



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS PARA SERVICIOS MÓVILES

POR

Maximiliano Esteban Caamaño Iturria

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Electrónico(a)

Profesor(es) Guía
Dr. Lautaro David Salazar Silva

Noviembre 2025
Concepción (Chile)

©2025 Maximiliano Esteban Caamaño Iturria

©2025 Maximiliano Esteban Caamaño Iturria

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Sumario

Este trabajo de memoria de título presenta el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico híbrido móvil con almacenamiento energético, orientado a prestaciones de servicio o habitabilidad como casas rodantes. La problemática abordada surge de la dependencia de combustibles fósiles en unidades móviles y la fragilidad del sistema eléctrico nacional ante contingencias.

El objetivo consistió en desarrollar una planta capaz de operar en modo off-grid y on-grid, garantizando autonomía mediante el uso de baterías de litio ferrofosfato (LiFePO_4). La metodología incluyó el análisis del recurso solar en diversas latitudes de Chile a través del estudio de la discretización de matrices que contienen los datos de recursos solar y eólico. En adición a esto, se analizó la complementariedad entre estos recursos, evidenciando que existe una correlación negativa entre ambos, sobre todo en la zona centro-sur del país. Esto implica que, en periodos de baja disponibilidad solar, el recurso eólico es mayor, contribuyendo a la generación energética del sistema.

Además, la metodología incorpora la simulación de escenarios energéticos mediante el software System Advisor Model (SAM) utilizando datos de recurso solar recorriendo la Ruta 5 para evidenciar la robustez del sistema en distintos puntos del país.

Se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real basado en tecnología IoT, utilizando microcontroladores ESP8266 para la adquisición de datos desde controladores MPPT, centralizados en una plataforma Home Assistant. Los resultados de las simulaciones demuestran que el uso de tecnologías de litio reduce el costo nivelado de energía (LCOE) y peso en comparación con sistemas de plomo-ácido, validando la viabilidad técnica y económica de la propuesta para el territorio nacional.

Summary

This thesis presents the design and implementation of a mobile hybrid photovoltaic system with energy storage, designed for service provision and habitability in applications such as caravans. The addressed problem arises from the dependence on fossil fuels in mobile units and the vulnerability of the national electrical grid during contingencies.

The objective was to develop a power plant capable of operating in both off-grid and on-grid modes, ensuring autonomy using lithium iron phosphate (LiFePO_4) batteries. The methodology included the analysis of the solar resource across various Chilean latitudes, through the study of the discretization of matrices containing solar and wind resource data. In addition, the complementarity between these resources was analyzed, showing a negative correlation between them, particularly in the central-southern region of the country. This implies that during periods of low availability of solar resource, wind resource tends to increase, contributing to the system's energy generation.

Furthermore, the methodology incorporates the simulation of energy scenarios using the System Advisor Model (SAM) software, employing solar resource data along "Ruta 5" to demonstrate the system's robustness across different locations in the country.

A real-time monitoring system based on IoT technology was implemented, utilizing ESP8266 microcontrollers for data acquisition from MPPT controllers, centralized within a Home Assistant platform. Simulation results demonstrate that the use of lithium technologies reduces the levelized cost of energy (LCOE) compared to lead-acid systems, validating the technical and economic feasibility of the proposal for the national territory.

Tabla de contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
Capítulo 2. Definición del problema	2
2.1. Hipótesis	2
2.2. Objetivos	2
2.2.1. Objetivo general.....	2
2.2.2. Objetivos específicos	2
2.3. Alcances y limitaciones	3
2.4. Metodología	3
Capítulo 3. Estado del arte	4
3.1. Fundamentos y límites teóricos de celdas fotovoltaicas	4
3.2. Eficiencia en celdas de silicio y mejoras tecnológicas	5
3.2.1. Tecnología PERC.....	5
3.2.2. Tecnología bifacial.....	6
3.3. Celdas fotovoltaicas de tecnología emergente y comparativas.....	6
3.4. Baterías y almacenamiento de energía.....	8
3.4.1. Tecnología de litio y plomo-ácido	8
3.4.2. Sistema de manejo de baterías	8
3.5. Recurso solar, geometría y factores ambientales	8
3.5.1. Suciedad (soiling) y sombreado.....	9
3.5.2. Base de datos y radiación.....	10
3.6. Diseño y modelación de sistemas fotovoltaicos	10
3.7. Herramientas de simulación.....	12
3.8. Electrónica de potencia y control.....	13

3.9.	Monitoreo en sistemas fotovoltaicos utilizando IoT.....	13
3.10.	Normativa y situación energética en Chile	14
3.10.1.	Pliegos técnicos RIC	14
3.10.2.	Informes nacionales y planificación	15
Capítulo 4.	Marco teórico	16
4.1.	Fundamentos fotovoltaicos	16
4.1.1.	Radiación global, directa y difusa.....	16
4.1.2.	Trayectoria solar diaria y anual.....	16
4.1.3.	Horas solar pico (PSH)	17
4.1.4.	Límite Shockley-Queisser.....	17
4.1.5.	Sombreado, soiling y pérdidas de eficiencia asociadas	18
4.2.	Desarrollo tecnológico y eficiencia de celdas fotovoltaicas	19
4.2.1.	Primera generación	19
4.2.2.	Tecnología PERC.....	19
4.2.3.	Tecnología bifacial.....	20
4.2.4.	Segunda generación	21
4.2.5.	Tercera generación.....	21
4.2.6.	Cuarta generación	22
4.3.	Tipos de sistemas fotovoltaicos y sus componentes	23
4.4.	Convertidores de potencia y seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).....	24
4.5.	Inversores en sistemas fotovoltaicos.....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.	Sistema de almacenamiento energético	24
4.6.1.	Tipos de baterías	25
4.6.2.	Parámetros relevantes	25
4.6.3.	Dimensionamiento del banco de baterías	26
4.7.	Herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos	27

4.8.	Perfiles de carga en aplicaciones móviles.....	27
4.9.	Normativa y regulación en Chile aplicable a sistemas fotovoltaicas híbridos móviles .	29
Capítulo 5. Desarrollo y simulación del sistema		30
5.1.	Cuadro de carga	30
5.2.	Disponibilidad de radiación y recurso solar en puntos de interés.....	31
5.3.	Dimensionamiento del arreglo fotovoltaico.....	33
5.4.	Dimensionamiento del banco de baterías	36
5.5.	Selección del regulador de carga	38
5.6.	Escenarios simulados	38
5.6.1.	Escenario 1	39
5.6.2.	Escenario 2.....	40
5.6.3.	Escenario 3.....	41
5.6.4.	Escenario 4.....	43
Capítulo 6. Desarrollo y validación del sistema fotovoltaico híbrido		45
6.1.1.	Diseño planteado para planta piloto.....	45
6.1.2.	Cuadro interior de la casa rodante	47
6.2.	Sistema de monitoreo y adquisición de datos	48
6.2.1.	Arquitectura del sistema de monitoreo	48
6.2.2.	Variables monitoreadas.....	48
6.2.3.	Adquisición y transmisión de datos	49
6.2.4.	Diseño del circuito electrónico en KiCad	49
6.2.5.	Programación del microcontrolador	51
6.2.6.	Comunicación serial.....	51
6.2.7.	Plataforma de visualización	52
6.2.8.	Sistema y protocolo de comunicación inalámbrico	53
6.2.9.	Diseño de interfaz gráfica	54

6.3. Resultados de generación fotovoltaica.....	55
Capítulo 7. Discusión.....	57
Capítulo 8. Trabajo a futuro.....	¡Error! Marcador no definido.
Referencias	59
ANEXO A. CONFIGURACIÓN DE SISTEMA DE MONITOREO ESP8266 Y HAOS.....	1
8.1. Configuración de la Raspberry Pi 4B con Home Assistant	1
8.2. Configuración ESP8266.....	2
8.2.1. Código de monitoreo ESP8266.....	2
ANEXO B. Parámetros para software SAM.....	1
ANEXO C. Eficiencia de celdas en investigación por NREL	1
ANEXO D. Diagrama unilineal según escenario simulado 3	1
ANEXO E. Hojas de datos	1

Lista de tablas

Tabla 4.1 Eficiencia y vida útil según tecnología fotovoltaica [16].....	22
Tabla 4.2 Máxima eficiencia según tipo de celda	23
Tabla 4.3 Comparación topología sistemas fotovoltaicos.....	23
Tabla 4.4 Perfil de carga para cocina comercial y food trucks	28
Tabla 4.5 Consumo y costos eléctricos para casas rodantes	28
Tabla 5.1 Perfil de carga planta piloto	31
Tabla 5.2 Recurso solar y PSH a lo largo de Chile	32
Tabla 5.3 PSH disponibles en puntos de interés	33
Tabla 5.4 Potencia requerida por arreglo según PSH.....	34
Tabla 5.5 Módulos PV considerados para implementación	34
Tabla 5.6 Cantidad de módulos PV según área disponible, demanda pico, demanda promedio	35
Tabla 5.7 Modelo MPPT a utilizar	38
Tabla 5.8 Escenarios de simulación	39
Tabla 5.9 Resumen desempeño de sistema escenario 1	39
Tabla 5.10 Energía eléctrica generada para escenario 1	40
Tabla 5.11 Resumen desempeño de sistema escenario 2	40
Tabla 5.12 Energía eléctrica generada para escenario 2	41
Tabla 5.13 Resumen desempeño de sistema escenario 3 (off-grid).....	41
Tabla 5.14 Energía eléctrica generada para escenario 3	42
Tabla 5.15 Energía eléctrica generada para escenario 3 (híbrido)	42
Tabla 6.1 Componentes implementados en sistema PV híbrido	47

Lista de figuras

Figura 4.1 Principales tipos de irradiación en una celda fotovoltaica [60]	16
Figura 4.2 Eficiencia teórica máxima según banda energética del semiconductor [5]	18
Figura 4.3 Rendimiento de un sistema PV bajo sombreado parcial, (a) caída de potencia antes de llegar al punto crítico. (b) Arribo a punto crítico descubierto según experimentos en [27]	19
Figura 4.4 Tecnología PERC sobre panel inclinado	20
Figura 4.5 Funcionamiento de un panel solar bifacial	21
Figura 4.6 Diagrama de flujo de algoritmo P&O [68]	24
Figura 4.7 Densidad de energía específica y volumétrica según el tipo de batería [21]	26
Figura 5.1 Casa de arrastre disponible para pruebas	30
Figura 5.2 Perfil superior de casa rodante con paneles JS185D (2S2P)	36
Figura 5.3 Perfil superior de casa rodante con paneles Amerisolar Flexible 520W	36
Figura 5.4 Diseño 3D zona de almacenamiento exterior de casa rodante.....	38
Figura 5.5 (a) Puntos seleccionados de mapa continental de Chile presentados en una grilla de 25 x 25 (b) Mapa de complementariedad temporal promedio diaria total para el coeficiente de correlación solar-eólica en Chile (2016) [32]	44
Figura 6.1 Diagrama con componentes comerciales seleccionados.....	46
Figura 6.2 Interruptores rotulados al interior de la planta.....	47
Figura 6.3 Esquemático de circuito de monitoreo.....	49
Figura 6.4 Distribución de componentes.....	50
Figura 6.5 Modelo 3D del circuito	50
Figura 6.6 Placa de monitoreo con caja de protección impresa	51
Figura 6.7 Conexión ESP D1 Mini a MPPT Victron 100/20.....	52
Figura 6.8 Comparación entre HA OS y HA Container [80].....	53
Figura 6.9 Selección de dispositivo, OS y almacenamiento en Raspberry Imager.....	53
Figura 6.10 Diagrama de conexión para sistema de comunicación	54
Figura 6.11 Interfaz gráfica con variables fundamentales en Home Assistant	55
Figura 6.12 Generación solar módulo JS185D un día de sol	55
Figura 6.13 Voltaje de BESS durante un día	56
Figura 6.14 Comportamiento de tensión del BESS durante dos días.....	56
Figura 0.1 Pantallazo a interfaz con microcontroladores conectados (online).....	7

Figura 0.2 Especificaciones PV JS185D montado según datasheet en software SAM	1
Figura 0.3 Especificaciones panel flexible 520 W en SAM	1

Nomenclatura

a-Si: Silicio amorfo (amorphous Silicon)

AC: Corriente alterna (Alternating Current)

BMS: Sistema de gestión de baterías (Battery Management System)

BESS: Sistema de almacenamiento de energía en baterías (Battery Energy Storage System)

CdS: Sulfuro de cadmio (Cadmium Sulfide)

CdTe: Telururo de cadmio (Cadmium Telluride)

CIGS: Cobre indio galio seleniuro (Copper Indium Gallium Selenide)

DC: Corriente continua (Direct Current)

DoD: Profundidad de descarga (Depth of Discharge)

EFV: Energía fotovoltaica

FP: Factor de pérdidas

GaAs: Arseniuro de galio (Gallium Arsenide)

GHI: Irradiación horizontal global (Global Horizontal Irradiance)

GPIO: Entrada/salida de propósito general (General Purpose Input/Output)

HA: Home Assistant

HAOS: Home Assistant Operating System

IoT: Internet de las cosas (Internet of Things)

