALOR
Corriente nominal por string	Imp	38.91 A
Tensión nominal por string	Vmp	83.28 V
Corriente de corto circuito	Isc	41.58 A
Tensión de circuito abierto	Voc	99.2 V

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.1 Protección sobre corriente

Para el cálculo de la protección se seguirá las indicaciones estipuladas en el pliego técnico RIC N°9 y RIC N°9.1/2021 de la normativa vigente, estipula que los interruptores automáticos y seccionadores de CC, deberán cumplir con los requerimientos de las normas IEC 60947-2 o IEC 60947-3 y ser capaces de extinguir arcos eléctricos en CC.

Para calcular el rango de la protección utilizaremos la corriente de corto circuito de string, a la cual se le agregara un factor de seguridad del 25% (1,25). El cálculo queda de la siguiente manera:

$$I_{SC_{sobredimensionada}} = I_{SC_{string}} * 1,25$$

$$I_{SC_{sobredimensionada}} = 41,58 \text{ A} * 1,25$$

$$I_{SC_{sobredimensionada}} = 51,975 \text{ A}$$

Con el dato resultante la protección por sobre corriente deberá ser de 52 A aproximadamente, también debería ser de dos polos para proteger el positivo y negativo del string. Se instalarán tres en total, uno para cada string, de esta manera se puede proteger la instalación por secciones y no quedara completamente aislada en caso de falla.

5.4.1.2 Fusibles y porta fusibles

Según lo estipulado en el pliego técnico RIC N°9.1/2021, los fusibles deberán cumplir con lo siguiente:

- ✚ Ser seleccionados para ser capaces de disipar la potencia que se desarrolla en las peores condiciones de funcionamiento.
- ✚ Estar clasificados para ser utilizado en CC.
- ✚ Contar con una clasificación de tensión igual o superior que la tensión máxima del sistema fotovoltaico.
- ✚ Ser de clase GPV para instalaciones fotovoltaicas.
- ✚ Cumplir con los requerimientos de la norma IEC 60269-6.

La porta fusibles deberá cumplir con lo siguiente:

- ✚ Estar clasificados para ser utilizado en CC.
- ✚ Contar con una clasificación de tensión igual o superior que la tensión máxima del sistema fotovoltaico.
- ✚ Contar con una clasificación de corriente admisible igual o superior que el fusible correspondiente.
- ✚ Entregar un grado de protección adecuado a su ubicación.
- ✚ Cumplir con los requerimientos de la norma IEC 60947-3.

Aplicaremos el mismo calculo con la tensión de circuito abierto para el rango de la protección del string, resulta lo siguiente:

$$V_{OC_{sobredimensionada}} = V_{OC_{string}} * 1,25$$

$$V_{OC_{sobredimensionada}} = 99,2 \text{ V} * 1,25$$

$$V_{OC_{sobredimensionada}} = 124 \text{ V}$$

Con este cálculo se puede dimensionar el rango de operación de los fusibles, los porta fusibles, interruptores termomagnéticos y seccionadores, ya que todas estas protecciones obedecen a la misma tensión y corriente.

En el tramo de corriente continua, cada string entre la conexión al regulador de voltaje, debe ir instalada una caja de protecciones, la cual debe incluir un interruptor termomagnético bipolar Curva C de 63 A/ 1000 V, fusibles bipolar de 65 A y un seccionador, que permita el corte de energía en caso de intervención o mantención a los equipos que se encuentren aguas abajo del arreglo, por otra parte, entre la conexión de la batería al inversor, debe ir un fusible bipolar de 65 A, que permita proteger al inversor en caso de falla.

5.4.2 Protección AC

Lo que estipula el RIC N°9.1/2021 en el punto 14.10 es, las instalaciones fotovoltaicas, en el lado de corriente alterna, deberán contar con una protección diferencial, e interruptor general magnetotérmico, tetrapolar para el caso de las instalaciones trifásicas, con una corriente de cortocircuito adecuada a la potencia de salida del o los inversores. En base a esto calcularemos los rangos para las protecciones en el lado de corriente alterna.

Las protecciones CA se utilizarán en el trayecto del inversor y el equipo electrolizador alcalino, estas deberán satisfacer las demandas de consumo del electrolizador para así asegurar su protección. Para determinar los valores de las protecciones se utilizarán los valores de placa del electrolizador alcalino. Ver la tabla N° 5.4.

Tabla N° 5.4: Valores técnicos del electrolizador.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS	UNIDAD	VALOR
Corriente de trabajo nominal del electrolizador	Inom	38 A
Tensión de trabajo nominal del electrolizador	Vnom	400 V

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.1 Interruptor magnetotérmico tetrapolar

El interruptor magnetotérmico indicado en el punto 14.10 del RIC N°9.1/2021 debe ser uno que permita la desconexión del generador fotovoltaico y las cargas locales, también deberá ser para este caso de corte tetrapolar, ya que la instalación CA será de tipo trifásica. Deberá cubrir las siguientes especificaciones:

- ✚ Ser manualmente operable.
- ✚ Contar con un indicador visible de la posición "On-Off".
- ✚ Tener la capacidad interruptora requerida de acuerdo con la corriente de cortocircuito adecuada a la potencia de salida del o los inversores.
- ✚ Debe ser operable sin exponer al operador con partes activas.

Para calcular el rango de la protección tetrapolar, debemos conocer la corriente asociada a la carga que se desea alimentar, en este caso corresponde al electrolizador alcalino, el cual tiene una corriente de trabajo de 38 A, a la cual le aplicaremos el factor de seguridad para su correcta operación. El dimensionamiento del rango queda de la siguiente manera:

$$Inm_{sobredimensionada} = Inm_{electrolizador} * 1,25$$

$$Inm_{sobredimensionada} = 38 \text{ A} * 1,25$$

$$Inm_{sobredimensionada} = 47,5 \text{ A}$$

Para el caso de la tensión trifásica aplicaremos el mismo factor de seguridad.

$$Vnm_{sobredimensionada} = Vnm_{electrolizador} * 1,25$$

$$Vnm_{sobredimensionada} = 400\text{V} * 1,25$$

$$Vnm_{sobredimensionada} = 500 \text{ V}$$

Con estos parámetros el interruptor termomagnético tetrapolar deberá soportar una tensión máxima de 500 V y una corriente de operación de 47,5 A.

5.4.2.2 Protección diferencial

La protección diferencial del lado de corriente alterna, indicada en el punto 14.10 del RIC N°9.1/2021, que se instale en un sistema fotovoltaico aislado deberá ser del tipo A. La protección diferencial seleccionada deberá ser de una corriente diferencial no superior a 300 mA y una corriente nominal de 47,5 A, la cual se calculó en el punto anterior, por esto se propone la protección diferencial tetrapolar de 4x63 A marca Siemens, que permitirá la protección del equipo electrolizador alcalino.

En la ficha técnica que entrega el fabricante del inversor, se mencionan algunas protecciones internas que ya se encuentran incluidas en el dispositivo, de igual manera se protegerá el equipo con protecciones externas que se determinan a continuación.

5.4.3 Banco de condensadores

Este equipo cumple la función de reducir caídas de tensión, mitigar fallas o incrementar la transmisión de energía, por lo cual es importante su instalación para así disminuir la energía reactiva, evitando fallas en el equipo.

Para poder calcular el banco de condensadores, se utiliza la siguiente fórmula. El ángulo de factor de potencia final corresponde a un 0,93, ya que en Chile la legislación eléctrica vigente obliga a no bajar su FP correspondiente a este valor, el cual representa el mínimo admisible.

$$Q_c = P * (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

Donde:

✚ Q_c = Potencia reactiva del condensador.

✚ $\operatorname{tg}\varphi_1$ = Ángulo de factor de potencia inicial (0,76).

✚ $\operatorname{tg}\varphi_2$ = Ángulo de factor de potencia final (0,93).

$$\operatorname{Cos}^{-1}g\varphi_1 = 40,54 ; \operatorname{Cos}^{-1}g\varphi_2 = 21,57$$

$$\operatorname{Tan} g\varphi_1 = 0,85 ; \operatorname{Tan} g\varphi_2 = 0,40$$

Aplicamos en la fórmula:

$$Q_c = 7400 * (0,85 - 0,40)$$

$$Q_c = 3330 \text{ VAr}$$

Al tener todos los datos, se debe remplazar en la siguiente formula quedando de la siguiente manera:

$$C = \frac{Qc}{\omega * Vc^2}$$

Donde:

✚ Qc= Potencia reactiva del condensador.

✚ Vc= Voltaje donde se conecta el condensador.

✚ W= 2*pi*f = Velocidad Angular.

$$C = \frac{3330 \text{ VAr}}{2 * \pi * f * (400^2)}$$

$$C = 66,248 \text{ uF}$$

Por el resultado obtenido el Banco de condensador debe ser de 66,248µF (microfaradios) para cumplir con lo requerido.

5.5 Trabajo en terreno

Para realizar el acople de manera física para alimentar el electrolizador, primero se deben realizar los cálculos básicos requeridos para el correcto funcionamiento. Calcular todos los materiales necesarios para conectar los dispositivos, que corresponden a los módulos fotovoltaicos, con otros componentes que conforman el sistema fotovoltaico, para luego conectar el electrolizador es sin duda un trabajo que debe realizarse de forma rigurosa.

Este proyecto conlleva la búsqueda de la mejor opción para realizar la conexión general, y todos los trabajos que sean necesarios. De esta manera es factible en términos económicos realizar la conexión de manera subterránea, para esto será necesario hacer una excavación en el terreno donde se introducirán tuberías de un material específico para el paso de los cables conductores proveniente de los paneles, como también las canaletas de bajada de los mismos cables. Para regular todo el trabajo tenemos que seguir los puntos que señalan los pliegos técnicos RIC N°9.1/2021 y RIC N°4.

Una vez realizado el tendido de los cables, se debe asegurar que estos lleguen hasta el punto de conexión con los inversores, para esto se destinara una pequeña sala ubicada fuera de los laboratorios de investigación del departamento de química y biología, donde se instalarán los inversores y baterías del sistema fotovoltaico. Dentro de ella se harán las conexiones que sean necesarias para habilitar el punto de conexión hacia el electrolizador.

5.5.1 Paso a paso de la propuesta de puesta en marcha

5.5.1.1 Recopilación de material necesario

Para realizar el proyecto, lo primero que se debe hacer, es planificar los materiales que son necesarios para poder llevar a cabo la instalación eléctrica del sistema fotovoltaico y posterior alimentación eléctrica del equipo electrolizador alcalino.