LCOE: Costo nivelado de energía (Levelized Cost of Energy)

LFP / LiFePO₄: Litio ferrofosfato (Lithium Iron Phosphate)

LID: Degradación inducida por luz (Light Induced Degradation)

m-Si: Silicio monocristalino (monocrystalline Silicon)

MPP: Punto de máxima potencia (Maximum Power Point)

MPPT: Seguimiento del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracking)

MQTT: Protocolo de mensajería IoT (Message Queuing Telemetry Transport)

m²: Metro cuadrado

NREL: Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE.UU. (National Renewable Energy Laboratory)

OSC: Celda solar orgánica (Organic Solar Cell)

P&O: Perturbar y observar (Perturb and Observe)

p-Si: Silicio policristalino (polycrystalline Silicon)

PCB: Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board)

PELP: Planificación Energética de Largo Plazo

PEN: Política Energética Nacional

PERC: Celda solar de emisor pasivado y contacto trasero (Passivated Emitter and Rear Cell)

PESC: Celda solar de emisor pasivado (Passivated Emitter Solar Cell)

PSC: Celda solar de perovskita (Perovskite Solar Cell)

PSH: Horas solar pico (Peak Sun Hours)

PSO: Optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization)

PV: Fotovoltaico (Photovoltaic)

PVLib: Librería Python para simulación fotovoltaica

PVSyst: Software de simulación de sistemas fotovoltaicos

PWM: Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation)

RIC: Reglamento de Instalaciones de Consumo (Chile)

RS485: Estándar de comunicación serial diferencial

RX: Receptor (pin de recepción de datos)

SAM: System Advisor Model (software NREL)

SEC: Superintendencia de Electricidad y Combustibles (Chile)

S-Q / SQ: Límite teórico de eficiencia Shockley-Queisser

TX: Transmisor (pin de transmisión de datos)

UART: Receptor/transmisor asíncrono universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

VE.Direct: Protocolo de comunicación serial propietario de Victron Energy

Vmp: Voltaje en el punto de máxima potencia

Voc: Tensión en circuito abierto (Open Circuit Voltage)

WiFi: Red inalámbrica local (Wireless Fidelity)

WLAN: Red de área local inalámbrica (Wireless Local Area Network)

YAML: Lenguaje de serialización de datos

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

Actualmente, el suministro eléctrico en Chile presenta limitaciones relevantes en términos de cobertura, continuidad y resiliencia, especialmente en zonas remotas o ante contingencias en la red. Diversas aplicaciones móviles, tales como unidades de servicios, casas rodantes o sistemas de apoyo en terreno dependen mayoritariamente de generadores a combustible fósiles para su operación, lo que implica altos costos operaciones, impacto ambiental y baja sostenibilidad.

Un ejemplo crítico de esta problemática ocurrió el 25 de febrero de 2025, cuando un apagón masivo afectó cerca del 98.5% de la población chilena, evidenciando la fragilidad del sistema eléctrico ante fallas en la red [1]. Este tipo de eventos, junto al creciente uso de sistemas eléctricos en aplicaciones móviles y aumento de la demanda energética, refuerza la necesidad de desarrollar soluciones que permitan autonomía energética y sostenibilidad [2].

En este contexto, los sistemas fotovoltaicos (PV) híbridos, que combinan generación solar con almacenamiento de energía eléctrica en baterías, surgen como una alternativa viable para garantizar autonomía eléctrica tanto en escenarios aislados como conectados a la red.

El objetivo de esta memoria es diseñar una planta fotovoltaica híbrida con almacenamiento energético, capaz de operar en modo off-grid o conectado a la red (on-grid), orientada a implementaciones en unidades móviles como prestación de servicios, casas rodantes o como respaldo energético para una vivienda residencial, garantizando un suministro eléctrico continuo en distintas regiones del territorio nacional.

Para lograrlo, en este trabajo se desarrolla una solución energética autónoma y adaptable que integra el diseño de un sistema fotovoltaico híbrido, almacenando energía para asegurar la continuidad del suministro. Se evalúa el desempeño del sistema bajo distintas condiciones de operación en el territorio nacional, ya que, el territorio chileno cuenta con una diversidad geográfica y climática variada [3]. Se implementa un sistema de monitoreo energético basado en dispositivos IoT.

Capítulo 2. Definición del problema

2.1. Hipótesis

Es posible diseñar e implementar un sistema fotovoltaico híbrido móvil con almacenamiento energético con conexión a la red, capaz de adaptarse a las distintas condiciones de irradiancia y ubicación geográfica a lo largo de Chile, cubriendo parcialmente la demanda anual energética de una unidad móvil y reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional utilizando solo materiales disponibles en el mercado chileno.

Mediante un dimensionamiento técnico-económico adecuado, a través de herramientas de simulación y modelación, se puede reducir el costo nivelado de energía (LCOE) del sistema. Además, se puede lograr un sistema de monitoreo energético en tiempo real de bajo costo, utilizando solo un microcontrolador para visualizar y almacenar los datos con la ayuda de sistemas IoT. A través del sistema de monitoreo, se puede validar la viabilidad técnica y energética del sistema PV híbrido bajo distintos escenarios de operación.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Se plantea el procedimiento para diseñar plantas fotovoltaicas híbridas con capacidad de almacenamiento que pueda operar en modo off-grid y on-grid para utilizarla en unidades móviles de prestación de servicios de distintos tipos, servicios médicos, señaléticas e iluminación en trabajos de mantención en vías públicas, sistema de respaldo móvil para sistemas críticos, vehículos destinados a la venta de alimentos (food trucks) y casas rodantes. Para suministros eléctricos continuos a lo largo del territorio nacional.

2.2.2. Objetivos específicos

- I. Analizar y cuantificar el recurso solar como fuente de energía para servicios móviles que se desplacen en distintas regiones de Chile.
- II. Estudiar y seleccionar las tecnologías fotovoltaicas más adecuadas para la aplicación propuesta, con el fin de mejorar la eficiencia, definir la estrategia de montaje, la mejor extracción de potencia eléctrica de los paneles solares considerando como indicadores la mayor densidad de potencia ($W_{\text{peak}}/\text{m}^2$), densidad gravitacional ($W_{\text{peak}}/\text{kg}$) y costo.
- III. Analizar y dimensionar módulos de conversión DC/DC, su conectividad con los paneles y algoritmo de control (MPPT) para minimizar el efecto del sombreado y almacenamiento eficiente de energía en bancos de batería de litio (LiFePO_4).

- IV. Analizar y dimensionar la conversión DC/AC monofásica y su integración junto a un banco de baterías y su conectividad con los paneles solares. Monitoreando las variables desde una interfaz gráfica.
- V. Determinar el perfil de carga según el servicio y elaborar cuadros de carga, con el objetivo de dimensionar correctamente los componentes, circuitos de distribución y protecciones (cuadro de carga) de manera de garantizar la seguridad del funcionamiento según las normas (SEC).
- VI. Dimensionar el sistema de generación y almacenamiento de energía, integrando los análisis previos y validando su funcionamiento a través de simulaciones e implementando físicamente una de las soluciones propuestas en una planta piloto disponible.

2.3. Alcances y limitaciones

- i. La propuesta será elaborada en base al estudio del estado del arte de sistemas híbridos para plantas fotovoltaicas móviles.
- ii. Se mejora la propuesta ya implementada en la planta móvil, reduciendo la cantidad de microcontroladores y cambio de tecnología en sistema de almacenamiento a LiFePO₄.
- iii. Se desarrollará el diseño de dos plantas híbridas, considerando la cantidad de paneles solares y la selección del sistema de almacenamiento necesario para una planta con 740 W de potencia, con paneles rígidos y, una segunda planta que dispone de 1.04 kW utilizando paneles flexibles y baterías de litio de 24V (2x12V) asegurando una autonomía continua en el suministro de energía a las cargas eléctricas del sistema.
- iv. La validación del diseño se realizará mediante simulaciones, evaluando el desempeño y eficiencia de la planta híbrida propuesta bajo distintos escenarios operativos.
- v. Las pruebas experimentales se llevarán a cabo en una planta móvil disponible para uso de casa rodante (5 personas), evaluando autonomía operativa continua y su desempeño en condiciones reales. Se analizarán diversas configuraciones de conexión para mejorar el rendimiento del sistema y validar los resultados obtenidos en la simulación.

2.4. Metodología

Para lograr el objetivo, se realizará primero un análisis y cuantificación del recurso solar, en distintas regiones a lo largo del país. Se estudiarán tecnologías fotovoltaicas, investigando las más adecuadas para aplicaciones móviles. Se simulará y diseñará el sistema híbrido completo. Se incluirán inversores, banco de baterías, estrategias de control y monitoreo. La propuesta será validada mediante simulaciones en softwares especializados y, se ensayarán pruebas en una unidad móvil disponible.

Capítulo 3. Estado del arte

3.1. Fundamentos y límites teóricos de celdas fotovoltaicas

El estudio “A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications” [4], ofrece una visión global sobre la tecnología fotovoltaica. Explica el funcionamiento del semiconductor, junto a la unión p-n y cómo la incidencia de fotos con energía suficiente libera electrones para generar corriente eléctrica. Además, clasifica las tecnologías fotovoltaicas en tres generaciones: basadas en silicio, películas delgadas y tecnologías emergentes, proporcionando una base técnica sólida sobre los componentes de una celda y factores externos que afectan su rendimiento.

En el artículo “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells” [5] se define el límite teórico máximo de eficiencia para una celda solar de una sola unión, como la de silicio convencional. Utilizando el principio de "balance detallado", los autores establecen que, bajo iluminación solar estándar, la eficiencia máxima está limitada por factores intrínsecos como el desajuste del espectro y la recombinación radiactiva. Para un material con un *bandgap* de 1.1 eV como el silicio, el límite se sitúa cerca del 30 a 33%.

En “Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells”. A. De Vos [6] expande la teoría de Shockley-Queisser al analizar celdas multi-unión o "tandem". Se demuestra matemáticamente que es posible superar el límite del 33% mediante la superposición de capas de diferentes materiales que aprovechen distintas partes del espectro solar. Estableciendo que un sistema de dos celdas puede alcanzar teóricamente el 42%, mientras que un número infinito de uniones llegaría hasta el 86%.

El informe “The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells” [7] proporciona una revisión moderna y actualizada del límite Shockley-Queisser (S-Q) específicamente aplicada al silicio. Analiza por qué, a pesar de los avances tecnológicos, el silicio cristalino se encuentra estancado en cuanto a eficiencia por pérdidas propias del semiconductor. Además, se discute cómo varían estos límites bajo condiciones de luz difusa e iluminación interior (indoor PV), lo cual es relevante para sistemas que no siempre operan bajo incidencia solar directa, aportando una visión realista de la brecha entre el límite teórico y el rendimiento en laboratorio.

Los estudios revisados permiten comprender los principios físicos de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas y las limitaciones teóricas de eficiencia asociadas al silicio y tecnologías multi-unión. Estos trabajos entregan la base teórica necesaria para analizar el rendimiento energético del sistema fotovoltaico propuesto y justificar técnicamente la selección de tecnologías utilizadas en el proyecto.

3.2. Eficiencia en celdas de silicio y mejoras tecnológicas

El estudio "Effects of Temperature and Solar Irradiation on Performance of Monocrystalline, Polycrystalline and Thin-Film PV Panels" [8] realiza una comparación detallada entre los tres tipos de paneles comerciales de silicio. Explica que el silicio monocristalino (m-Si) posee la mayor eficiencia por la estructura conformada de un cristal único de alta pureza, que facilita el flujo de electrones, aunque es más costoso y sensible al calor. El silicio policristalino (p-Si), se compone por múltiples fragmentos de cristal y presenta una eficiencia menor, pero con un costo de fabricación más económico. Por último, el silicio amorfo (a-Si), de capa delgada (thin-film), es el que menor eficiencia posee entre los tres, mas, tiene un coeficiente de temperatura superior, lo que se traduce en un rendimiento bajo climas calurosos con menos pérdidas.

3.2.1. Tecnología PERC

El artículo de M.A. Green, "Improvements in Silicon Solar Cell Efficiency" [9], documenta los primeros pasos hacia la arquitectura PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) a través del desarrollo de la estructura PESC (Passivated Emitter Solar Cell). En el informe se explica cómo la reducción de la recombinación en el emisor mediante capas de óxido de pasivación permitió alcanzar eficiencias cercanas al 20% en esa época.

En el trabajo "The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production" [10], Martin Green narra transición de la celda PERC desde laboratorios hasta su adopción masiva en la industria. Se detalla la arquitectura de la celda, destacando la incorporación de una capa dieléctrica reflectante en la parte posterior, la cual permite que los fotones que no fueron absorbidos reboten y tengan una segunda oportunidad para generar energía.

El estudio "An analysis of Passivated emitter and rear contact (PERC) cell and module" [11], realiza un análisis a nivel de celda y módulos fotovoltaicos con tecnología PERC. Estas celdas alcanzan eficiencias cercanas al 21%, destacando mejoras con respecto a la tecnología de silicio

convencional gracias a la capa dieléctrica trasera. Los resultados muestran una mejor respuesta en longitudes de onda altas.