Esto es posible realizando mediciones físicas del área de trabajo y mediciones físicas de los tramos de conexión entre los diversos equipos que se necesitan para la instalación general del sistema, además de realizar un dimensionamiento eléctrico para confirmar que diámetro de cable se debe utilizar y su canalización correspondiente según las normativas vigentes.

La planificación de materiales se debe ver reflejada a través de la tabla N° 5.4, para tener la información disponible cuando sea necesario, considerando la cantidad de productos que se encuentren en la Universidad y los que necesitan ser comprados.

Para dimensionar las distancias de los cables solares, se utilizó una cinta métrica de 50 m aproximadamente para dimensionar los trayectos donde serán ubicadas las canalizaciones y dentro de ellas los conductores, se tomó la decisión de que la mejor opción es comprar rollos de 150 m de cable solar para utilizar en caso de alteraciones en el trayecto del conductor. Las medidas de las canalizaciones si se dimensionan de manera más exactas con la ayuda de la cinta métrica.

Las protecciones fueron calculadas y entregados el dato para su elección, aquí dependerá del instalador la marca o tipo de protección que desee instalar, siempre cumpliendo la normativa vigente.

Los diferentes tipos de cable para las puestas a tierra se deberán seleccionar según lo estipula el pliego técnico normativo RIC N°6, puesta a tierra y enlace equipotencial.

Tabla N° 5.5: Planificación de materiales necesarios para proyecto

Equipo o material	Cantidad Necesaria	Material disponible o con necesidad de compra
Controlador de carga	3 unidades	Material disponible
Inversor de corriente	3 unidades	Material disponible
Paneles fotovoltaicos	18 unidades	Material disponible
Baterías	3 unidades	Con necesidad de compra
Tablero metálico	2 unidades	Con necesidad de compra
Conduit galvanizado 1 ½	31 metros	Con necesidad de compra
Conduit galvanizado ½	9 metros	Con necesidad de compra
Curva conduit galvanizado 1 ½	10 unidades	Con necesidad de compra
Curva Conduit galvanizado ½	8 unidades	Con necesidad de compra
Copla conduit galvanizado 1 ½	20 unidades	Con necesidad de compra
Copla conduit galvanizado ½	6 unidades	Con necesidad de compra
Abrazadera clamp ½	10 unidades	Con necesidad de compra
Cable solar 6 mm color rojo	150 metros	Con necesidad de compra
Cable solar 6 mm color negro	150 metros	Con necesidad de compra
Interruptor magnetotérmico tetrapolar	1 unidad	Con necesidad de compra
Protección diferencial	1 unidad	Con necesidad de compra
Fusibles y porta fusibles	3 unidades	Con necesidad de compra
Protección sobre corriente	3 unidades	Con necesidad de compra
Bandeja DLP3 80x35 mm	8 metros	Con necesidad de compra
Tapa DLP3 65 mm	8 metros	Con necesidad de compra
Angulo exterior DLP3 35 mm	6 unidades	Con necesidad de compra
Angulo interior DLP3 35 mm	6 unidades	Con necesidad de compra
Tapa final DLP3 80x35 mm	6 unidades	Con necesidad de compra
Enchufe hembra 380V 32A 3P+N+T	1 unidades	Con necesidad de compra
Conector fotovoltaico MC4 1500 V 30 A	10 unidades	Con necesidad de compra
Regleta tierra	2 unidades	Con necesidad de compra
Regleta fase	2 unidades	Con necesidad de compra
Regleta neutra	2 unidades	Con necesidad de compra
Cinta vinil 19 mm x 18 mm negro	2 unidades	Con necesidad de compra
Cinta goma ¾ x 5 m	2 unidades	Con necesidad de compra

Fuente: Elaboración propia.

Todos los demás elementos en la tabla de materiales con necesidad de compra, son complementos a los mencionados anteriormente, si bien estos son los recomendables, a la hora de la instalación se podrá tomar la decisión si cambiar los materiales a favor y conciencia del instalador eléctrico certificado por la SEC.

5.5.1.2 Realizar cotización y compra de materiales faltantes

Al tener la información concreta de los materiales que son necesarios para realizar la instalación del sistema eléctrico, a través del listado de planificación de materiales, se podrá conocer los recursos faltantes para poder poner en marcha el proyecto cuando se requiera. Con esta información se pueden cotizar todo material necesario en las diferentes tiendas de productos eléctricos dentro de la ciudad de Copiapó siempre que exista stock disponible en las tiendas de la ciudad, en caso contrario se deberá buscar empresas a nivel nacional que cuenten con los materiales y hagan envíos a la región para poder gestionar una posible compra. Es recomendable buscar un precio acorde al mercado eléctrico y la mayor calidad en los productos, para aumentar seguridad en la instalación y evitar posibles fallas en los equipos.

La compra se podrá realizar siempre que exista la disponibilidad del uso del recurso económico, en caso de no tener financiamiento, se deberán buscar recursos gestionando el proyecto con diferentes fuentes de ingreso, como por ejemplo empresas de Copiapó o de la región de Atacama que les interese participar en la producción de hidrógeno verde, ya que es innovador para el crecimiento potencial de empresas con sello de sustentabilidad no contaminante.

Dentro de las diversas tiendas de productos eléctricos, que se encuentran en la ciudad de Copiapó, se realizó la solicitud de cotización en Dartel, Sonepar y Gobantes. Siendo Dartel la única tienda que cuenta con la gran mayoría de los materiales necesarios, mientras que Sonepar y Gobantes no tienen stock disponible o no trabajan en la venta de ciertos artículos.

Las figuras N° 5.8 y N° 5.9, muestran las cotizaciones de dos empresas.


		Sonepar Chile S.A. Long 5 Norte Acc. Sur 425 local B2 Copiapó - Atacama RUT 96896480-1 Tel. (56) 522218720 www.sonepar.cl		 Tubo conduit rígido metálico galv. 63mm 3mts PI60063 \$38.878				
Empresa UNIVERSIDAD DE ATACAMA RUT 71236700-8 Contacto CRISTIAN ARAYA Teléfono 987852924 E-mail christian.araya@uda.cl Lugar Entrega AVDA.COPAYAPU 485 - Copiapo Cond. Pago Contado Moneda CLP Pesos				Precio Incluye IVA 				
Cotización No. 6450969		25/09/2023						
ITEM	CÓDIGO	UNID.	DESCRIPCIÓN	REF.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	PLAZO DIAS
1	PI60050	TR	CONDUIT RÍGIDO 50MM 3MT ESP. 3,25 mm RGD50	RGD50	17	28.785,00	489.345,00	2 días
2	PI60020	TR	CONDUIT RÍGIDO 20MM 3MT ESP. 2,5 mm RGD20 RGD20MM	RGD20MM	3	7.305,00	21.915,00	Inmediato
3	PI62050	CU	COPLA 50MM GALVANIZADA RIGIDA IEC IRC50 Producto en "Oferta Septiembre 2023 válida hasta 30/09/2023 o hasta agotar stock de la unidades dispuestas en promoción"	IRC50	20	600,00	12.000,00	2 días
4	PI62020	CU	COPLA 20MM GALVANIZADA RIGIDA IEC IRC20	IRC20	6	291,00	1.746,00	2 días
5	TA54020	CU	ABRAZADERA CADDY 20MM-1/2 2409601 P/EMT	2409601	10	193,00	1.930,00	Inmediato
6	LG407806	CU	INTERRUPTOR AUT DX3 2P 63A 6/10 KA CURVA C TERMOMAGNETICO 407806	407806	3	81.748,00	245.244,00	2 días
7	CM10310	CU	CAJA DERIVACION ZINCADA 100X100X65MM A11 1/2-3/4 2409100	2409100	6	3.349,00	20.094,00	2 días
8	3M10001	CU	CINTA AISLADORA ANTIFLAMA NEGRA 600V 3/4" 20MTS 8061120701	8061120701	2	6.200,00	12.400,00	Inmediato
9	3M10309	CU	CINTA AISLADORA SCOTCH 2351 AUTOFUNDENTE NEGRA 69KV 19MM 3MTS H000157997	H000157997	2	3.017,00	6.034,00	Inmediato
SUB TOTAL:							810.708,00	
I.V.A.:							154.034,52	
TOTAL:							964.742,52	

Figura N° 5.8: Cotización empresa Sonepar.

Fuente: Elaboración propia.

Electricidad Gobantes S.A		25/09/2023				
Av. Matta #1195-Santiago		14:19,				
RUT : 080.409.800-3						
C O T I Z A C I O N - S A P - C O P I A N O O F I C I A L						
Fecha	25 de septiembre de 2023	0330-30063265				
Cliente	UNIVERSIDAD DE ATACAMA					
R.U.T	071236700-8					
Dirección	COPAYAPU - 485	Vendedor:S03-604-MESON COPIAPO				
Comuna	COPIAPO					
Ciudad	COPIAPO					
Cond. Pago	Cliente Contado					
Validez Cot.	VALIDEZ COTIZACION 72 HORAS. EN COND. ELECTRICOS 1 DIA					
Observacion:						
Contactenos al Tel. :	(2)6900000 o e-mail: contactenos@gobantes.cl					
	o al Fax : (2)6713784					
<u>Codigo</u>	<u>Cant</u>	<u>Emb</u>	<u>Descripcion</u>	<u>P.Unitario</u>	<u>Descuentos</u>	<u>Total</u>
I0610028	17,00	TIRA/1	Conduit 50 mm EMT No Roscable	23.139,90	38,00	243.895,00
			Ekoline 10 dias habiles			
I0610024	3,00	TIRA/1	Conduit 20 mm EMT No Roscable	5.437,95	38,00	10.115,00
			Ekoline			
I0609990	8,00	UNIDAD/1	Curva 90° EMT 20 mm Ekoline	1.100,40	38,00	5.458,00
I0609994	10,00	UNIDAD/1	Curva 90° EMT 50 mm Ekoline 10 dias habiles	5.419,05	38,00	33.598,00
I0609989	20,00	UNIDAD/1	Copla EMT 50 mm Ekoline	2.464,35	38,00	30.558,00
I0609985	6,00	UNIDAD/1	Copla EMT 20 mm Ekoline	427,35	38,00	1.590,00
I0607797	10,00	UNIDAD/1	Abrazadera Tipo #CD0B 20 mm Ekoline	427,35	38,00	2.650,00
N0468250	3,00	UNI/1	A9F77263 INT.AUT. C60N 2P 63A (C) 10KA	48.907,95	32,00	99.772,00
I0607815	6,00	UNIDAD/1	Caja A-11 C/Tapa Zincada (100 x 100 x 65 mm) Ekoline	3.808,35	38,00	14.167,00
N0263131	2,00	UNI/1	Temflex 165 19mm x 18m negra	1.785,00	28,75	2.544,00
N0263035	2,00	UNI/1	CINTA 33+ SUPER V. NEGRA 3/4 x 20 MTS 3M	7.046,55	28,75	10.041,00
Agradecemos su Preferencia						
Cotizado Por: S03 BASTIAN NICOLAS						
Forma de Pago: Efectivo. Cheque (Titular)				Total Neto		454.388,00
Cheque Empresas (Registrados)				19% IVA		86.334,00
Monto: QUINIENTOS CUARENTA MIL SETECIENTOS VEINTIDÓS Y 00 / 100				Total		540.722,00

Figura N° 5.9: Cotización empresa Gobantes.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la compra y teniendo los materiales a disposición, deben ser ubicados junto a los materiales ya adquiridos en la universidad, de esta manera se podrá tener todo material y equipo necesario en una misma ubicación, facilitando el orden del proyecto.

La figura N° 5.10 corresponde a la cotización final que se eligió por parte de la empresa Dartel, en ella aparecen en detalle los materiales necesarios para realizar el proyecto.



Dartel Copiapo Ltda.
 RUT: 76.004.048-7
 Giro: Distribuidora de artículos eléctricos e iluminación
 Dirección: Panamericana Sur 200 - Local A-9
 Ciudad: Copiapo Fono: (52) 2241481
 Fax: (52) 2236114

COTIZACIÓN	
N°	120376
FECHA	27 Septiembre 2023

Sres.	UNIVERSIDAD DE ATACAMA AVDA COPAYAPU 485	Ciudad	
Dirección	COPIAPO CHILE	R.U.T	71236700-8
Forma de Pago	Contado(Generico)	Fono	Sebastian Reynuaba
Plazo Entrega	500918	Vendedor	
N° Cliente		Atendido por	

#	Producto	Descripción	N° de catalogo	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	237401466	CONDUIT GALV 1 1/2 ANSic80.1		17	18.639	316.866
2	237401066	CONDUIT GALV 1/2 ANSic80.1		3	6.768	20.304
3	23745534	CURVA CONDUIT GALV 1.1/2	23745534	10	7.008	70.081
4	23745134	CURVA CONDUIT GALV 1/2	23745134	8	634	5.075
5	417431034	COPLA CONDUIT GALV 1.1/2 P/CONDUIT RIG	417431034	20	730	14.603
6	417420288	COPLA CONDUIT GALV 1/2 CCD-050	CCD-050	6	779	4.672
7	33002109	ABRAZ CLAMP 1/2	CD0B	10	646	6.464
8	15150671	CABLE SOLAR 6MM ROJO PRYSUN 1.8KV	20325272	150	1.021	153.090
9	15350671	CABLE SOLAR 6MM NEGRO PRYSUN 1.8KV	20325273	150	1.021	153.090
10	7726385	INT AUTOMATICO 2x 63A C 10KA S200	DS252001R06	3	44.830	134.489
11	117504266	CAJA A-11 KO UNIV TAPA+EMPAQ EG 1mm		6	873	5.239
12	T1041104	BANDEJA DLP3 BCA 80x35mm (X TIRA 2MT) (L)	10411	4	19.744	78.974
13	T1052104	TAPA DLP3 BCA 65mm FLEX (X TIRA 2MT) (L)	010521	4	9.878	39.511
14	1060104	ANG INTERIOR DLP3 35mm 10601 BL	010601	6	6.471	38.824
15	1062104	ANG EXTERIOR DLP3 35mm 10621 BL	010621	6	13.102	78.613
16	1072204	TAPA FINAL DLP3 BCA 80x35mm 10722	010722	6	2.658	15.948
17	612534	HBRA IND S/P 380V 32A 3P+N+T FX-6125	612534	1	3.275	3.275
18	660034	CONECTOR FOTOVOLTAICO MC4 MACHO/HEMBRA 1500V 30A IP 67 (5 UNIDADES)	660034	2	6.130	12.260
19	483204	REGLETA TIERRA DIN 8Px16mm (L)	4832	2	7.101	14.203
20	485204	REGLETA FASE DIN 8Px16mm	4852	2	7.101	14.203
21	484204	REGLETA NEUTRO DIN 8Px16mm (L)	4842	2	6.255	12.509
22	218716509	CINTA VINIL 19MM X 18M NEGRO TEMFLEX 165 (ex 1500)	UU00947247	2	1.172	2.345
23	218701009	CINTA GOMA 3/4x5MTS 23 3M	XE00240086	2	7.859	15.717

Comentarios	Valor mercadería	1.210.355
Item 3,5,14,15,21 disponible de 4 a 5 días hábiles.	Descuento 0,0000%	0
Demás ítem, entrega inmediata.	Sub-Total	0
	I.V.A	254.532
	Valor Factura	1.464.887

Figura N° 5.10: Cotización empresa Dartel.

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.3 Planificación e intervención de terreno

Al tener contempladas las medidas y la proyección de los equipos e instalación, se puede intervenir en el terreno, preparando y mejorando las áreas de trabajo para posteriormente realizar la instalación eléctrica. Para ingresar al área de los paneles solares solo existe un acceso, el cual consiste en un cuarto con una abertura en el techo, que permite subir a través de dos escaleras plegables a la superficie.

A pesar de que el acceso no genera inconvenientes, se deben implementar medidas de seguridad, ya que, al no contar con estas, se puede generar un accidente. Ver la figura N° 5.11.



Figura N° 5.11: Escaleras de acceso a módulos solares.

Fuente: Elaboración propia.

La intervención que se debe hacer periódicamente en el área de trabajo es la mantención y limpieza de los módulos solares ya instalados en la universidad, con la finalidad de mantener un uso eficiente de estos, además de mantenerlos libres de la capa de suciedad, que es consecuencia de la polución que existe en el ambiente y afecta directamente su funcionamiento. La figura N° 5.12, muestra la limpieza de los módulos fotovoltaicos.



Figura N° 5.12: Limpieza de módulos solares.

Fuente: Elaboración propia.

Para la canalización del cable de manera subterránea, se debe realizar una zanja de una profundidad de 0,5m, la profundidad mínima según norma es de 0,45m, para que la tubería galvanizada no quede expuesta a las personas que transiten en el lugar. La excavación debe comenzar en el edificio en donde se encuentran ubicados los módulos solares y debe culminar en la bodega que se tiene previsto ser el almacén de baterías, controladores de carga e inversores. Se deberá dejar señalizado correctamente el área donde se instaló la canalización, identificando los peligros y riesgos presentes.

Antes de realizar la instalación de las canalizaciones se deberá realizar un estudio de las condiciones de terreno, ya que en función de estas se seleccionará el tipo de canalización y sus características de construcción, estas deberán cumplir la norma IEC 61386-24 y las características de la tabla N° 5.5.

Tabla N° 5.6: Características mínimas para canalizaciones subterráneas.

Característica	Código	Grado
Resistencia a la compresión	750	750 N
Resistencia al impacto	NA	Normal
Temperatura mínima de instalación y servicio	NA	NA
Temperatura máxima de instalación y servicio	NA	NA
Resistencia al curvado	1-2-3-4	Cualquiera de las especificadas
Propiedades eléctricas	(1)/(2)	Continuidad eléctrica / aislante
Resistencia a la penetración de objetos sólidos	5	Protegida contra el polvo
Resistencia a la penetración de agua	4	Protegida contra salpicaduras de agua.
Resistencia a la corrosión de tubos metálicos y compuestos	2*	Protección interior y exterior media (**)
Resistencia a la tracción	0	No declarada
Resistencia a la propagación de la llama	1**	No propagador (***)
Resistencia a las cargas suspendidas	0	No declarada

Notas:
 NA: No aplicable
 (*) Solo aplica a canalizaciones metálicas. Para canalizaciones no metálicas debe ser un dígito 0. En instalaciones en el exterior en ambientes húmedos o mojados con presencia de agentes químicos activos o en zonas costeras en código será 4 con Alta protección interior y exterior.
 (***) Para ductos que están exclusivamente enterrados en todo su recorrido y que no ingresan a ningún recinto cerrado podrá omitirse este requisito.

Fuente: Elaboración propia.

Este trabajo debe ser coordinado junto a personal de la Universidad que tenga previa autorización para intervenir en el terreno del establecimiento, ya que la zanja se debe realizar en un sector de descanso de estudiantes y no puede interferir con los trabajos diarios de la universidad. Una vez terminada la excavación se debe dejar señalizado el riesgo presente para evitar posibles accidentes, de estudiantes o personal universitario. Ver la figura N° 5.13.

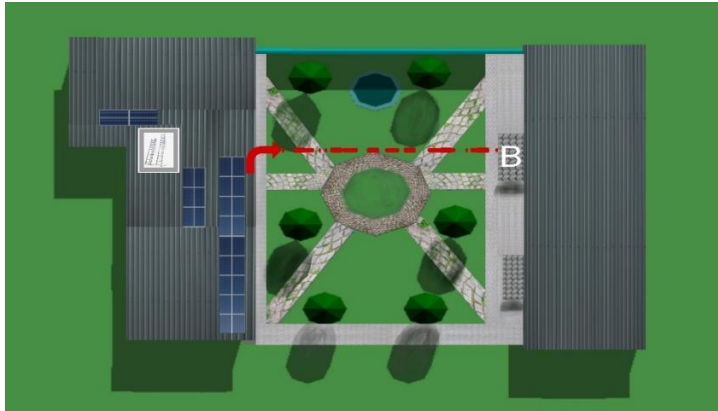


Figura N° 5.13: Esquema de segmentación sobre lugar donde se debe hacer la zanja
Fuente: Elaboración propia.

La bodega en donde se tiene visualizado almacenar las baterías, controladores e inversores, requiere de implementación, limpieza en su interior, mantención en su estructura, relleno de orificios en las murallas y mejoramiento de condiciones en la techumbre para impedir ingreso de humedad y el paso de agua en caso de lluvias. Además, para que sea posible dejar todos los elementos en dicha bodega, se debe implementar una mesa de trabajo, que cumpla como soporte, para dejar baterías en la superficie y en su parte inferior, con esto se logra un mayor orden que facilitara la conexión y futuras mantenciones del lugar. La figura N° 5.14, muestra la bodega en su interior, en su estado actual.



Figura N° 5.14: Bodega de almacenamiento con necesidad de mejoras
Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.4 Dimensionamiento e instalación de equipos.

El arreglo fotovoltaico no requiere de la instalación de un medidor Bidireccional, esto ya que acorde al Pliego técnico RIC N° 9, “Todo sistema de autogeneración con una potencia instalada superior a 30 kW deberá contar con un equipo de monitoreo de generación, que sea capaz de registrar exclusivamente la generación, el cual deberá quedar montado en el tablero de distribución del equipamiento de autogeneración y claramente rotulado”.