3.2.2. Tecnología bifacial

En "Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges," [12], se realiza una revisión del estado industrial de la tecnología fotovoltaica bifacial. Los autores destacan que esta tecnología puede incrementar entre un 5% y un 30% la generación energética, dependiendo de factores como el albedo del suelo, altura de instalación y configuración del sistema. Además, menciona que los módulos bifaciales, generalmente basados en m-Si tipo PERC, presentan mejoras en eficiencia sin aumentar significativamente el costo de fabricación.

El artículo "Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics" [13], se centra en los fundamentos físicos que diferencian a las celdas bifaciales de las monofaciales, enfatizando como parámetro el factor de bifacialidad. Da a entender, además, que un panel bifacial no solo capta luz por ambos lados, sino que requiere un diseño de sistema, distancia al suelo y ángulo de inclinación, que permite a la cara posterior recibir mayor radiación.

Si bien el artículo "Benefits of bifacial solar cells combined with low voltage power grids at high latitudes" [14], menciona altas latitudes, su aporte es el análisis de la orientación y perfil de producción. Los autores demuestran que la tecnología bifacial permite configuraciones como montaje vertical, que generan dos picos de producción, durante la mañana y tarde, en lugar de uno solo al mediodía.

Los informes analizados permiten comparar tecnologías comerciales de silicio y evaluar mejoras introducidas por arquitecturas modernas como PERC y módulos bifaciales. Su aporte al proyecto consiste en entregar criterios técnicos para seleccionar paneles con mayor eficiencia y mejor desempeño bajo condiciones reales de operación.

3.3. Celdas fotovoltaicas de tecnología emergente y comparativas

En "Advanced solar cell concepts" [15], se analizan los conceptos físicos necesarios para superar las limitaciones de eficiencia del silicio cristalino (m-Si y p-Si). En este contexto, los autores mencionan tecnologías avanzadas orientadas a superar las limitaciones de las celdas de silicio. El

artículo destaca el rol de materiales alternativos como semiconductores compuestos, tecnologías de capa fina, esto incluyendo el silicio amorfo.

El artículo “Solar Energy Technologies: A Complete review of the Solar system technologies” [16], proporciona una revisión de las tres generaciones de celdas solares. Además, contextualiza las ventajas de cada tecnología en términos de flexibilidad, peso y eficiencia, permitiendo comparar el estado actual del mercado frente a tendencias futuras.

C. Yang et al. [17], presenta una revisión del estado actual, avances y desafíos en la industrialización de las celdas de perovskita. El perovskita cuenta con ventajas como bajo costo de fabricación y compatibilidad con aplicaciones flexibles, pudiendo integrarse en diversas superficies. Además, resalta el potencial en configuraciones tandem (Perovskita-Silicio), donde supera los límites de eficiencia de las celdas convencionales.

Los autores de “Perovskite solar cells: Progress, challenges, and future avenues to clean energy” [18], analizan el avance de las celdas de Perovskita, destacando eficiencias superiores a 26% y su capacidad para formar celdas multi unión con silicio. El estudio destaca los desafíos de estabilidad térmica y ante la humedad que sufren las celdas de Perovskita.

Isabela C. B. et al [19], compara celdas de capa fina CIGS, destacando su excelente rendimiento bajo condiciones de sombreado parcial y su bajo coeficiente de temperatura, lo que las hace más estable que celdas de silicio en entornos variables. Los autores destacan que las celdas CIGS ofrecen alta eficiencia y flexibilidad, teniendo la posibilidad de ser fabricadas en sustratos ligeros y flexibles.

Los autores de [4], profundizan en la durabilidad mecánica de las celdas flexibles sobre sustratos de plástico o metal. Analizan también el proceso de fabricación, señalando que las tecnologías de capa fina requieren técnicas más complejas que el silicio, pero permiten un menor uso de material semiconductor.

Los trabajos revisados permiten analizar tecnologías fotovoltaicas emergentes y compararlas con el silicio convencional en términos de eficiencia, flexibilidad y viabilidad futura. Estos estudios aportan una visión actualizada del desarrollo tecnológico del sector y permiten contextualizar las decisiones de diseño y selección tecnológica del proyecto.

3.4. Baterías y almacenamiento de energía

3.4.1. Tecnología de litio y plomo-ácido

El estudio “Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO₄ Battery” [20], experimental realiza una comparación entre las características entre las baterías de plomo-ácido y las de LiFePO₄ enfocándose en su comportamiento eléctrico y desempeño en aplicaciones energéticas. Los autores demuestran que las baterías de litio mantienen una curva de descarga más estable, manteniendo un voltaje relativamente constante durante gran parte del ciclo, a diferencia de las baterías de plomo-ácido. Además, las baterías de litio ferrofosfato exhiben mayor eficiencia energética (volumétrica y gravimétrica), menor efecto térmico y mejor comportamiento ante ciclos repetidos de carga y descarga.

El artículo “Baterías de ion litio: características y aplicaciones” [21], establece una base técnica sobre la terminología y funcionamiento de las baterías de litio. Explica conceptos como densidad de energía, eficiencia de carga/descarga y la importancia de los ciclos de vida. Describe el Sistema de Gestión de Batería (BMS), justificando por qué el litio ha desplazado otras químicas gracias a su menor y peso y mayor capacidad de descarga profunda.

3.4.2. Sistema de manejo de baterías

El artículo de S. Nyamathulla and C. Dhanamjayulu [22], presenta una revisión de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) y sistemas avanzados de gestión de baterías (BMS), abordando su funcionamiento, aplicaciones y desafíos actuales. El informe hace énfasis en el rol del BMS, encargado de monitorear variables críticas como voltaje, corriente, temperatura, asegurando una operación segura y eficiente. Finalmente, se identifican desafíos como la degradación de baterías, problemas térmicos, costos y limitaciones en reciclaje.

3.5. Recurso solar, geometría y factores ambientales

El artículo “Solar Radiation,” in Solar Engineering of Thermal Processes” [23], presenta los fundamentos de la radiación solar, explicando su generación y distribución en el espectro electromagnético. Se introducen conceptos clave como radiación directa, difusa y reflejada, geometría solar (ángulo de incidencia y cenital) y factores que afectan la disponibilidad del recurso solar, incluyendo condiciones climáticas y ubicación geográfica.

Los autores de “Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly,

seasonal and monthly levels” [24], comparan diferentes metodologías para maximizar la captación de radiación solar incidente, mostrando que el ángulo eficiente varía significativamente a largo del año debido a cambios en la posición del Sol. Los resultados indican que ajustar la inclinación de manera estacional puede aumentar la captación de energía solar. Además, se destaca que el ángulo depende principalmente de la latitud del lugar y condiciones climáticas locales. El estudio concluye que existe un compromiso entre simplicidad de instalación y maximización de la generación energética.

3.5.1. Suciedad (soiling) y sombreado

El estudio de E. Urrejola et al. [25], analiza el impacto de la suciedad acumulada (soiling) y la exposición solar en Santiago, una zona con altos índices de contaminación. Los autores determinan que el rendimiento de los paneles disminuye entre un 0.13% a 0.56% por día debido al polvo. El estudio se lleva a cabo utilizando módulos de silicio (m-Si, p-Si, a-Si).

El artículo ““Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert” [26], se enfoca en las condiciones extremas que existen en el Desierto de Atacama, una de las zonas con mayor radiación solar del mundo, pero también con altas tasas de soiling. Según el informe, la falta de lluvias y la acumulación de suciedad provocan pérdidas de energía anuales de hasta un 39% en zonas costeras del norte de Chile, mientras que en la parte sur del desierto con sitios de mayor altitud la pérdida anual de energía es de un 3%.

El artículo “Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String” [27], analiza mediante simulaciones y experimentos cómo el sombreado parcial de una sola celda puede degradar la potencia de toda una cadena. Proporciona modelos de las curvas P-V con múltiples picos de potencia que aparecen por el efecto sombra.

Los artículos de A.-D. Olteanu y Ș. Gheorghe [28] [29], hacen un análisis del sombreado parcial, concluyendo que el sombreado en una sola celda puede degradar la potencia de toda la cadena, ya que, aparecen dentro de la curva P-V, múltiples picos de potencia.

El trabajo “Impact of Shadow or Dust on Solar Photovoltaic Power Generation System” [30], analiza el impacto del soiling y sombreado en el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, mostrando que ambos fenómenos reducen la generación de energía mediante mecanismos distintos. El

sombreado parcial afecta la configuración eléctrica del sistema, generando desbalances en los módulos y reduciendo la potencia total, mientras que el polvo actúa como una barrera sobre el módulo que disminuye la radiación incidente sobre las celdas solares.

3.5.2. Base de datos y radiación

El estudio “A solar radiation database for Chile,” Scientific Reports” [31], presenta el desarrollo de una base de datos de radiación solar para Chile, diseñada para caracterizar el recurso solar disponible en el país. El artículo evidencia que Chile posee uno de los mayores potenciales solares a nivel mundial, especialmente en el norte. Se destaca, además, la variabilidad espacial del recurso.

El estudio de J. L. Muñoz-Pincheira et al. [32], analiza la complementariedad entre el recurso solar y eólico en Chile, con el objetivo de evaluar su potencia para sistemas híbridos. Los resultados muestran que la generación solar y eólica tienden a complementarse según la zona geográfica y reducen la inconsistencia del suministro.

3.6. Diseño y modelación de sistemas fotovoltaicos

El trabajo de N. H. Al Dulaimi y A. A. T. Alkhalidi [33], aborda el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid para establecer energéticamente un refugio rural sin acceso a la red eléctrica. Se desarrolla una metodología de dimensionamiento basada en el análisis de perfil de carga, recurso solar y selección adecuada de componentes. Se enfatiza en la importancia del almacenamiento energético para garantizar el suministro continuo durante la noche o condiciones desfavorables y su dimensionamiento basándose en el mes con menor radiación solar y días de autonomía necesarios. El estudio concluye que los sistemas off-grid son una solución viable y efectiva para electrificación en zonas aisladas, siempre que el diseño considere tanto la generación como el almacenamiento, asegurando el equilibrio entre costo, eficiencia y confiabilidad.

El artículo [34], presenta una revisión exhaustiva de sistemas híbridos de generación para aplicaciones off-grid. El estudio analiza distintas configuraciones, principalmente de energía solar, eólica, generador diésel y sistemas de almacenamiento, destacando su capacidad para mejorar la confiabilidad y reducir la intermitencia. Se enfatiza que la integración de múltiples fuentes permite optimizar el suministro energético en zonas aisladas.

El trabajo “Offgrid Portable Solar PV system for Emergency Conditions” [35], presenta el

diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico móvil off-grid orientado a condiciones de emergencia, donde el acceso a la red es inexistente o interrumpido. Describe el diseño de un generador móvil solar de 2 kWh/día montado en un remolque, se detalla la estructura mecánica necesaria para que el sistema sea transportable y de rápido despliegue. El estudio concluye que los sistemas solares móviles off-grid representan una solución efectiva y sostenible para responder a emergencias, destacando su relevancia ante desastres naturales o zonas aisladas.

El artículo de S. Yan Qi y B. Poobalan [36], describe el diseño de una unidad de atención dental móvil alimentado por energía solar para zonas rurales. El estudio desarrolla un sistema autónomo que integra paneles solares y almacenamiento en baterías, dimensionando para alimentar dispositivos dentales e iluminación. Se consideran restricciones como el espacio disponible, el peso y necesidad de portabilidad. El estudio concluye que los sistemas fotovoltaicos móviles representan una solución viable para aplicaciones médicas en zonas remotas, contribuyendo al acceso a servicios básicos mediante energías renovables limpias.

El informe de VeraSol [37], presenta el diseño técnico de sistemas solares off-grid, estableciendo buenas prácticas para el dimensionamiento y selección de componentes como módulos fotovoltaicos, baterías e inversores. Además, se introducen criterios para evaluar el desempeño del sistema y autonomía de almacenamiento. También se abordan aspectos de seguridad, durabilidad y condiciones reales de operación. Se destaca la importancia de considerar perfiles de carga realistas y condiciones ambientales específicas.

El estudio de M. Abed et al. [38], propone una estrategia de dimensionamiento híbrida para sistemas off-grid, pone énfasis en el escenario del peor caso de generación. El enfoque híbrido permite minimizar el costo total del sistema, para ello, utiliza técnicas de simulación y evaluación del desempeño bajo distintos escenarios operativos.

El estudio “On-Grid Solar Photovoltaic System: Components, Design Considerations, and Case Study” [39], presenta una revisión de sistemas fotovoltaicos on-grid, abordando sus componentes principales y criterios de diseño. El trabajo enfatiza el rol del inversor como componente clave para la conversión de energía y sincronización a la red. El trabajo concluye que un adecuado dimensionamiento y selección de componentes es esencial para el rendimiento y viabilidad económica

en sistemas conectados a la red.