Con esto se entiende que un sistema con menor capacidad de potencia no requiere medidor, además, este arreglo fotovoltaico es requerido solamente para la energización de un equipo de electrolisis alcalina, el cual genera hidrógeno verde con una pureza del 99%, esto gracias a fuentes renovables, al tener inyección de la red eléctrica dejaría de tener ese grado de pureza y pasaría a ser hidrogeno amarillo.

Se deben revisar los equipos y leer los manuales técnicos, para así considerar las directrices del fabricante.

Las figuras N° 5.15 y N° 5.16, muestran las dimensiones de los gabinetes para los inversores con los que cuenta la Universidad, que posteriormente deben ser utilizados en la instalación.

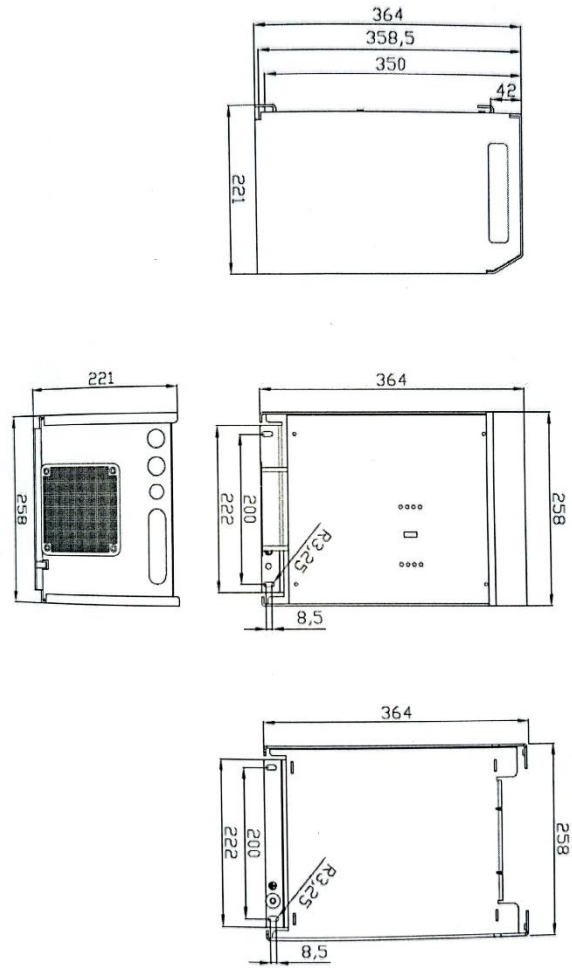


Figura N° 5.15: Dimensiones de gabinete para inversor de 3000 VA.

Fuente: Elaboración propia.

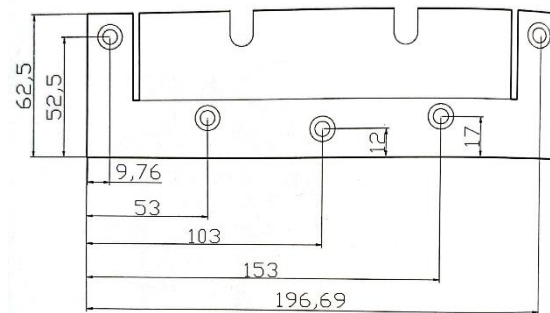


Figura N° 5.16: Dimensiones de soporte para gabinete.

Fuente: Elaboración propia.

También se dispone de las especificaciones técnicas del inversor, correspondientes al manual, las cuales se detallan en la figura N° 5.17 y se añaden funciones del equipo.

Inversor Phoenix	12/3000	24/3000	48/3000
INVERSOR			
Rango de tensión de entrada (VCC)	9,5 – 17	19 – 33	38 – 66
Salida (1)	Tensión de salida: 230 VCA ± 2% Frecuencia: 50 Hz ± 0,1%		
Potencia cont. de salida a 25°C (VA) (3)	3000	3000	3000
Potencia cont. de salida a 25°C (W)	2400	2400	2400
Potencia cont. de salida a 40°C (W)	2200	2200	2200
Potencia cont. de salida a 65°C (W)	1700	1700	1700
Pico de potencia (W)	6000	6000	6000
Eficacia máxima (%)	92	94	95
Consumo en vacío (W)	20	20	25
GENERAL			
Relé programable (4)	Sí	Sí	Sí
Protección (2)	a - g		
Características comunes	Temp. de trabajo: -40 a +65°C (refrigerado por ventilador) Humedad (sin condensación): máx. 95%		
CARCASA			
Características comunes	Material y color: aluminio (azul RAL 5012) Protección: IP 21		
Conexión de la batería	Cuatro pernos M8 (2 conexiones positivas y 2 negativas)		
Conexión 230 V CA	Bornes de tornillo de 13 mm2 (6 AWG)		
Peso (kg)	18		
Dimensiones (al x an x p en mm.)	362x258x218		
ESTÁNDARES			
Seguridad	EN 60335-1, EN 60335-2-29		
Emisiones/Normativas	EN 55014-1, EN 61000-3-2 / EN 55014-2, EN 61000-3-3		
Directiva de automoción	2004/104/EC		

Figura N° 5.17: Especificaciones técnicas del inversor según manual.

Fuente: Elaboración propia.

El equipo inversor cuenta con las siguientes características:

- ✚ Cuenta con protección de corto circuito de salida; sobrecarga; tensión de la batería demasiado baja; tensión de la batería demasiado alta; temperatura demasiado alta; 230V CA en la salida del inversor; ondulación de la tensión de entrada demasiado alta. Carga no lineal.
- ✚ Relé multifunción que puede configurarse como alarma general, subtensión CC o señal de arranque de generador.
- ✚ El inversor Phoenix no necesita un mantenimiento específico. Bastara con comprobar todas las conexiones una vez al año. Evitar la humedad y grasa, el hollín y el vapor, mantener limpio el equipo.

Continuando la instalación de los equipos, el regulador entrega en su manual las dimensiones correspondientes al dispositivo, las figuras N° 5.18 y N° 5.19, detallan las medidas específicas.

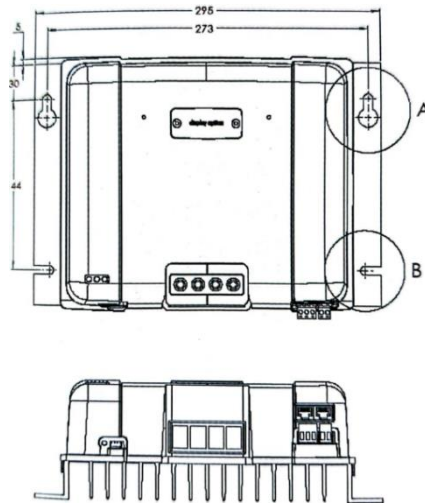


Figura N° 5.18: Dimensiones del controlador de carga.

Fuente: Elaboración propia.

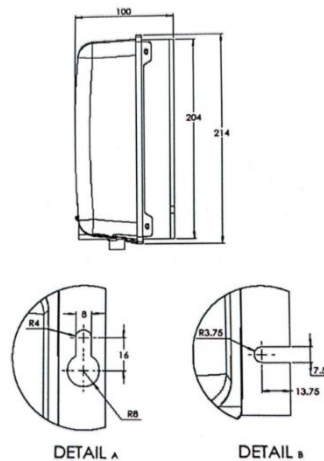


Figura N° 5.19: Medidas del controlador de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Como datos complementarios se encuentran las especificaciones técnicas del equipo, la figura N° 5.20 entrega cualquier información de lo que se necesite consultar para satisfacer las dudas sobre el controlador de carga.

Controlador de carga SmartSolar	MPPT 250/70	MPPT 250/85	MPPT 250/100
	Selección automática 12/24/48V (36V manual)		
Tensión de la batería			
Corriente máxima de la batería	70A	85 A	100 A
Potencia FV nominal, 12V 1a,b)	1000 W	1200 W	1450 W
Potencia FV nominal, 24V 1a,b)	2000 W	2400 W	2900 W
Potencia FV nominal, 36V 1a,b)	3000 W	3600 W	4350 W
Potencia FV nominal, 48V 1a,b)	4000 W	4900 W	5800 W
Máx.corriente de corto circuito de FV 2)	35A (máx. 30A x conector MC4)	70A (max 30A x MC4 con.)	
Tensión máxima del circuito abierto FV	250V máximo absoluto en las condiciones más frías 245V en arranque y funcionando al máximo		
Eficiencia máxima	99%		
Autoconsumo	Inferior a 35mA a 12V / 20mA a 48V		
Tensión de carga de "absorción"	Valores pred.: 14,4V / 28,8V / 43,2V / 57,6V (regulable)		
Tensión de carga de "flotación"	Valores pred.: 13,8V / 27,6V / 41,4V / 55,2V (regulable)		
Tensión de carga de "equalización"	Valores pred.: 16,2V / 32,4V / 48,6V / 64,8V (regulable)		
Algoritmo de carga	Variable multietapas (ocho algoritmos preprogramados) o algoritmo definido por el usuario		
Compensación de temperatura	-16mV/°C / -32mV/°C / -64mV/°C		
Protección	Polaridad inversa/Cortocircuito de salida/Sobretensión		
Temperatura de trabajo	De -30 a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C)		
Humedad	95% sin condensación		
Altura máxima de trabajo	5.000 m (potencia nominal completa hasta los 2.000 m)		
Condiciones ambientales	Para interiores, no acondicionados		
Grado de contaminación	PD3		
Puerto de comunicación de datos	VE.Can, VE.Direct o Bluetooth		
Interruptor on/off remoto	Sí (conector bifásico)		
lé (programable)	DPST Capacidad nominal CA: 240 VCA / 4*		
Funcionamiento en paralelo	Capacidad nominal CC: 4 A hasta 35 V CC, 1 A hasta 60 V CC Sí (no sincronizado)		
CARCASA			
Color	Azul (RAL 5012)		
Terminales FV 3)	35mm ² / AWG2 (modelos Tr), Dos pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/70)		
Bornes de la batería	Tres pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/85 y 250/100)		
Grado de protección	35mm ² / AWG2 IP43 (componentes electrónicos) IP 22 (área de conexiones)		
Peso	3 kg	4,5 kg	
Dimensiones (al x an x p) mm	Modelos Tr: 185 x 250 x 95 Modelos MC4: 215x250x95	Modelos Tr: 216 x 295 x 103 Modelos MC4: 246x295x103	

Figura N° 5.20: Especificaciones técnicas del controlador de carga en el manual.

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, se debe ubicar los equipos mencionados previamente, en la bodega destinada para ellos, de tal manera que su conexión o manipulación sea cómoda, de fácil acceso, y no interfiera el trayecto de otras conexiones entre sí.

Los equipos que se instalarán serán tres controladores, tres inversores y las baterías correspondientes a cada string.

Se realizarán dos tableros con las protecciones eléctricas, uno para el lado de corriente continua (CC) y otro para el lado de corriente alterna (CA). De esta manera debemos ubicar los equipos para que todo quede ordenado.

Las tuberías galvanizadas se deberán ubicar de tal manera que su estado físico no se vea afectado por el tránsito de personas en el sector, de esta manera se instalarán sobrepuestas en los muros cercanos a la bodega y el muro debajo de los módulos fotovoltaicos, las uniones y curvas se deberán hacer para que todo quede bien sujeto y acoplado correctamente.

5.5.1.5 Conexión de equipos

Se debe seguir la guía de los manuales para realizar la conexión entre los equipos. Los string estarán separados, por lo que serán tres conexiones iguales que contarán con un controlador y un inversor para cada string.

Los cables provenientes de los paneles bajarán por tuberías galvanizadas con destino a la bodega donde estarán los equipos, la primera conexión se hará hacia el controlador de carga, cable positivo y negativo correspondiente a cada string.

La siguiente conexión será desde el controlador de carga hacia las baterías con la finalidad de priorizar la carga de estas, se deben usar los terminales y herramientas específicas para esta tarea.

Siguiendo con la conexión, se tiene la salida de las baterías hacia el inversor con un cable positivo y uno negativo, con la finalidad de hacer la transformación de CC a CA, en este punto se deberá realizar una configuración en los equipos inversores para obtener corriente trifásica de salida.

La figura N° 5.21 nos muestra el diagrama de bloque correspondiente al inversor.

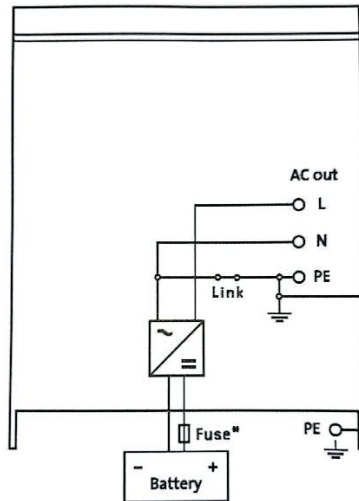


Figura N° 5.21: Diagrama de bloques inversor.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura N° 5.22, se podrá apreciar el esquema de conexión trifásico que entrega el fabricante para obtener la CA deseada hacia el equipo electrolizador, esta metodología de conexión será necesaria para la puesta en marcha.

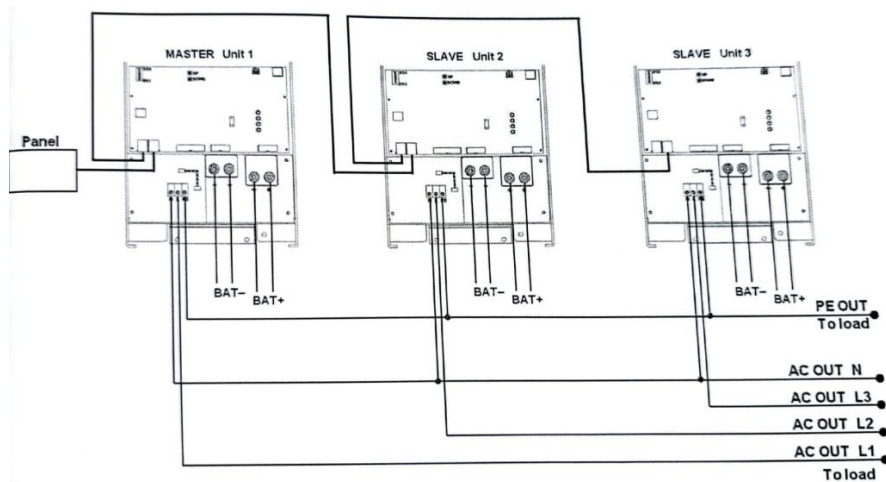


Figura N° 5.22: Diagrama de conexión trifásico para inversor 3000 VA.

Fuente: Elaboración propia.

Los equipos Victron Connect del proyecto son de protocolo VE Bus, que consta de una conexión entre los equipos, en serie, con un cable RJ45 UTP, el cual debe ser de buena calidad para evitar problemas de comunicación. Esta conexión entre los dispositivos se denomina sistema. El sistema se debe conectar a una aplicación llamada VE Bus System Configurator, en la cual se pueden conectar más de tres dispositivos y permite la configuración en paralelo, trifásico y bifásico. Para sincronizar los equipos Victron Energy se utilizará la aplicación VE Bus System Configurator, en la cual se pueden modificar parámetros eléctricos de los equipos a través de un dispositivo Interfaz MK3 USB, permitiendo además la sincronización de señales sinusoidales entre los inversores, transformando así las tres redes monofásicas de los inversores a una red trifásica. La configuración realizada tras la modificación de parámetros eléctricos por parte de la aplicación queda almacenada dentro de los equipos Victron, los cuales tienen memoria no volátil, que significa que todas las configuraciones que se realicen no se eliminarán incluso cuando no existan conexiones con una fuente de energía.

A continuación, se detalla el procedimiento para la conversión de los sistemas monofásicos a trifásicos:

1. Actualización de firmware. Se debe actualizar el firmware de todos los equipos Victron Energy antes de la primera instalación, luego la actualización será de forma automática, solo se deberá quitar la opción de actualización automática, en caso de existir una falla en el equipo que no pueda reparar el sistema y requiera de soporte técnico.
2. Configuración en Trifásico. Se realiza el conexionado del cable de comunicación y el cable MK3 entre los dispositivos para permitir la interacción y configuración a través de la aplicación VE Bus System Configurator. Todos estos equipos que se conecten deben ser del mismo modelo, deben tener la misma antigüedad y deben contar con el mismo firmware actualizado.

3. Configuración de equipos VE Bus. A través de VE Bus System Configurator se configuran los parámetros eléctricos de los equipos a utilizar y se sincronizan las señales sinusoidales entregadas por los inversores. Los equipos traen relés internos los cuales actúan y modifican según parámetros de la aplicación.
4. Añadir asistente. Se añade un dispositivo sensor o que cumpla con una función determinada, puede ser un sensor de AC, DC, V entre otros asistentes.
5. Ajustar el dispositivo GX. El dispositivo GX permite el monitoreo de forma inalámbrica a través de red 2g, 3g y 4g, entregando los parámetros eléctricos del arreglo fotovoltaico en tiempo real. Para que este dispositivo tenga valores reales debe estar sincronizado con el arreglo fotovoltaico, por lo que se deben ajustar los parámetros con la aplicación Victron Connect.

La figura N° 5.23 muestra los puntos de conexiones detallados con letras, en la tabla N° 5.6 se describe la función correspondiente a cada letra.

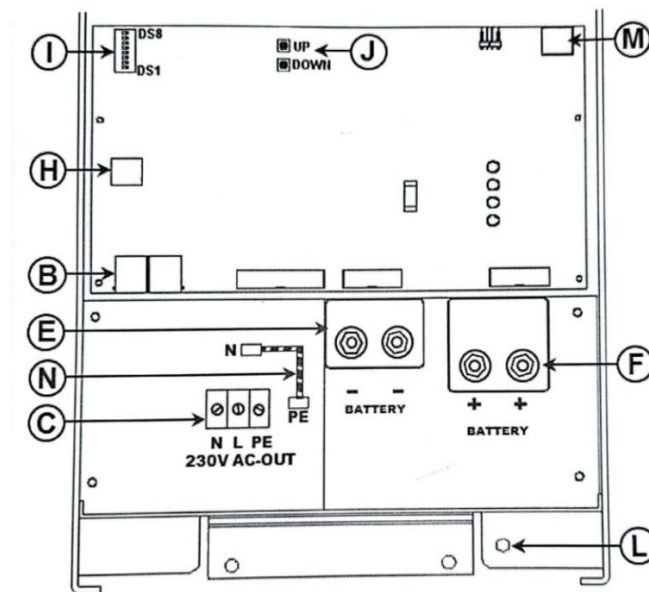


Figura N° 5.23: Resumen conexiones inversor 3000 VA.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 5.7: Detalle de resumen de conexiones.

B	V.E. Bus con 2 conectores RJ45. Utilizados para la conexión de un panel remoto y/o funcionamiento en paralelo o trifásico.
C	Conexión de carga. 3K Salida CA (izquierda a derecha): N (neutro), L (fase), PE (tierra).
E	Negativo batería.
F	Positivo batería.
H	Conexiones para conmutador remoto: terminal izquierdo corto y terminal medio para encender el Phoenix.
I	Conmutadores DIP DS1 a DS8 para modo configuración.
J	Pulsadores para modo configuración.
L	Conexión a tierra primaria (PE).
M	Contacto de la alarma: (de izquierda a derecha) NC, NO, COM.
N	Retirar para desconectar la salida de la toma de tierra.

Fuente: Elaboración propia.

La figura N° 5.24, muestra los accesorios necesarios para el conexionado del inversor, los cuales no vienen con el equipo, por lo tanto, se deberá conseguir el material para su operación.

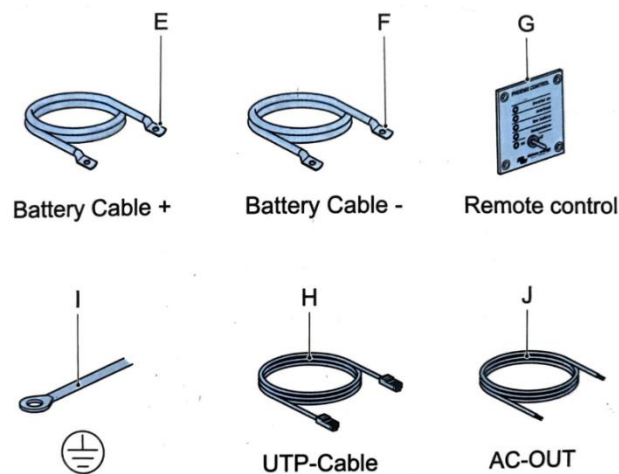


Figura N° 5.24: Accesorios necesarios para conexión de inversor.

Fuente: Elaboración propia.

La ubicación de la batería debe ser lo más cercana al inversor para evitar exceso de conductor y pérdida de tensión, la figura N° 5.25 señala la ubicación recomendada de la batería para que esta no presente problema en instalación.