El artículo “Design of autonomous mobile PV system for remote regions” [40], presenta el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo y móvil orientado a suministrar energía en regiones remotas sin acceso a la red eléctrica. Se propone una arquitectura que integra paneles fotovoltaicos y baterías para aplicaciones móviles. Se consideran restricciones como portabilidad, peso, facilidad de transporte y necesidad de garantía energética. Los resultados muestran que el sistema es capaz de abastecer cargas esenciales de manera estable, destacando la importancia de un balance entre generación y almacenamiento.

El estudio de M. U. Manoo et al. [41] realiza una comparación entre sistemas híbridos on-grid y off-grid aplicados a una zona remota con el objetivo de evaluar su desempeño técnico y económico. Se realizan distintas configuraciones que combinan energía solar, almacenamiento en baterías y conexión a la red eléctrica, evaluando indicadores como costo total del sistema, confiabilidad del suministro y capacidad de satisfacer la demanda energética. El artículo concluye que los sistemas híbridos reducen significativamente el costo de energía, destacando que en zonas remotas los sistemas off-grid o híbridos son generalmente la mejor alternativa.

3.7. Herramientas de simulación

El documento “Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: Status and Needs” [42], establece una distinción entre las herramientas de dimensionamiento y herramientas de simulación en sistemas fotovoltaicos. El artículo concluye que herramientas como PVSyst y SAM han evolucionado para reducir las diferencias entre dimensionamiento y simulación, permitiendo predecir fallas de suministro a través de modelos horarios de flujo de energía.

El estudio de T. Gurupira y A. J. Rix [43], realiza una comparación entre las tres herramientas de simulación más utilizadas en la industria y academia. Los autores destacan que PVSyst es el estándar comercial por su base de datos de componentes y alta precisión, mientras que System Advisor Model (SAM) de NREL sobresale por su flexibilidad para modelar sistemas híbridos y su análisis financiero sin sacrificar demasiada precisión. Además, presentan a PVLib como la opción con mayor flexibilidad y control para usuarios que utilizan programación.

El estudio “Soiling and Shading Analysis of Hybrid PV System for Rural Application using

PVSyst Software” [44], valida la robustez de PVSyst como estándar industrial para el análisis de pérdidas detalladas. El autor utiliza el software para modelar un sistema híbrido off-grid, demostrando la capacidad del software para integrar variables ambientales complejas.

3.8. Electrónica de potencia y control

En “Design Guidelines for Component-Based Off-Grid Solar Energy Systems” [45], los autores señalan que el acoplamiento en barra DC es preferible en sistemas aislados, ya que reduce las etapas de conversión de energía en comparación a arquitecturas con acoplamiento AC, evitando que incrementen las pérdidas. De este modo, el acople DC mejora la eficiencia del sistema y costos asociados a la electrónica de potencia.

El informe “Technical Comparison of PWM and MPPT Charge Regulators” [46], realiza una comparación entre las tecnologías predominantes en reguladores de carga: PWM (Pulse Width Modulation) y MPPT (Maximum Power Point Tracking). Los autores demuestran que, bajo condiciones de radiación variable, el regulador MPPT supera al PWM en eficiencia de recolección de energía, permitiendo extraer hasta un 30% más de potencia. El artículo analiza el algoritmo P&O (Perturb & Observe), estándar industrial para encontrar el punto de máxima potencia. Concluyendo que, si bien los controladores PWM son más económicos, los MPPT ofrecen un mejor desempeño global, siendo la opción más adecuada para maximizar la eficiencia en sistemas fotovoltaicos.

El artículo “Solar Charge Controllers using MPPT and PWM: A Review” [47], presenta una revisión comparativa entre controladores de tipo PWM y MPPT, enfocándose en sus principios de funcionamiento, ventajas y desventajas. El informe destaca que los MPPT pueden aumentar significativamente la eficiencia del sistema, sobre todo bajo condiciones variables o cuando la diferencia de voltaje entre el panel y batería es considerable. El estudio concluye que, aunque los PWM son adecuados para aplicaciones de bajo costo y simples, los controladores MPPT representa la mejor opción en sistemas que buscan maximizar la generación energética y eficiencia.

3.9. Monitoreo en sistemas fotovoltaicos utilizando IoT

El informe de A. Ur Rehman [48], aporta fundamentalmente con la implementación de registro de datos (data-logging) y control. El autor demuestra cómo el uso de datos de irradiancia y temperatura permite validar el rendimiento del sistema real frente a simulaciones. Proporciona una metodología sobre el diseño de interfaces de monitoreo asegurando que el suministro cumpla con el

perfil de demanda proyectado.

El artículo “Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assistant platform” [49], analiza un marco de comunicación utilizando el protocolo ESP-NOW para redes en malla y MQTT para la integración con Home Assistant. El estudio demuestra una baja latencia y alta estabilidad.

El informe “Wind and Solar Mobile Charging Station with IoT” [50], describe el desarrollo de una estación de carga transportable que combina energía eólica y solar. Utiliza microcontroladores Atmega328 e IoT para el monitoreo en tiempo real de la producción y consumo del sistema. El estudio destaca la versatilidad de la movilidad para desplegar soluciones sostenibles en espacio públicos, gestionada mediante sensores.

El trabajo “Design of Solar Panel Monitoring System Using ESP32 & IOT” [51], detalla la arquitectura de un sistema de monitoreo basado en el microcontrolador ESP32. Permite el seguimiento remoto de parámetros como voltaje, corriente, temperatura y potencia de salida. El artículo resalta el uso de plataformas IoT para el acceso a datos en tiempo real, lo cual es esencial para el mantenimiento preventivo y maximizar la eficiencia en sistemas fotovoltaicos en entornos dinámicos.

El informe “Real-Time Monitoring of Photovoltaic Systems and Control of Electricity Supply for Smart Micro Grid-PV using IoT” [52], se centra en el desarrollo de una micro-red inteligente de 1kW con monitoreo IoT de bajo presupuesto. Los autores proponen una arquitectura basada en Arduino plataformas de código abierto para visualizar datos de la batería, generación y carga del sistema, además, el estudio aborda la estabilidad de transferencia de datos.

3.10. Normativa y situación energética en Chile

3.10.1. Pliegos técnicos RIC

Los pliegos técnicos normativos RIC N°01 al N°19 constituyen el cuerpo normativo vigente para toda instalación de consumo en Chile. Los RIC N°04, 09, 11 y 15 [53] [54] [55] [56], establecen criterios sobre la selección e instalación de conductores eléctricos, protección, distribución y accesibilidad a los equipos. Además, el RIC N°11 aborda aspectos relacionados con instalaciones eléctricas especiales en entornos no convencionales como aplicaciones móviles. El RIC N°15

establece requisitos de seguridad y protección de personas frente a riesgos eléctricos. En conjunto, los reglamentos permiten respaldar las decisiones de diseño adoptadas, asegurando el cumplimiento de normativas en Chile.

3.10.2. Informes nacionales y planificación

El documento “Política Energética Nacional: Actualización 2022” [57], define la ruta de Chile hacia la carbono neutralidad para el año 2050. Destacando la vulnerabilidad energética, descentralización y democratización de la energía.

En “Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027” [58], se definen los escenarios de expansión de la infraestructura nacional para los próximos 30 años. Enfatizando la necesidad de flexibilizar el sistema, identificando el almacenamiento de energía como el pilar fundamental para permitir una generación energética 100% renovable.

El “Boletín Mensual: Diciembre 2024” [59] destaca que, en 2024, la generación renovable obtuvo un promedio mensual del 79%. Detallando que la energía solar lidera con un 28% de la generación total mensual.

3.11. Discusión del estado del arte

El estado del arte desarrollado permite establecer fundamentos teóricos y tecnológicos necesarios para el diseño e implementación del sistema solar híbrido móvil propuesto. Los estudios analizados aportan los criterios necesarios y relevantes para la selección de tecnologías fotovoltaicas, configuración del sistema (off-grid, on-grid e híbrido), dimensionamiento del almacenamiento energético y evaluación del desempeño mediante herramientas de simulación. Asimismo, la revisión del recurso solar y complementariedad solar-eólica en Chile permite contextualizar el proyecto según las condiciones energéticas a nivel nacional y plantear mejoras a futuro para la arquitectura del sistema híbrido propuesto.

Por otra parte, los trabajos relacionados con el monitoreo IoT y plataformas de supervisión energética, respaldan la decisión de implementar un sistema de monitoreo y adquisición de datos a base de microcontroladores ESP8266 y Raspberry Pi 4B. En conjunto, la literatura revisada demuestra que los sistemas híbridos representan una solución técnicamente viable para mejorar la autonomía energética.

Capítulo 4. Marco teórico

4.1. Fundamentos fotovoltaicos

4.1.1. Radiación global, directa y difusa

La irradiación solar, cuando alcanza la superficie terrestre, se puede clasificar en tres componentes principales: radiación directa, radiación difusa y radiación global tal como se observa en la Figura 4.1 [60].

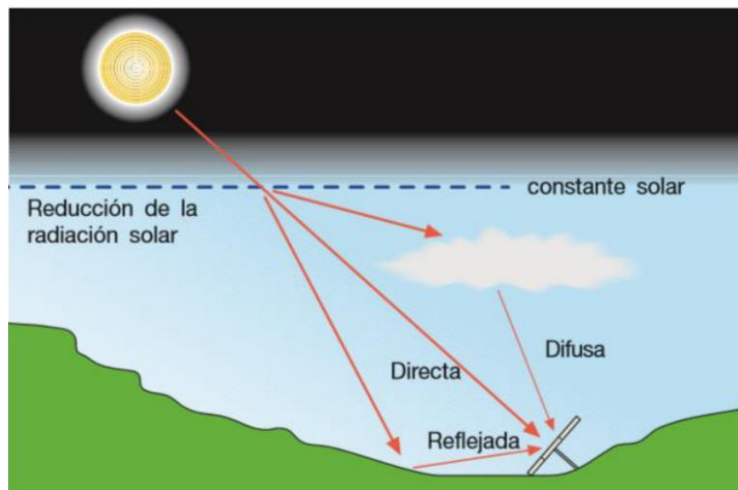


Figura 4.1 Principales tipos de irradiación en una celda fotovoltaica [60]

4.1.2. Trayectoria solar diaria y anual

La posición solar se describe a través de dos parámetros principales: el ángulo de elevación solar, y el ángulo acimutal. Las variables mencionadas son fundamentales para calcular la radiación sobre superficies inclinadas, ya que afectan directamente el rendimiento energético de un arreglo fotovoltaico.

Los estudios realizados en Turquía [61] y Ecuador [62] revalidan que la inclinación y ángulo acimutal determinan cuánta energía es captada por un arreglo fotovoltaico. La latitud y estación del año establecen el peso que tienen estos factores sobre la producción energética.

De esta forma, un sistema fotovoltaico instalado en Santiago de Chile (latitud 33.5° S) alcanza su mejor producción anual con inclinaciones entre 30 y 35° , mientras que con ángulos por debajo de 20° o instalaciones horizontales generan pérdidas de rendimiento en meses invernales [61] [63]. En cambio, un aumento de ángulo favorece la captación energética en invierno, pero, reduce la eficiencia en verano, por lo que la elección final debe enfocarse en los meses críticos de operación con la demanda esperada.

El efecto de la inclinación del panel no solo afecta la captación de energía, sino también la

autolimpieza por efectos de la lluvia y acumulación de polvo. Cuando el módulo tiene una inclinación baja, se acumula más polvo y suciedad, lo que reduce la eficiencia hasta en un 6% a 8% [25], sobre todo en espacios urbanos o si se le da una aplicación móvil al sistema. Normalmente, en sistemas móviles, el arreglo solar se encuentra paralelo al techo, dejando la inclinación con ángulo 0° y despreciando el aporte del albedo.

4.1.3. Horas equivalentes a sol (PSH)

Las PSH, de sus siglas en inglés Peak Sun Hour se puede resumir la energía solar diaria como un rectángulo equivalente que corresponde al número de horas en que la irradiancia constante de 1000 W/m²/día entregaría la misma energía diaria que el perfil solar real.

Numéricamente PSH es la irradiación diaria promedio del mes (kWh/m²/día), por lo que se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$PSH = \frac{GHI}{1 \text{ kW/m}^2/\text{día}} \quad (4.1)$$

Se debe diferenciar de la hora pico solar que se refiere al momento del día en que la irradiancia es máxima. Las PSH indican cuánta energía hay en el día mientras que la hora pico solar indica cuándo ocurre. Mientras menor sean las PSH, menor será la cantidad de energía producida.

A través de las PSH se puede estimar la generación diaria solar, utilizando un factor de pérdidas FP usualmente de 0.8, se obtiene que:

$$E_{FV_d} \approx P_{FV} \cdot PSH \cdot FP \quad (4.2)$$

donde:

- E_{FV_d} es la energía fotovoltaica diaria
- P_{FV} es la potencia fotovoltaica en kW
- PSH son las horas pico solar
- FP es el factor de pérdida asociado al sistema

4.1.4. Límite Shockley-Queisser

Este límite teórico impulsa el desarrollo de tecnologías multi unión y soluciones alternativas que buscan superar las restricciones de unión simple para obtener mayores eficiencias. El límite SQ, que se muestra en Figura 4.2, muestra la eficiencia de la celda fotovoltaica según su banda energética para casos de unión simple.