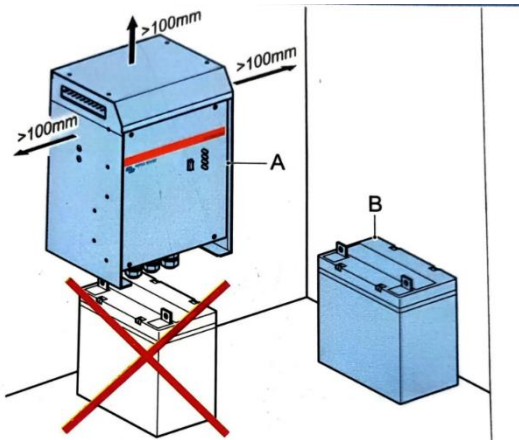


Figura N° 5.25: Ubicación de batería para conexión con inversor.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con la conexión del inversor, observado en la figura N° 5.26 se muestra el anclaje que debe tener el equipo y tapas que se retiran al momento de realizar la conexión, el retiro de estas permitirá observar la interfaz de conectores disponibles. Guiados por la información antes proporcionada se podrá efectuar correctamente las conexiones.

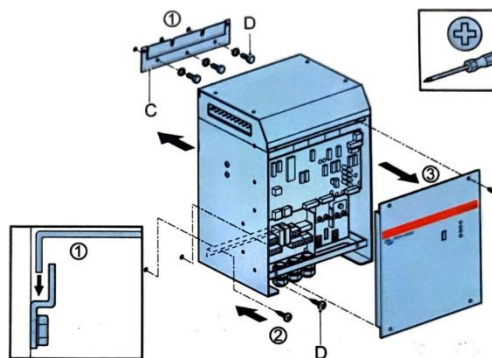


Figura N° 5.26: Anclaje y tapa de seguridad del inversor.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez retirada la tapa y ubicada la batería, se procede a realizar la conexión de los cables positivo y negativo, el inversor cuenta con dos terminales de conexión para positivos y negativos provenientes de la batería, en este caso solo se usará uno, como muestra la figura N° 5.27, los cables se fijarán a los terminales de la batería con pernos, golillas y tuercas correspondientes al diámetro del terminal, de la misma manera en los terminales del inversor. Se debe utilizar una llave de tubo aislada para no cortocircuitar la batería, también evitar que los cables de la batería entren en contacto.

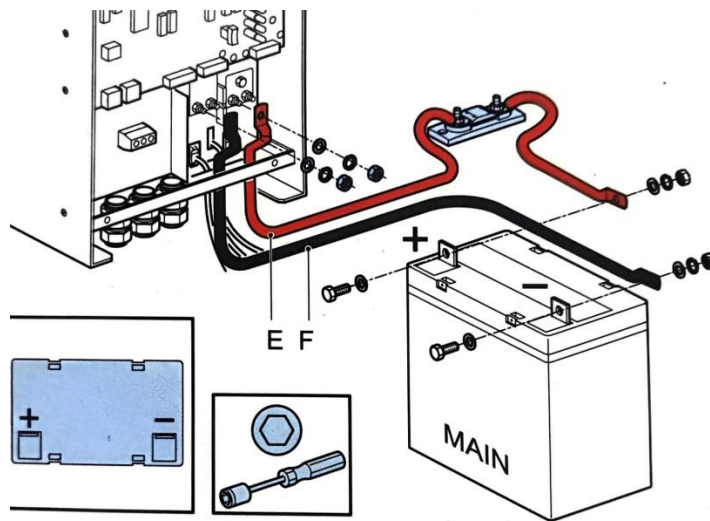


Figura N° 5.27: Conexión positiva y negativa de batería hacia inversor.

Fuente: Elaboración propia.

Realizada la conexión de las baterías se procede a ubicar el control remoto (G) y conectarlo con el inversor mediante un cable UTP (H), la figura N° 5.28 indica donde debe ir conectado el cable en el inversor y el control remoto.

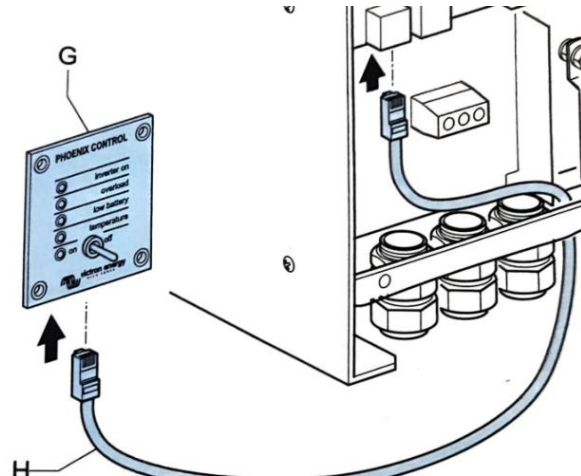


Figura N°5.28: Conexión mediante cable UTP.

Fuente: Elaboración propia.

La conexión hacia tierra de este equipo es fundamental para evitar fallas mayores, por lo tanto, es el siguiente paso, en la figura N° 5.29 detalla la ubicación donde se debe conectar como también sus respectivas golillas y tuercas, es necesario que el cable a tierra sea de un diámetro apto para aguantar las descargas oportunamente. El cable neutro del inversor se debe conectar a la carcasa, para esto se puede utilizar un cable de tres hilos de núcleo flexible y una sección de 2,5 o 4 mm².

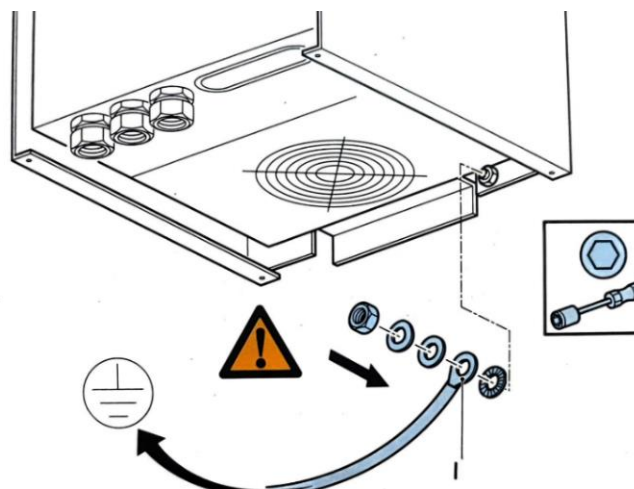


Figura N° 5.29: Conexión a tierra del inversor.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el inversor haga la conversión de energía, los terminales de salida entregaran corriente alterna, aquí se debe conectar los cables que alimentaran la carga, el electrolizador alcalino utiliza corriente trifásica por lo que con un inversor aportaremos una fase respectivamente. La figura N° 5.30 indica los terminales de conexión ubicados en el inversor, que corresponden al neutro, fase y tierra en CA.

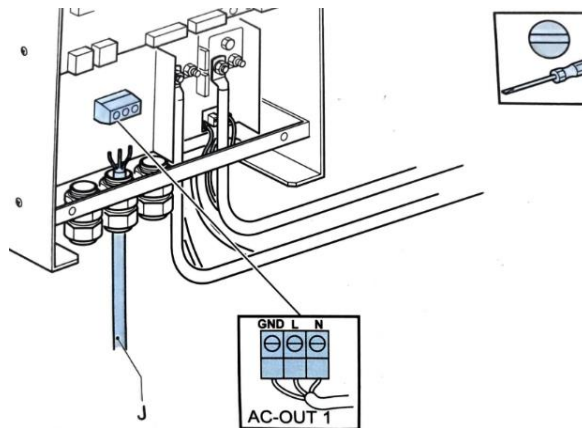


Figura N° 5.30: Salida de corriente alterna del inversor.

Fuente: Elaboración propia.

Ya realizada las conexiones solo queda volver a ubicar la tapa en su lugar para asegurar la protección e intervención de terceros, la figura N° 5.31 muestra la cubierta.

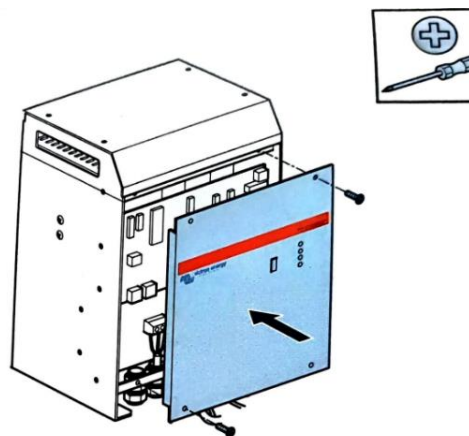


Figura N° 5.31: Cierre cubierta de seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la conexión del controlador, se deben seguir los siguientes pasos:

- ✚ Conectar la batería.
- ✚ Si es necesario, conectar el On/Off remoto y el relé programable.
- ✚ Conectar el panel solar (si se conecta con polaridad inversa, el controlador se calentará, pero no cargará la batería).

La figura N° 5.32, muestra la aplicación de estos pasos en un esquema de conexión sencillo.

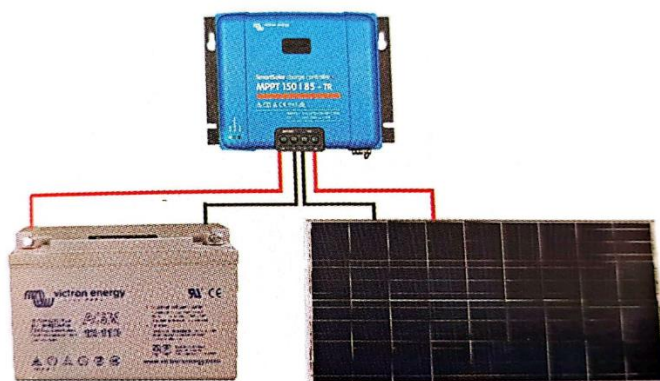


Figura N° 5.32: Esquema de conexión para controlador de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se debe hacer la conexión de manera trifásica desde el inversor hasta el tomacorriente, que está ubicado dentro del laboratorio cercano al equipo electrolizador alcalino, esta conexión se hará mediante tuberías galvanizadas por el exterior y bandeja DLP para el interior.

Volviendo a la bodega se instalarán las protecciones de CC, en la parte posterior del sistema de generación, y CA a la entrada y salida de los conductores como se mencionó anteriormente, acompañado de su tablero respectivo.

5.5.1.6 Medición de seguridad y puesta en marcha.

En este paso se realizará la revisión general de la instalación antes de su funcionamiento, se reapretarán conexiones, se revisará estado de conductores, se señalarán los riesgos asociados a la manipulación de los equipos y se medirá parámetros básicos.

Para el inversor, el fabricante nos entrega una pauta con indicadores de error el cual ayudará a identificar el problema, entregará la causa y solución, la tabla N° 5.7 detalla las directrices pertinentes en caso de un problema.

Tabla N° 5.8: Indicaciones generales de error inversor.

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCION
El inversor no se ha puesto en marcha al encenderlo.	La tensión de la batería es muy alta o baja. No hay tensión en la conexión CC.	Compruebe que la tensión de la batería está en el rango correcto.
El LED de “batería baja” parpadea.	Baja tensión de la batería.	Cargue la batería o compruebe las conexiones de esta.
El LED de “batería baja” se enciende.	El convertidor se apaga porque la tensión de la batería es muy baja.	Cargue la batería o compruebe las conexiones de esta.
El LED de “sobrecarga” parpadea.	La carga del convertidor supera la carga nominal.	Reducir la carga.
El LED de “sobrecarga” se enciende.	El convertidor se apaga por exceso de carga.	Reducir la carga.
El LED “temperatura” parpadea o se enciende.	La temperatura ambiente es muy alta o la carga es excesiva.	Instale el convertidor en un ambiente fresco y bien ventilado o reduzca la carga.

Los LED de “batería baja” y “sobrecarga” parpadean alternativamente.	Baja tensión de batería y carga excesiva.	Cargue las baterías, desconecte o reduzca la carga o instale baterías de alta capacidad. Instale cables de batería más cortos o gruesos.
Los LED de “batería baja” y “sobrecarga” parpadean simultáneamente.	La tensión de ondulación en la conexión CC supera 1,5 Vrms.	Compruebe los cables de la batería y conexiones. Compruebe si la capacidad de la batería es bastante alta y aumente si es necesario.
Los LED de “batería baja” y “sobrecarga” se encienden.	El inversor se para debido a un exceso de tensión de ondulación en la entrada.	Instale baterías de mayor capacidad. Coloque cables de baterías más cortos o gruesos y reinicie el inversor.
Un LED de alarma se enciende y el segundo parpadea.	El inversor se para debido a la activación de la alarma por el LED que se enciende. El LED que parpadea indica que el inversor se va a apagar debido a esa alarma.	Compruebe en la tabla las medidas adecuadas relativas a este estado de alarma.

Fuente: Elaboración propia.

Para el controlador, el fabricante entrega una tabla con los problemas que se puedan presentar en el transcurso de operación o antes, la tabla N° 5.8 detalla los problemas, causas y soluciones a corregir en estos aspectos.

Tabla N° 5.9: Indicaciones generales de error controlador.

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCION
El cargador no funciona	Conexión inversa de las placas FV.	Conecte las placas FV correctamente.
	Conexión inversa de la batería.	Fusible no reemplazable fundido. Devolver a VE para su reparación.
La batería no está completamente cargada.	Conexión defectuosa de la batería.	Compruebe las conexiones de la batería.
	Las pérdidas por cable son demasiado altas.	Utilice cables de mayor sección.
	Diferencia considerable entre la temperatura ambiente del cargador y la de la batería.	Asegúrese de que las condiciones ambientales del cargador y la batería son iguales.
	Tensión del sistema seleccionada incorrectamente por el controlador de carga.	Configure el controlador manualmente con la tensión de sistema requerida.
Se está sobrecargando la batería.	Una celda de la batería esta defectuosa.	Sustituya la batería.
	Diferencia considerable entre la temperatura ambiente del cargador y la de la batería.	Asegúrese de que las condiciones ambientales del cargador y la batería son iguales.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez revisada las conexiones de los equipos, la puesta en marcha se debe realizar con EPP's adecuados para cada acción, esto para resguardar la integridad de la persona que efectúa la actividad descrita en la presente propuesta, se deberá tomar todos los resguardos que se encuentren pertinentes para la puesta en marcha sin quitar merito a los mínimos detalles, las recomendaciones se entregan a continuación:

- ✚ Revisar nuevamente el conexionado del sistema completo.
- ✚ Despejar el área donde se instalaron los equipos.
- ✚ Utilizar EPP's básicos para la interacción con elementos de maniobra.
- ✚ Preparar procedimientos en caso de falla.
- ✚ Contar con los permisos pertinentes por parte de la institución académica.

Con las recomendaciones anteriores en orden se puede proceder a la puesta en marcha del sistema fotovoltaico para energizar el equipo electrolizador alcalino. Una vez hecha la maniobra de puesta en marcha, se deberá prestar atención a cualquier sonido, olor o señal que indique algún mal funcionamiento.

Se podrá poner en marcha el electrolizador con las condiciones de operación optimas, una vez encendido el equipo la puesta en marcha estará finalizada. Luego se procede con el análisis del funcionamiento del equipo y medición de parámetros según se requieran.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS ESPERADOS DE LA PROPUESTA

Tras la finalización del documento que contempla la propuesta presente, se da información relevante para poder llevar a cabo de manera física la conexión del sistema de energía solar, instalando los equipos requeridos y mejorando a través de modificaciones las áreas definidas, con el fin de que se pueda concretar la alimentación eléctrica al equipo electrolizador alcalino ubicado en el laboratorio de Nanotecnología, Energía y Sistemas complejos de la Universidad de Atacama.

Al contar con información precisa de los materiales necesarios para llevar a cabo el montaje de equipos y la instalación eléctrica de los mismos, se debe realizar la compra de los materiales faltantes para llevar a cabo el proyecto, siempre adquiriendo equipos de calidad que sean vendidos en lugares establecidos y que cuenten con certificación correspondiente para evitar incidentes o accidentes.

Para poder realizar una correcta y segura instalación eléctrica fotovoltaica se debe regir por normas de la SEC (Superintendencia de Electricidad y Combustible) que es el organismo fiscalizador del área en Chile, que tiene como misión fiscalizar la correcta operación de los servicios y productos de electricidad, gas y combustible, vigilando la calidad, la seguridad y precios de los servicios mencionados.

Con el fin de realizar el proyecto sin inconvenientes de seguridad, se deben regir parámetros de seguridad establecidos por la SEC, basándose directamente en la instrucción técnica general “RIC N°9.1/2021: Diseño y ejecución de las instalaciones fotovoltaicas aisladas de las redes de distribución”. Este pliego técnico normativo RIC, acota las exigencias de diseño, inspección, ejecución, y mantención de instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red eléctrica de distribución con el fin de salvaguardar la seguridad de las personas que las operan o utilizan este recurso.

Dentro de las normas del pliego técnico normativo RIC N°9.1/2021, basándose en las características de la instalación se pueden establecer los parámetros necesarios para que este todo dentro de normativa. Por lo anterior mencionado, las condiciones mínimas que se deben regir por las características y necesidades de la instalación según RIC N°9.1/2021 son:

- ✚ Toda instalación eléctrica de un sistema fotovoltaico aislado de la red de distribución deberá ser proyectada y ejecutada en estricto cumplimiento con las disposiciones de esta Instrucción Técnica y normativas vigentes.
- ✚ La instalación no debe presentar riesgos para operadores o usuarios, sea eficiente y proporcione un buen servicio,
- ✚ Debe permitir un fácil y adecuado mantenimiento, además se requiere que cuente con la flexibilidad necesaria como para permitir modificaciones.
- ✚ Los equipos, elementos y accesorios eléctricos utilizados en la unidad de generación fotovoltaica deben ser diseñados para soportar la tensión máxima generada por ella.
- ✚ La instalación de los equipos debe facilitar la operación y mantenimiento seguro, siguiendo las especificaciones del fabricante para no afectar de forma adversa al sistema fotovoltaico.
- ✚ Para facilitar el mantenimiento y reparación de la unidad de generación fotovoltaica, se instalarán los elementos de control y protección (fusibles, interruptores, etc.) para la desconexión de los equipos como inversores, baterías, controladores de carga y similares.
- ✚ Los conductores o cables de la unidad de generación fotovoltaica, módulos fotovoltaicos, strings, arreglos e inversor deberán ser seleccionados e instalados de forma que se reduzca al máximo el riesgo de falla a tierra o de cortocircuito.
- ✚ Todas las conexiones en CC deberán mantener la seguridad, el nivel de aislamiento y la impermeabilidad del sistema.
- ✚ Los conectores deberán cumplir con las normas IEC 62852 e IEC 60998-1.

Cabe recalcar que las condiciones mencionadas anteriormente, son las condiciones mínimas generalizadas con las que debe cumplir el sistema fotovoltaico, por lo que se espera que, al momento de realizar la instalación física y conexión de equipos, el instalador eléctrico lleve a cabo el proyecto rigiéndose por las normas mencionadas en el pliego técnico normativo “RIC N°9.1/2021: Diseño y ejecución de las instalaciones fotovoltaicas aisladas de las redes de distribución”, que además de entregar directrices para que el proyecto sea seguro, facilitara el proceso de instalación y conexionado de equipos.

Tras la realización de la propuesta de forma física dentro del establecimiento, se podrá contar con nuevos recursos de estudio para estudiantes y personal perteneciente a la universidad, lo que favorece al aprendizaje. Con esto se espera la llegada de proyectos que puedan aprovechar el recurso de energía solar e hidrógeno verde, implementando nuevas tecnologías con un fin de docencia e investigación. Por ejemplo, una de las tecnologías que se deberían implementar dentro de la universidad, es la electromovilidad, la cual podría aprovechar excedente del recurso energético producido por el sistema solar fotovoltaico para la instalación de un sistema de carga para vehículos eléctricos, además el hidrógeno verde podría implementarse a través de celdas de combustible para la electromovilidad lo que generaría una oportunidad de innovación y avance tecnológico dentro de la universidad.



Figura N° 6.1: Sistema de carga de electromovilidad

Fuente: Generadoras de Chile 2023.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Todos los días son una oportunidad para mejorar y buscar nuevas formas de ayudar a reducir emisiones de CO₂, potenciar la electromovilidad y mejorar los procesos industriales.

En esta propuesta, la descripción del sistema fotovoltaico y sus componentes fue un punto inicial para corroborar datos y disponibilidad de equipos, se realizaron gestiones para obtener la información detallada para la implementación general de este sistema, concluyendo que la instalación actual necesita ser regularizada en base a las normativas vigentes, dentro del proyecto la modificación de esto se tiene contemplada, por lo tanto la utilización de este sistema y sus componentes cumple con las características mínimas de operación, por lo que una vez realizado todas las modificaciones necesarias no debe presentar inconvenientes a la hora de la puesta en marcha del sistema propuesto.