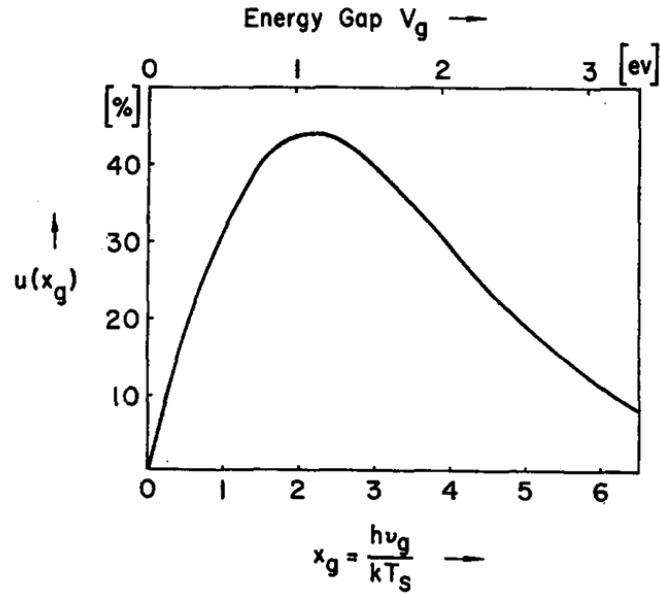


Figura 4.2 Eficiencia teórica máxima según banda energética del semiconductor [5]

4.1.5. Sombreado, soiling y pérdidas de eficiencia asociadas

El sombreado parcial puede ser causado por obstáculos, temporales o permanentes, que bloquean la radiación solar que incide sobre el sistema. Este fenómeno genera un desbalance de corriente entre las celdas conectadas en serie, lo que produce una disminución en la máxima potencia disponible que se ve reflejada en las curvas P-V.

Según [27], si el porcentaje de sombreado sobre el módulo aumenta, la potencia del sistema disminuye hasta alcanzar un punto crítico donde el sistema PV se vuelve insensible ante incrementos de sombra. El efecto descrito fue confirmado mediante simulaciones y mediciones experimentales que se observan en la Figura 4.3.

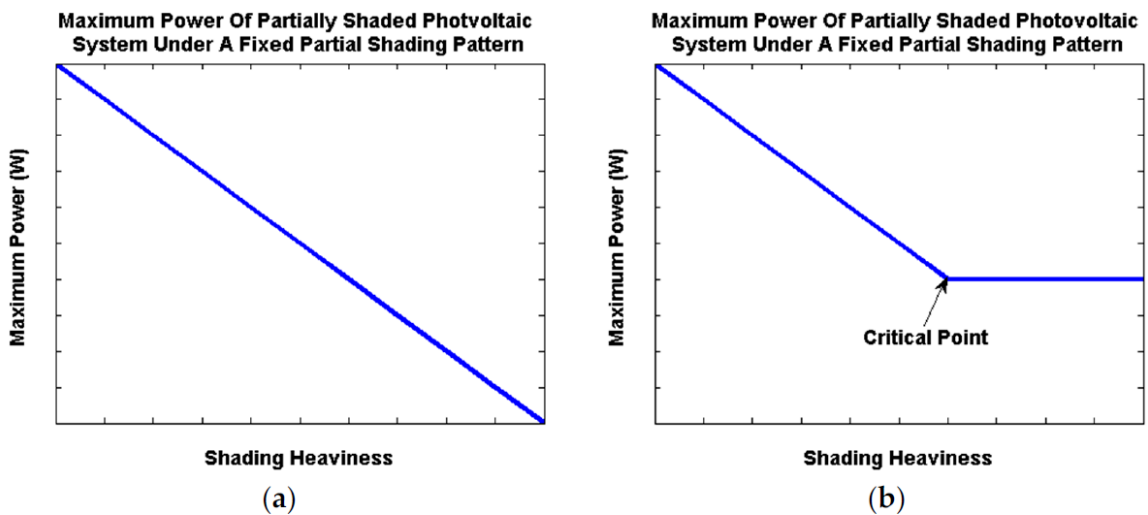


Figura 4.3 Rendimiento de un sistema PV bajo sombreado parcial, (a) caída de potencia antes de llegar al punto crítico. (b) Arribo a punto crítico descubierto según experimentos en [27]

4.2. Desarrollo tecnológico y eficiencia de celdas fotovoltaicas

La tecnología fotovoltaica se diferencia principalmente por el material semiconductor utilizado, categorizándolas en distintas generaciones. El material utilizado influye directamente en parámetros como eficiencia, costo, peso y flexibilidad.

Existen cuatro generaciones principales, aunque algunas fuentes solo consideran tres generaciones. Cada generación se clasifica según materiales utilizados, eficiencia de conversión y costo de producción [16] [64]. Las principales eficiencias de celdas fotovoltaicas se refleja en el ANEXO C.

4.2.1. Primera generación

La primera generación de celda fotovoltaicas abarca principalmente las celdas de silicio monocristalino y silicio policristalino. Son las más consolidadas del mercado, representan más del 80% de la capacidad instalada global y un 90% del mercado mundial [16]. Se destacan por tener una alta eficiencia y fiabilidad. Están constituidas de capas gruesas de silicio, al ser una de las primeras tecnologías fotovoltaicas, cuenta con aportes tecnológicos que permiten mejorar su eficiencia.

4.2.2. Tecnología PERC

La tecnología PERC (Passive Emitter and Rear Cell) se masifica comercialmente en la última década gracias a su mayor eficiencia, cumpliendo con la necesidad del mercado.

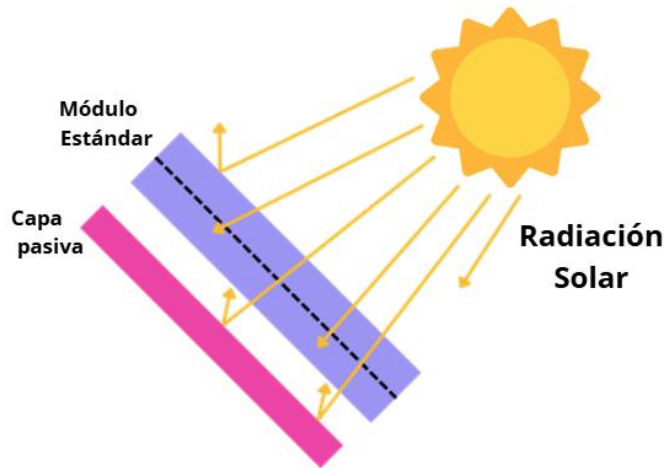


Figura 4.4 Tecnología PERC sobre panel inclinado

Los módulos PV que utilizan tecnología PERC incorporan una capa de pasivación dieléctrica en la parte posterior del módulo, como se puede observar en la Figura 4.4. Ofrecen un mejor rendimiento en condiciones de baja irradiancia y altas temperaturas, haciendo de los módulos PERC una opción atractiva para aplicaciones móviles [65] [10] [9].

En el informe de NREL [66] se reporta que, al incorporar un reflector dieléctrico adicional en la parte trasera de un panel solar, la reflectancia medida aumenta de forma importante. En ensayos comparativos, el valor pasa desde 19% sin el reflector hasta un 73% integrando el reflector. En configuraciones más cercanas a un proceso industrial, el mismo enfoque entrega reflectancias que van desde 37% a 51%.

4.2.3. Tecnología bifacial

Surge como una solución al límite teórico SQ, las celdas que integran tecnología bifacial captan la radiación solar tanto en la cara frontal como en la cara posterior del módulo, como se puede observar en la Figura 4.5.

Estos paneles bifaciales suelen utilizarse en escenarios, donde los paneles se encuentran elevados e inclinados, ya que se puede aprovechar la cara trasera del módulo.

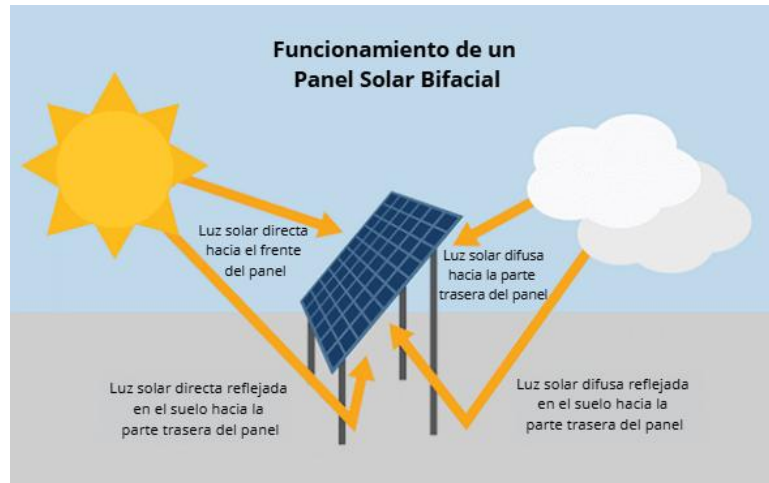


Figura 4.5 Funcionamiento de un panel solar bifacial

4.2.4. Segunda generación

La segunda generación agrupa celdas de película delgada (*thin film*), que utilizan materiales como telururo de cadmio (CdTe) o cobre indio galio seleniuro (CIGS). Esta generación está orientada a reducir costos de producción y materiales a cambio de eficiencias más bajas que la primera generación. Las propiedades mecánicas de esta tecnología, las hacen ideales en aplicaciones donde el peso y adaptabilidad a la superficie son factores críticos de diseño, ya que son más livianas, flexibles y cuentan con mayor tolerancia al sombreado parcial [4].

4.2.5. Tercera generación

La tercera generación, enfocada en lograr eficiencias más altas a bajo costo, introduce nuevos compuestos y una amplia gama tecnológica. La tercera generación incluye el uso de nuevos compuestos como el perovskita (PSC), estructuras multi-juntura (multi-unión) y materiales orgánicos (OSC). Las celdas PSC han experimentado un rápido desarrollo, aumentando su eficiencia desde el 2.2% en 2006 hasta un 26.15% en 2024 [18].

Tabla 4.1 Eficiencia y vida útil según tecnología fotovoltaica [16]

Generación	Tecnología	Eficiencia (%)	Vida útil (años)	Flexibilidad
1	m-Si	15-25	25	Rígido
1	p-Si	10-18	14	Rígido
2	a-Si	5-12	15	Flexible
2	CdTe/CdS	15-16	20	Rígido
2	CIGS	20	12	Flexible
3	GaAs	28-30	18	Flexible
3	Multi-juntura	36	-	Uno u otro
3	Perovskita	21	-	Flexible

4.2.6. Cuarta generación

Actualmente, se cuenta con una cuarta generación de tecnología fotovoltaica que integra nanotecnología, materiales híbridos y polímeros *thin film*. Estas tecnologías tienen como objetivos mejorar la durabilidad, eficiencia y flexibilidad en el futuro, manteniendo un bajo costo. Al presente, la generación todavía se encuentra en fase experimental y desarrollo [16].

En aplicaciones móviles, como casas rodantes o unidades de servicio, la selección de la tecnología fotovoltaica no depende únicamente de la eficiencia, sino también de factores como el peso del sistema y adaptabilidad a la superficie de montaje.

En este contexto, los paneles monocristalinos son ampliamente utilizados debido a su alta disponibilidad comercial y eficiencia. Sin embargo, tecnologías como CIGS, GaAs y Perovskita presentan ventajas en términos de flexibilidad por lo que, en un futuro pueden ser determinantes en aplicaciones móviles donde la geometría o peso del sistema sean parámetros críticos. La celda de GaAs tiene eficiencias que van entre 27.8% a 30.5%, acercándose al límite teórico de SQ. El perovskita tiene valores que tornan los 25.5%, ambas tecnologías cuentan con distintos tipos de estructura como se muestra en la Tabla 4.2, extraída de [67].

Tabla 4.2 Máxima eficiencia según tipo de celda

	Tipo de celda	Máxima eficiencia [%]
GaAs	Cristal simple	27.8
	Concentrado	30.5
	Cristal de capa fina	29.1
Perovskita	Perovskita	25.5
	Perovskita/Si tandem (doble juntura)	29.5
	Perovskita/CIGS tandem (doble juntura)	24.2

4.3. Tipos de sistemas fotovoltaicos y sus componentes

Estos sistemas se pueden clasificar en tres categorías principales desde el punto de vista de su configuración:

- Sistema conectado a la red (on-grid): Operan en conjunto con la red eléctrica, inyectando energía cuando la generación excede la demanda y consumiendo energía en caso contrario.
- Sistema aislado (off-grid): Funcionan de manera independiente a la red eléctrica, por lo que requiere un sistema de almacenamiento para garantizar el suministro continuo de energía.
- Sistema híbrido: Combinan la operación conectada a la red con almacenamiento energético, permitiendo mayor flexibilidad y continuidad de suministro ante fallas o variaciones en la generación solar.

Las características mencionadas dejan a los sistemas híbridos como una solución robusta para aplicaciones móviles, ya que permiten operar bajo distintos escenarios, ya sea de forma aislada o conectado a la red cuando sea posible.