El equipo electrolizador alcalino, que es el encargado de producir hidrógeno, al momento de su revisión, se encontró en excelente estado y se corroboró que posee las características necesarias para, una vez realizada su conexión con el sistema fotovoltaico, pueda producir hidrógeno verde en base a energía solar. Esto cumple con uno de los aspectos generales que se tiene presentes en este proyecto, que es buscar proporcionar estudios en nuevas fuentes de energía. Describir cómo funciona el equipo electrolizador y la posibilidad de su alimentación mediante ERNC, fue posible gracias a la investigación y estudio del área que se propuso estudiar sobre que, un sistema fotovoltaico le proporcione energía a este, para producir hidrógeno verde. También, se pudo conocer, una vez más que las aplicaciones renovables se pueden integrar a muchas ramas de la matriz energética.

Teniendo clara la descripción del paso a paso para la puesta en marcha, la posterior conexión entre sistemas será posible y no deberá presentar inconvenientes si se cumplen las normativas presentes.

Es aquí donde se puede mencionar que la propuesta es factible en todo momento y su inversión contraerá muchos beneficios para la Universidad de Atacama, pues la gran mayoría de los recursos están disponibles.

Al analizar los resultados de la propuesta, se ratifican las buenas gestiones y cumplimiento de objetivos planteados, se comprueba con más énfasis el hecho de que el proyecto es relevante en términos generales. Una vez realizada la puesta en marcha no hay duda de que funcionara correctamente.

En el desarrollo del proyecto se aprendió que hay muchas formas de producir hidrógeno, entre ellas destaca la electrólisis, siendo esta una de las formas económicamente más viables y en etapa industrial, no produce emisiones de CO₂ por sí misma, por lo que se llega a la conclusión de que este es el método con más aceptación en el mundo, el que puede ser un aporte para la adaptación y mitigación del calentamiento global, causado en parte por la contaminación ambiental. Por esta razón el proyecto toma mayor relevancia e importancia.

Se puede decir con satisfacción que el objetivo general del proyecto se cumplió, ya que se logró dimensionar todos los aspectos para entregar una propuesta de puesta en marcha, de esta forma, se confecciono un paso a paso del conexionado entre los sistemas y se entregó información esencial para llevar a cabo el proyecto en un futuro de forma experimental, es aquí donde se ratifica el logro de entregar detalladamente toda la propuesta de paso a paso para llevar a cabo el proyecto. La conexión de un sistema fotovoltaico de 10 kW con un electrolizador alcalino para gestionar la producción de hidrógeno verde es viable y la posibilidad de realizarse es muy oportuna. En conclusión, los temas económicos y de gestión, no presentan un problema relevante para realizar la puesta en marcha.

Es importante destacar el aporte que se le entrega a la Universidad de Atacama, ya que este proyecto potenciara futuras ideas relacionados con ERNC y matriz energética. Enfocar el proyecto en esta área dio buenos resultados, siendo estos importantes para la visión que se propuso en el proyecto.

El inminente cambio climático, sus consecuencias hoy en día y todos los avances tecnológicos que esto conlleva, lograron ser la base de este proyecto. Solucionar problemas con el paso del tiempo, es la manera de continuar avanzando como civilización, el hidrógeno verde es una carta muy fuerte e importante que surge como alternativa viable para lograr que el pensamiento de las personas y las situaciones actuales terminen con el daño hacia el medioambiente, frenar esta inmensa nube que está presente en la mayoría de los procesos y actividades diarias, es tarea de todos, y mostrando los resultados de optar por el cambio en la transición energética, es la manera correcta de hacerlo, es la solución.

BIBLIOGRAFÍA

- Abella, M. A. (2005). Sistemas fotovoltaicos. *SAPT Publicaciones Técnicas, SL*.
https://www.academia.edu/download/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS.pdf
- Aparicio, M. P. (2020). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YkxOEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=radiacion+solar&ots=r9Ta5CJefj&sig=7lPqLUHiZySi8VeGQjWLgnfsc1Y#v=onepage&q&f=false>
- Benjumea Cervera, M. D. R. (2021). Análisis de instalaciones de generación de hidrógeno mediante energía solar fotovoltaica.
<https://idus.us.es/handle/11441/127089>
- Coma Gómez, D. (2022). *Proyecto de una instalación fotovoltaica para generación de hidrógeno verde* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186625>
- Copetti, J. B., & Macagnan, M. H. (2007, November). Baterías em sistemas solares fotovoltaicos. In *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*.
<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1726>
- Correa, M., Barría, C., & Maluenda, B. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.
<http://54.148.75.48/handle/123456789/3772>
- Huanca Mamani, R. C. (2020). Dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico tipo Off Grid para riego de hortalizas en invernadero en la localidad de Ticnamar.
<https://repositorio.uta.cl/xmlui/handle/20.500.14396/822>
- Jiménez Sáez, F. L. (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>

Koscina Montecinos, L. N. (2022). Hidrógeno verde y baterías de litio como alternativa de almacenamiento energético en plantas fotovoltaicas: Evaluación mediante análisis de ciclo de vida.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/191680>

Molina-García, M., & MELCHOR-HERNÁNDEZ, C. (2016). Prototipo de un sistema fotovoltaico autónomo. *Volumen 3, Número 8–Julio–Septiembre-2016*, 9.

<https://www.academia.edu/download/59457403/9.->

[_Revista Aplicaciones de la Ingeniería V3 N820190530-14397-o2pb3p.pdf#page=21](https://www.academia.edu/download/59457403/9.-_Revista_Aplicaciones_de_la_Ingenieria_V3_N820190530-14397-o2pb3p.pdf#page=21)

Maggio, G., Squadrito, G. y Nicita, A. (2022). Hidrógeno y oxígeno medicinal mediante electrólisis basada en energías renovables: una ruta verde y económicamente viable. *Energía Aplicada*, 306, 117993.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921012964>

Mejía, A. E., Torres, C. A., & Isaza, R. A. H. (2009). Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. *Scientia et Technica*, 15(43), 31-36.

<https://www.redalyc.org/pdf/849/84917310006.pdf>

Orbegozo, C., & Arivilca, R. (2010). Energía solar fotovoltaica. *Manual técnico para instalaciones domiciliarias*.

https://www.academia.edu/download/54732175/libro_de_Energia-Solar-Fotovoltaica-Carlos-Orbegozo-Roberto-Arivilca.pdf

Solar, E. (2007). Energía solar fotovoltaica. *Página consultada en la web el*, 26 [1]

http://www.enginyeria-classea.cat/pdf-formativos/Cuaderno_FOTOVOLTAICA.pdf

Ursua, A., Gandia, L. M., & Sanchis, P. (2011). Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 410-426.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5898382/>

Yepes Rivera, L. M., & Castro Ochoa, S. (2022). Banco de prueba solar fotovoltaico para el desarrollo de competencias académicas en energías renovables.

<https://repository.eia.edu.co/handle/11190/5365>

ANEXO A

DIAGRAMA UNILINEAL

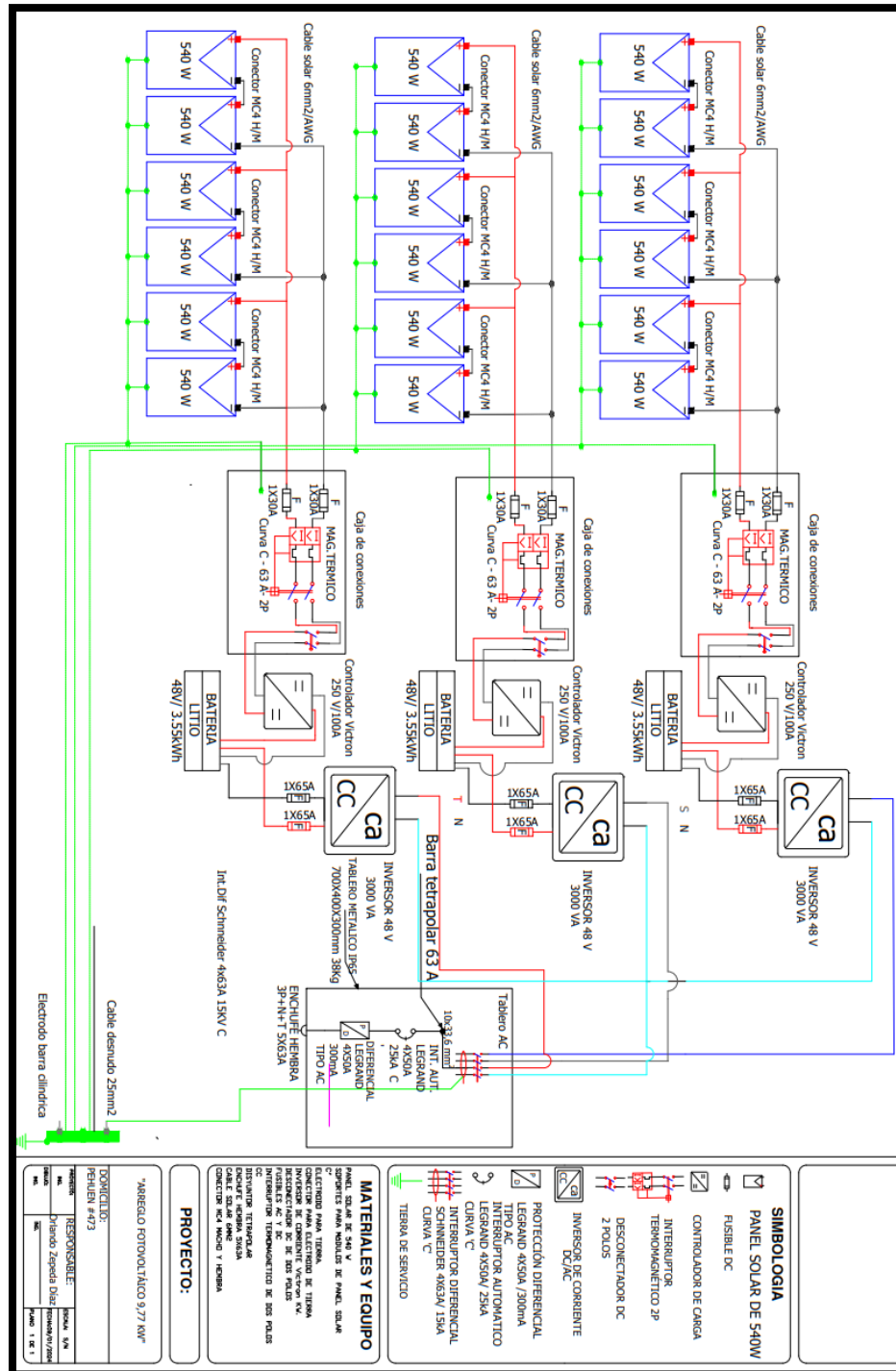


Figura N° A.1: Diagrama unilineal del proyecto.