Tabla 4.3 Comparación topología sistemas fotovoltaicos

	Sistema on-grid	Sistema off-grid	Sistema híbrido
Conexión a red eléctrica pública	Sí	No	Sí
Almacenamiento de energía	No	Sí	Sí
Net metering/net billing	Sí	No	Sí
Continuidad energética	Dependiente de red eléctrica pública	Dependiente de almacenamiento	Puede operar de forma aislada o junto a red como respaldo

4.4. Convertidores de potencia y seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

Dentro de los algoritmos más utilizados en sistemas móviles, se encuentran los MPPT que utilizan Perturb and Observe (P&O).

El algoritmo P&O, cuyo diagrama de flujo se observa en la Figura 4.6, introduce pequeñas perturbaciones en el voltaje o corriente del panel y observa el efecto sobre la potencia, es un algoritmo simple de implementar y de bajo costo computacional, no obstante, pueden aparecer oscilaciones cercanas al MPP y no tiene buen desempeño ante cambios rápidos de irradiancia.

Luego, si existen otros algoritmos como conductancia incremental, optimización por enjambre de partículas (PSO) o controladores que utilizan lógica difusa y/o redes neuronales, que permiten mejorar el seguimiento bajo condiciones altamente variables, presentan mayores requerimientos computacionales y dificultades a la hora de desarrollar e implementar el algoritmo.

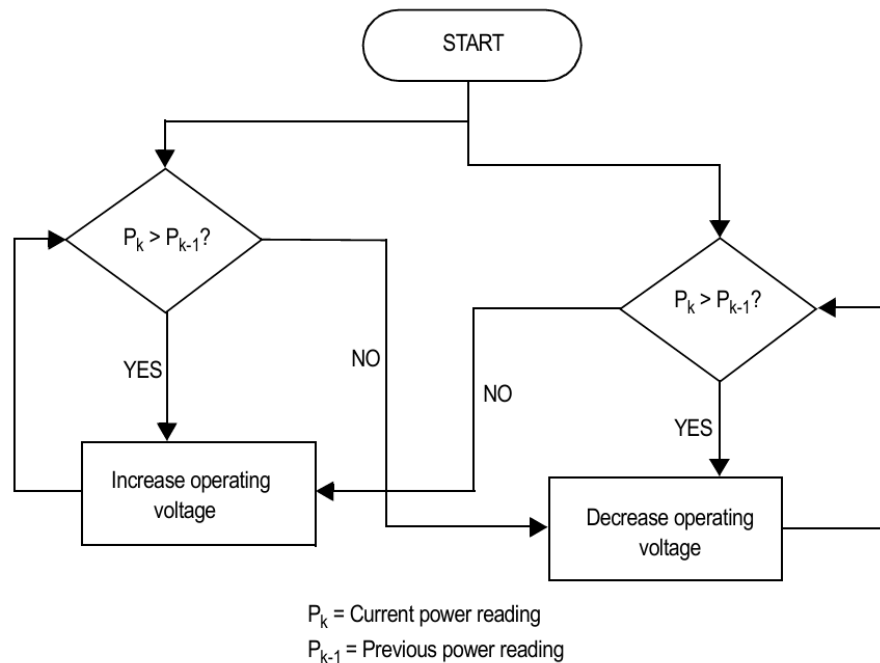


Figura 4.6 Diagrama de flujo de algoritmo P&O [68]

Existen controladores comerciales que utilizan algoritmos propios y mejorados, que combinan rapidez de convergencia y estabilidad de operación. A diferencia de controladores que utilizan algoritmos básicos, los controladores más avanzados suelen presentar mayor velocidad de seguimiento del MPP, menor pérdida por oscilación y mejor desempeño ante cambios de irradiancia.

4.5. Sistema de almacenamiento energético

En aplicaciones móviles, el almacenamiento de energía cumple un rol clave, ya que permite operar de forma autónoma el sistema en caso de ausencia de red eléctrica y generación solar,

asegurando el funcionamiento de cargas durante periodos nocturnos o condiciones climáticas desfavorables.

4.5.1. Tipos de baterías

Dentro de las baterías más conocidas y utilizadas actualmente en el mercado se encuentran [69] [22]:

- Baterías de plomo-ácido: Utilizada por su bajo costo inicial, presentan limitaciones como baja densidad energética, menor vida útil, mayor peso y requerimientos de mantenimiento lo que restringe su uso en aplicaciones móviles.
- Baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4): Variante de la batería de ion-litio, destaca por su alta estabilidad térmica y mayor seguridad operativa. Posee larga vida útil y densidad energética. Presenta una buena relación entre peso, capacidad y profundidad de descarga, siendo altamente adecuada para aplicaciones móviles.

En la Figura 4.7 se muestra las densidades de energía específica y volumétrica de los distintos tipos de baterías comúnmente utilizados en sistemas de almacenamiento de energía.

4.5.2. Parámetros relevantes

Para seleccionar y dimensionar adecuadamente un sistema de almacenamiento se deben considerar diversos parámetros como:

- Capacidad (Ah): Determina la cantidad de energía que se puede almacenar
- Profundidad de descarga (DoD): Porcentaje utilizable de la energía sin afectar la vida útil de la batería
- Vida útil (ciclos): Número de ciclos de carga/descarga que puede soportar una batería
- Densidad energética (gravitatoria) (Wh/kg): Relación entre la energía almacenada y peso
- Densidad energética (volumétrica) (Wh/L): Relación entre la energía almacenada y volumen

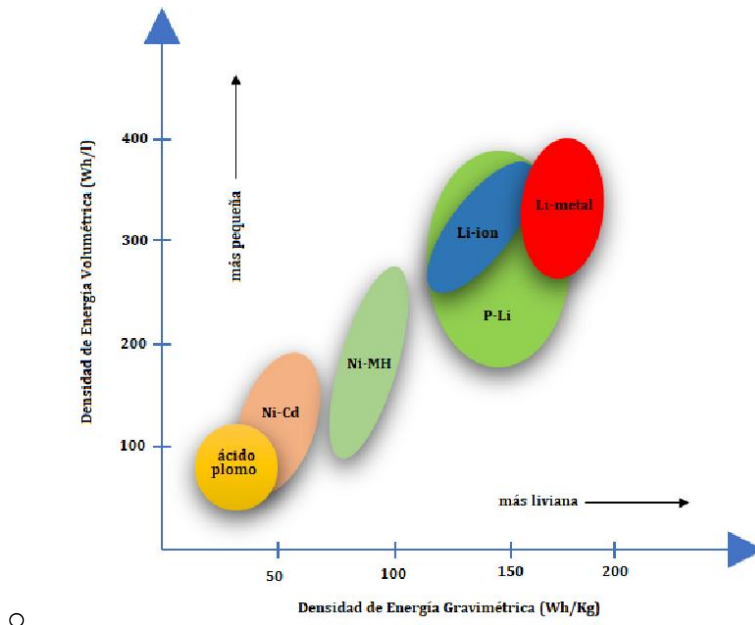


Figura 4.7 Densidad de energía específica y volumétrica según el tipo de batería [21]

En sistemas móviles, se debe tener presente minimizar el peso del sistema de almacenamiento, priorizar una alta densidad energética tanto volumétrica como gravimétrica, considerar alta profundidad de descarga, larga vida útil y sobre todo seguridad operativa, ya que estará sometida a cambios de temperatura y vibraciones constantemente.

En este contexto, las baterías LiFePO_4 se posicionan como una alternativa adecuada, debido a su equilibrio entre rendimiento, durabilidad y seguridad.

4.5.3. Dimensionamiento del banco de baterías

Para la aplicación móvil del sistema, el dimensionamiento del BESS se debe realizar en función del requerimiento energético del sistema, autonomía deseada y características técnicas de la tecnología.

Para dimensionar el BESS, se define un criterio de autonomía, que corresponde al número de días durante los cuales el sistema debe operar sin generación fotovoltaica, por ejemplo, bajo condiciones de baja irradiancia. Se consideran parámetros como la energía diaria requerida (E_{diaria}), días de autonomía (N), eficiencia del sistema (η) y profundidad de descarga de las baterías (DoD).

La capacidad energética del BESS se calcula mediante la ecuación:

$$E_{Ah} = \frac{E_{diaria} \cdot N}{DoD \cdot \eta} \quad (4.3)$$

donde:

- E_{diaria} es el consumo diario

- N son los días de autonomía
- DoD es la profundidad de descarga
- η es la eficiencia del sistema

En cuanto al cálculo para la capacidad del banco de baterías, una vez determinada la energía requerida (E_{bat}) y la tensión del sistema ($V_{sistema}$), se utiliza la fórmula:

$$C_{Ah} = \frac{E_{diaria}}{V_{BESS}} \quad (4.4)$$

4.6. Herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos

La simulación de sistemas PV es una herramienta fundamental para el análisis, dimensionamiento y evaluación del desempeño energético bajo distintas condiciones de operación, dado que, se puede estimar la generación energética del sistema fotovoltaico, evaluar el comportamiento que tiene el sistema ante condiciones reales de irradiancia y evaluar la interacción entre generación solar, almacenamiento y consumo energético, con el fin de validar el dimensionamiento del sistema.

Se considera el uso del software gratuito “SAM” por su capacidad de integrar perfiles de carga personalizados, simular la generación fotovoltaica en un sistema híbrido y posibilidad de evaluar económicamente el proyecto. Además, según el informe [43], SAM tuvo solo un 3.86% de error frente al sistema real.

4.7. Perfiles de carga en aplicaciones móviles

El perfil de carga representa el consumo energético de un sistema, siendo fundamental para el dimensionamiento y evaluación del sistema PV híbrido. En aplicaciones móviles, el perfil de carga presenta una variabilidad mayor, ya sea por el hábito de uso (ventas en caso de food truck) o condiciones de operación (lugar geográfico para una casa rodante).

La Tabla 4.4 muestra ejemplos de consumos típicos para equipos de food trucks o cocinas móviles según [70] [71]. Para referenciar consumos típicos en Chile, se utiliza el listado con tarifas locales de distribuidores de energía según un catálogo referencial de ENEL, utilizando el valor por kWh en tarifa BT1 (220 CLP/kWh) [72].

Tabla 4.4 Perfil de carga para cocina comercial y food trucks

Artefacto	Uso unitario	Consumo por uso (Wh)	Gasto por uso (CLP)	Ejemplo de uso (vez/día)	Consumo mensual (kWh)	Gasto mensual (CLP)
Tostador continuo	continuo	2640	581	continuo	2,64	581
Cocina eléctrica	30 min	1000	220	6	180	39600
Cafetera de filtro	2 min	50	11	100	150	33000
Hervidor/Agua caliente	1 litro	99	22	27	80,2	17642
Vitrina templada	9 horas	1200	264	continuo	1,2	264
Sandwichera/plancha	3 min	100	22	36	108	23760
Microondas 800W	3 min	40	8,8	30	36	7920
Horno eléctrico	1 ciclo	870	191,4	4	104,4	22968
Refrigerador clase A	continuo	7583	1668	continuo	7,583	1668

La Tabla 4.5 resume consumos y costos típicos para instalaciones residenciales pequeñas o para casas rodantes, considerando usos diarios frecuentes de electrodomésticos y cargas como refrigeración, cocina, agua y ventilación. Los kWh/mes se estiman según la potencia nominal y tiempos de uso representativo y los costos a partir de un precio referencial [72] [73].

Tabla 4.5 Consumo y costos eléctricos para casas rodantes

Artefacto	Uso unitario	Consumo por uso (Wh)	Gasto por uso (CLP)	Ejemplo de uso (vez/día)	Consumo mensual (kWh)	Gasto mensual (CLP)
Ducha corta (40°C, eléctrica)	3 min	918	202	1	27.5	6060
Cocina eléctrica 1800 Watts	30 min	900	198	2	54.0	11880
Hervidor	1 litro	99	22	2	5.9	1300
Horno Eléctrico	1 ciclo	870	191	0.285	7.5	1659
Microondas 800 Watts	1 min	13	3	2	0.8	176
Refrigerador Clase A	continuo	7583	1668	continuo	7.6	1668
Aire Acondicionado (9000 BTU)	1 hora	790	173	2	45.6	10032
Calefactor Eléctrico 2 kW	1 hora	2000	440	2	120.0	26400
Ampolleta LED (7 W)	1 hora	7	2	2	0.4	99
Pantalla 45" Clase A	1 hora	37	8	2	2.2	484
Licuada 400 Watts	3 min	7	2	2	0.4	88
Secador de pelo 1800 Watts	5 min	150	33	1	4.5	990
Cargador USB	2 horas	30	7	1	0.9	198
Bomba de agua	1 hora	30	7	1	0.9	198
Extractor de aire	1 hora	20	4	4	2.4	528
Sistema de monitoreo	continuo	90	19.8	continuo	2.7	594

4.8. Normativa y regulación en Chile aplicable a sistemas fotovoltaicas híbridos móviles

El diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos en Chile se rige por el Reglamento de Instalaciones de Consumo (RIC), establecido por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). El reglamento define condiciones mínimas de seguridad eléctrica, correcta instalación de equipos y protección de personas [74].

Si bien el sistema no corresponde a una instalación fija tradicional, debe cumplir con los mismos principios de seguridad establecidos para instalaciones estacionarias, sobre todo en lo relativo a protecciones eléctricas, canalizaciones y operación segura de los equipos. Las normativas aplicadas se mencionan en los capítulos correspondientes. En particular, los pliegos técnicos y RIC que resultan aplicables están relacionados con sistemas de autogeneración, puesta a tierra, protección contra tensiones peligrosas, conductores y canalizaciones, ya que el sistema propuesto trabaja con generación fotovoltaica, almacenamiento de energía en baterías, conexión a la red y no opera en un solo punto, sino que es un sistema móvil. Entre los reglamentos más relevantes, considerando lo anteriormente mencionado, destacan el RIC N°09 [54] correspondiente a sistemas de autogeneración, el RIC N°06 [75] sobre puesta a tierra, el RIC N°05 [76] asociado a protecciones eléctricas, además del RIC N°04 [53] que menciona los conductores eléctricos.

Capítulo 5. Desarrollo y simulación del sistema

El presente capítulo describe la metodología e implementación del sistema PV híbrido propuesto, así como el proceso de adquisición de datos y validación experimental de su desempeño.

Se detalla el diseño e integración de los distintos subsistemas, incluyendo generación fotovoltaica, almacenamiento energético, conversión de potencia y monitoreo en tiempo real para la casa rodante que se muestra en Figura 5.1. buscando mejorar el sistema implementado en el informe escrito por S. Molina [75].

Se consideran dos plantas fotovoltaicas híbridas móviles a estudiar. Para el primer caso, se realizará una planta PV híbrida móvil, conservando el arreglo solar implementado en [75], cambiando la tecnología utilizada para el sistema de almacenamiento, reduciendo de seis baterías de plomo-ácido a dos baterías de LiFePO_4 , logrando así, reducir el peso y aumentar la vida útil del BESS.

En el segundo diseño, solo simulado, se montan paneles flexibles que utilicen mayor superficie útil del carro y aumenten la generación eléctrica solar, conservando la tecnología LiFePO_4 para el BESS. Además, se considera el uso de un inversor híbrido, que actúe como regulador y cargador, permitiendo gestionar de mejor manera la energía proveniente de distintos recursos (solar, BESS, red).



Figura 5.1 Casa de arrastre disponible para pruebas

5.1. Cuadro de carga

El cuadro de carga real constituye un elemento clave para la validación del sistema energético implementado, ya que permite caracterizar la demanda energética diaria y mensual del sistema, considerando la potencia requerida por los equipos y su consumo diario (kWh/día).

El carro está equipado con electrodomésticos y artefactos que se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Perfil de carga planta piloto

Cantidad	Artefacto	Potencia unitaria (W)	Uso diario (horas)	Consumo diario (Wh/día)	Consumo mensual (kWh/mes)	Gasto mensual (CLP)
1	Frigobar	-	24	-	9,3	110
1	Televisor 32"	37	3	111	3,33	736,6
1	Hervidor/Agua caliente	2000	0,25	500	15	1300
7	Ampolletas LED 12V 6W	42	5	210	6,3	1386
1	Bomba de agua	120	2	240	7,2	1584
5	Cargadores teléfono/laptop	120	2	240	7,2	1584
1	Router 12V 1A	12	24	288	8,64	1900
1	Raspberry, servidor y pantalla	9,5	24	228	6,84	1505
2	ESP8266 monitoreo MPPT	1	24	24	0,72	158

El análisis del perfil de carga real permite presentar las variaciones respecto a los modelos obtenidos en el capítulo 4.7. Este perfil se utiliza como entrada para la simulación en SAM, permitiendo contrastar el desempeño esperado con el comportamiento real del sistema utilizando un mismo perfil en todos los escenarios.

5.2. Disponibilidad de radiación y recurso solar en puntos de interés

Es importante considerar la diferencia de recurso solar a lo largo de Chile, sobre todo para una casa rodante cuyo propósito es desplazarse en diferentes latitudes del país. La diferencia de radiación solar entre el Norte y Sur, presentada en

Tabla 5.2, demuestra que el rendimiento del sistema fotovoltaico híbrido móvil varía según la ubicación y mes del año, por lo que se requiere de una selección de tecnología que se adapte a distintas condiciones operativas.

Tabla 5.2 Recurso solar y PSH a lo largo de Chile

Latitud (°)	Ciudad	GHI promedio anual (kWh/m²/día)	Promedio PSH anual (horas)
-18,3106	Arica	6.17	6.17
-20,2132	Iquique	7.18	7.18
-22,5014	Calama	7.22	7.22
-23,6793	Antofagasta	7.00	7.00
-27,5486	Copiapó	6.29	6.29
-29,9041	La Serena	4.99	4.99
-30,7256	Ovalle	5.66	5.66
-31,9096	Los Vilos	4.89	4.89
-32,7740	La Calera	5.43	5.43
-33,4486	Santiago	5.30	5.30
-34,9881	Curicó	5.06	5.06
-35,4310	Talca	5.09	5.09
-36,5920	Chillán	5.02	5.02
-36,8401	Concepción	4.87	4.87
-37,4800	Los Ángeles	4.90	4.90
-38,7535	Temuco	4.20	4.20
-39,8006	Valdivia	3.94	3.94
-41,4649	Puerto Montt	3.55	3.55
-43,1385	Quellón	3.33	3.33

Se calcula, además, las PSH disponibles en los tres puntos geográficos de estudio (Norte, centro y sur del país) para evaluar el desempeño del sistema. Se consideran Iquique, Concepción y Quellón como los puntos de estudio para evaluar el desempeño del carro en movimiento a lo largo de Chile. En la Tabla 5.3 se observa las PSH disponibles a lo largo de un año para las zonas evaluadas según datos extraídos del Explorador Solar [76] [77] [78].

Tabla 5.3 PSH disponibles en puntos de interés

Mes	Iquique (PSH)	Concepción (PSH)	Quellón (PSH)
Enero	8.44	8.13	6.18
Febrero	7.95	7.07	5.25
Marzo	7.40	5.54	3.48
Abril	6.12	3.53	2.13
Mayo	5.08	2.00	1.34
Junio	4.36	1.60	1.0
Julio	4.48	1.64	1.1
Agosto	5.08	2.44	1.67
Septiembre	6.28	4.23	2.83
Octubre	7.50	5.72	3.88
Noviembre	8.45	7.4	5.09
Diciembre	8.65	8.2	5.98
Promedio Anual	6.69	4.65	3.29

5.3.Dimensionamiento del arreglo fotovoltaico

Para dimensionar el arreglo solar se debe tener en cuenta la demanda diaria promedio del sistema según el perfil de carga.

$$E_{diaria} = \frac{E_{mes}}{30} \quad (5.1)$$

Obteniendo así, de la Tabla 5.1 que la demanda diaria es de 1.55 kWh/día. Considerando las pérdidas que existen en el convertidor DC/DC, BESS, cableado, inversor, etc., se aplica una eficiencia del sistema igual al 0,9.

$$E_{pv} = \frac{E_{diaria}}{\eta} \quad (5.2)$$

Reemplazando los valores por los obtenidos según la ecuación y perfil de carga, se tiene que la energía que debe generar el sistema fotovoltaico es de 1.72 kWh/día. Para generar esa cantidad de energía diaria se necesita que la potencia del arreglo fotovoltaico sea:

$$P_{pv} = \frac{E_{pv}}{PSH} \quad (5.3)$$

Para que el carro sea autosuficiente energéticamente desde Arica a Quellón, se utilizan las PSH

del peor escenario, siendo este un mes de junio en Quellón, obteniendo así, según la ecuación, que el arreglo solar debe generar 1.72 kW_{peak} . Ahora bien, se considera también el sitio donde se encuentra ubicada la planta piloto, ya que, se harán pruebas de medición para comparar con las simulaciones, donde la generación del arreglo fotovoltaico debe ser de 1.1 kW_{peak} en el mes de junio (invierno). En la Tabla 5.4 se ve reflejada la potencia que el arreglo necesita según la latitud donde se encuentre y PSH utilizadas.

Tabla 5.4 Potencia requerida por arreglo según PSH

Ciudad	PSH invierno	Potencia peak requerida (W)	PSH promedio	Potencia promedio requerida (W)
Arica	4.36	395	6.69	257
Concepción	1.60	1080	4.65	370
Quellón	1.0	1720	3.29	523

En la Tabla 5.5 se muestran distintos paneles solares, considerados según disponibilidad de mercado y situaciones planteadas en Tabla 5.4.

Tabla 5.5 Módulos PV considerados para implementación

Modelo	Potencia (W)	Alto (m)	Ancho (m)	Peso (kg)	Densidad de potencia (W/m ²)	Densidad gravimétrica (W/kg)
JS185D	185	1.58	0.81	17.5	144,9	10,57
AtemPower	250	1.58	0.81	14.5	195,8	17,24
Amerisolar	520	2.2	1.2	8.0	197	65
Sine Energy	630	2.3	1.1	28.3	249	22,26
SunPower C60	3.34	0.125	0.125	-	213,8	-

Tomando en cuenta el área de montaje, en la

Tabla 5.6 se observa la cantidad de módulos necesarios según área o demanda energética.

Área de montaje en casa rodante: $3,236 \cdot 1,661 = 5,4 \text{ m}^2$

Cantidad de módulos:

$$N_{pv} = \frac{P_{req}}{P_{pv}} \quad (5.4)$$

Tabla 5.6 Cantidad de módulos PV según área disponible, demanda pico, demanda promedio

Modelo	Área (m ²)	Cantidad de módulos PV según área	Cantidad necesaria módulos PV (invierno, Quellón)	Cantidad necesaria módulos PV (promedio, Quellón)
JS185D	1.27	4	10	3
AtemPower	1.27	4	7	2
Amerisolar	2.64	2	4	1
Sine Energy	2.53	2	3	1
SunPower C60	15,6e-3	346	574	175

Por disponibilidad de módulos fotovoltaicos en terreno, se utiliza el modelo JS 185 D para la implementación, y, por sus ventajas de peso y densidad de potencia, el módulo flexible de capa fina AmeriSolar se proyecta como mejora a futuro, simulando sus resultados. Se estima la cantidad de generación solar para ambos paneles solares a través de la potencia total del arreglo por la cantidad de horas de sol (PSH) tal como se expresa en la ecuación:

$$E_{PV}[Wh] = P_{PV} \cdot PSH \quad (5.5)$$

Utilizando la ecuación (5.5), se obtiene que la energía producida, con un arreglo de 4x185 W, es de 2434 Wh con 3.29 PSH. Si se cambia la tecnología, montando paneles de 2x520 W, la energía producida sería de 3421 Wh.

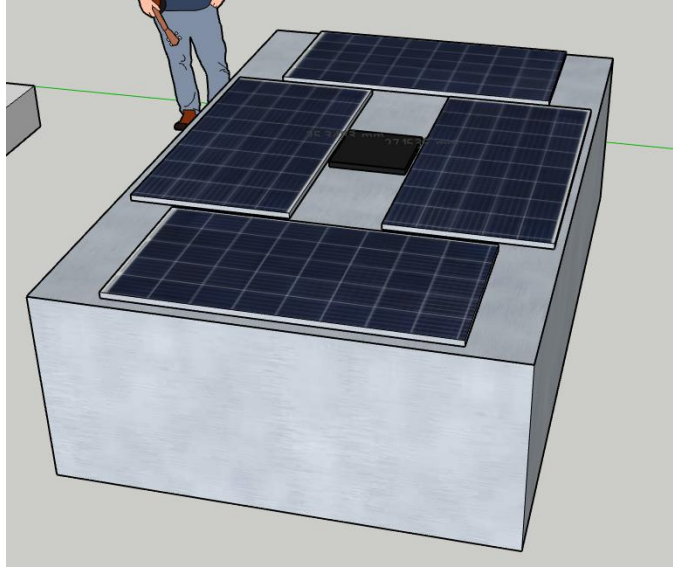


Figura 5.2 Perfil superior de casa rodante con paneles JS185D (2S2P)

Se monta un arreglo solar con el módulo JS185D, utilizando una configuración 2S2P para las pruebas en Concepción, ya que cubre la demanda promedio en el mes de pruebas. El espacio utilizado por los paneles se proyecta en 3D en la Figura 5.2.

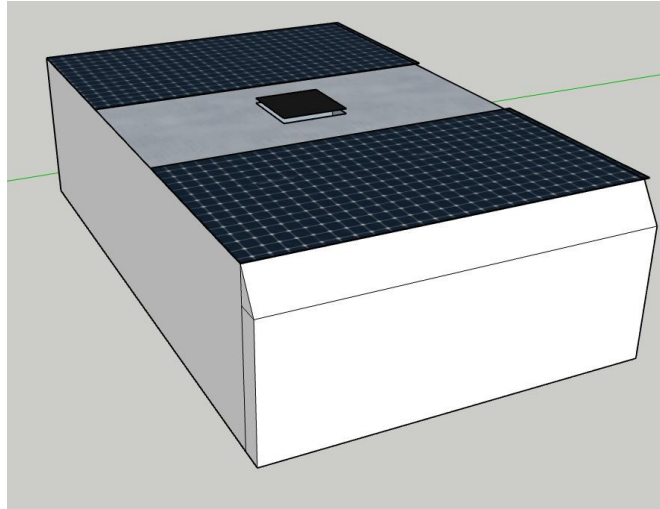


Figura 5.3 Perfil superior de casa rodante con paneles Amerisolar Flexible 520W

5.4.Dimensionamiento del banco de baterías

La capacidad requerida del banco de baterías (BESS) se obtiene a través de la ecuación:

$$C_{req} = \frac{E_{total} * N}{\eta \cdot DoD \cdot V_{BESS}} \quad (5.6)$$

$$C_{req} = \frac{1720 \text{ Wh} * 3 \text{ días}}{0.92 \cdot 0.85 \cdot 24V} = 274,9 \text{ Ah} \quad (5.7)$$

Considerando el espacio físico de la planta móvil, se plantea el uso de dos baterías de LiFePO₄

de 12V 100Ah en una configuración dos en serie (2S1P). La razón por la que se subdimensiona el BESS se debe al entorno de prueba de la casa rodante, donde, la generación solar es suficiente para alimentar las cargas en el mes de prueba. Se elige para el banco de baterías, dos baterías de LiFePO₄ Ritar 12V 100Ah que incorpora BMS y comunicación a través del protocolo Bluetooth. Cada batería está compuesta de 4 módulos de 3.6V 100 Ah, tal como se observa en la Figura 4.1. Las especificaciones de la batería se encuentran en el Anexo 1.

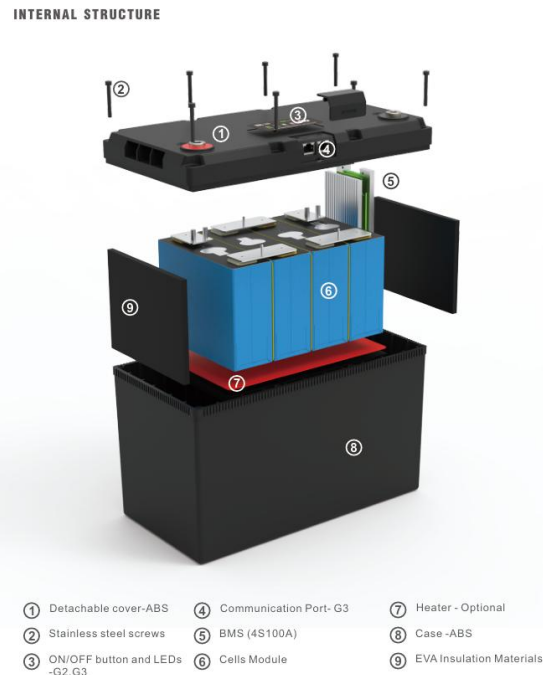


Figura 5.4 Composición batería Ritar 12V 100Ah

5.1. Selección del inversor

Se elige para la implementación, utilizar el inversor IPT 2000-22 disponible, este inversor, como indica su nombre es de 2000 VA y tiene la capacidad de comunicarse vía Wifi o Bluetooth con una aplicación propia del fabricante. La principal ventaja del inversor utilizado es que genera una señal sinusoidal pura, como se observa en la Figura 5.5.

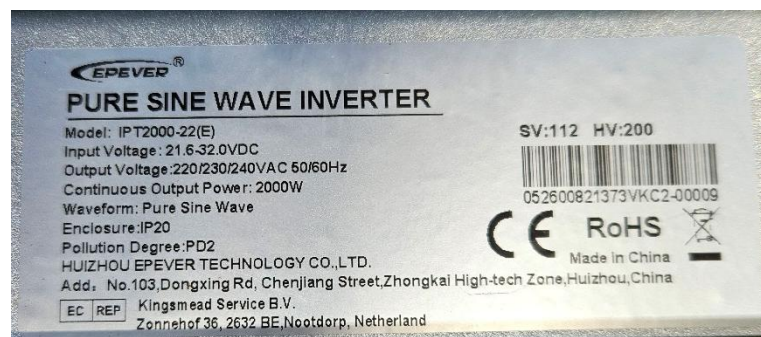


Figura 5.5 Inversor IPT 2000-22 seleccionado

5.2. Selección del regulador de carga

El regulador de carga debe ser compatible con el arreglo solar, siendo necesario obtener la tensión en circuito abierto (V_{oc}) y la corriente en cortocircuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico. Los valores nombrados no deben superar el 80% del valor máximo del regulador permitido por el fabricante

Según lo dicho en el Capítulo 3 “Estado del arte”, los reguladores o cargadores MPPT destacan por su eficiencia superior a reguladores PWM, por lo que la decisión de implementación se toma en base a la teoría.

Como el arreglo utiliza dos módulos en serie, el voltaje de circuito abierto es:

$$V_{oc} = 44.3 * 2 = 88.6 \text{ V} \quad (5.8)$$

Si se considera el 20% de holgura, se debe utilizar un MPPT de 90 V o más y 5.29 A de corriente por lo que se opta por utilizar un Victron MPPT 100/20 de la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Modelo MPPT a utilizar

Modelo	Voltaje (V)	Corriente (A)
Victron MPPT Smart solar charge controller 100/20	100	20

Para el dimensionamiento del inversor, se considera la misma holgura que para el regulador DC/DC. Por lo que, contemplando los 1550 W que utilizan los equipos presentes en la casa rodante, se utiliza un inversor de 2 kW. La proyección de implementación se observa en la Figura 5.6.

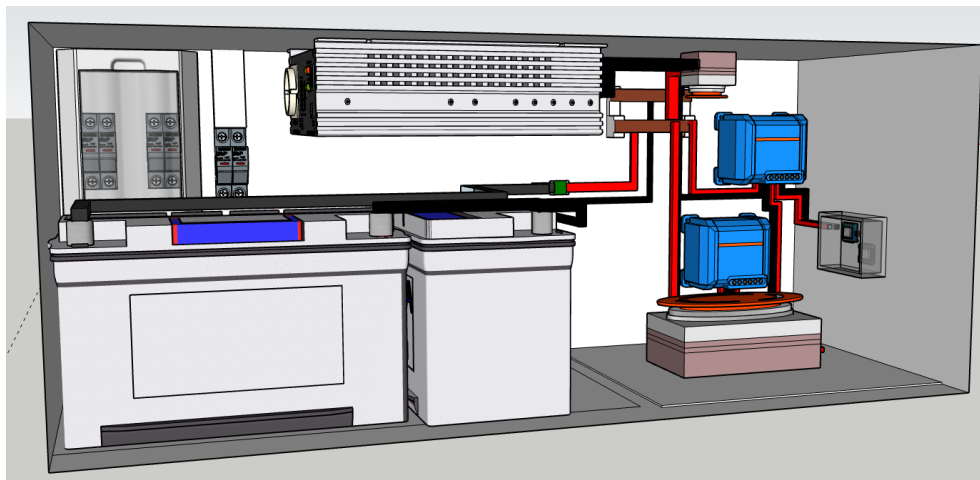


Figura 5.6 Diseño 3D zona de almacenamiento exterior de casa rodante

5.3. Escenarios simulados

Se debe recordar que para simular y validar el diseño de la planta PV híbrida móvil se utiliza el recurso solar disponible en Concepción, se evaluaron distintos escenarios de configuración del

sistema, reflejados en la Tabla 5.8, considerando variaciones en la tecnología de paneles y sistema de almacenamiento con el fin de analizar el desempeño energético, capacidad de abastecer la demanda definida y costo nivelado de energía (LCOE).

Tabla 5.8 Escenarios de simulación

Escenario	Panel	Batería	Potencia Arreglo	BESS
1	4x185 W	12V 45 Ah (Pb)	740 W	24V 135 Ah
2	4x185 W	12V 100 Ah (LFP)	740 W	24 V 100 Ah
3	2x520 W	12V 100Ah (LFP)	1040 W	24 V 100 Ah
4	Superficie	12V 100Ah (LFP)	870 W	24 V 100 Ah

5.3.1. Escenario 1

El primer escenario utiliza paneles JS185D, con un arreglo de 740 W y sistema de almacenamiento de baterías de plomo-ácido con una configuración 2S3P (12V135Ah). El desempeño del sistema y su evaluación económica dentro de su vida útil se refleja en la Tabla 5.9, cuyos valores fueron calculados por el software SAM.

Tabla 5.9 Resumen desempeño de sistema escenario 1 calculado por SAM

Métrica	Valor
Energía AC al año 1	934 kWh
Factor de capacidad DC (año 1)	14,8%
Relación de desempeño	0.74
Eficiencia ciclo completo batería	96,51%
Energía desde sistema a BESS	100%
LCOE nominal	338 CLP/kWh

Revisando los resultados en SAM, se observa que, para que el sistema tenga una vida útil de 20 años, se debe cambiar el sistema de almacenamiento un total de 6 veces. Estos cambios, se ven reflejados en el LCOE nominal, cuyo valor es más alto que la tarifa de red eléctrica, concluyendo así, que, con esta configuración, el sistema no es económicamente viable.

Tabla 5.10 Energía eléctrica generada para escenario 1

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
E_{AC} (kWh)	134.5	107.6	92.6	53.6	32.3	24.9	26.4	39.6	67.3	96.4	123.4	135.3
$E_{díaConce}$ (kWh/día)	4.34	3.71	2.99	1.79	1.04	0.83	0.85	1.28	2.24	3.11	4.12	4.37
$E_{díaIqq}$	4.46	4.07	4.06	3.40	2.82	2.47	2.43	2.71	3.46	4.07	4.64	4.65
$E_{díaQuellón}$	3.42	2.85	1.86	1.17	0.73	0.51	0.57	0.78	1.40	2.11	2.72	2.95

Al utilizar el primer escenario simulado, la generación solar, utilizando datos de radiación en Concepción (año 2016) [3], se observa en Tabla 5.10 un déficit de energía durante los meses de mayo a agosto. En el sur de Chile, específicamente en Quellón, desde abril a septiembre no se cubre la demanda. Al contrario, en Iquique, norte de Chile, la energía diaria es suficiente durante todo el año para cubrir la demanda necesaria.

5.3.2. Escenario 2

Para este escenario se mantiene la configuración del sistema fotovoltaico actual, pero, se reemplaza el BESS, actualizando a baterías de tecnología LiFePO_4 , con el fin de estimar el desempeño y autonomía del sistema al contar con mayor profundidad de descarga, mayor eficiencia de carga/descarga y mayor vida útil. Para evaluar económicamente el sistema, se tiene en cuenta el LCOE.

Tabla 5.11 Resumen desempeño de sistema escenario 2 calculado por SAM

Métrica	Valor
Energía AC al año 1	933 kWh
Factor de capacidad DC (año 1)	14,8%
Relación de desempeño	0.74
Eficiencia ciclo completo batería	96,09%
Energía desde sistema a BESS	100%
LCOE nominal	139 CLP/kWh

Como se refleja en la Tabla 5.12, el LCOE en este escenario es menor que en la sección 5.3.1. Reduciendo el precio en 199 CLP por kWh. Si bien, la generación solar se mantiene, se debe evaluar la viabilidad económica.

Tabla 5.12 Energía eléctrica generada para escenario 2

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
E_{AC} (kWh)	134.5	107.8	92.5	53.6	32.2	24.8	26.3	39.4	67.2	96.4	123.4	135.0
$E_{día_{prom}}$ (kWh/día)	4.34	3.72	2.84	1.79	1.04	0.83	0.85	1.28	2.24	3.11	4.11	4.36
$E_{día_{Iqq}}$	4.46	4.09	4.06	3.46	2.82	2.47	2.43	2.71	3.53	4.08	4.63	4.64
$E_{día_{Quellón}}$	3.25	2.71	1.76	1.13	0.69	0.49	0.54	0.74	1.34	2.02	2.58	2.80

5.3.3. Escenario 3

Para el tercer escenario, se cambia el sistema de generación solar por un sistema que utiliza dos módulos flexibles de 520 W en paralelo, conservando el sistema de almacenamiento de baterías de litio LiFePO_4 . Tal como se observa en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Resumen desempeño de sistema escenario 3 (off-grid) calculado por SAM

Métrica	Valor
Energía AC al año 1	1.404 kWh
Factor de capacidad DC (año 1)	15,4%
Relación de desempeño	0.77
Eficiencia ciclo completo batería	96,31%
Energía desde sistema a BESS	100%
LCOE nominal	81 CLP/kWh

Como se refleja en la Tabla 5.14, el LCOE del escenario 3, es inferior a lo propuesto en el segundo escenario, con un monto de 81 CLP/kWh, lo que lo posiciona como una alternativa competitiva frente a la tarifa de la red eléctrica, que ronda los 220 CLP/kWh. En este caso, la generación solar aumenta, lo que permite una mejor distribución de costos de inversión la largo de una mayor cantidad de energía producida.

Tabla 5.14 Energía eléctrica generada para escenario 3

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
E_{AC} (kWh)	205.1	162.3	140.6	81.3	47.9	36.7	38.1	58.2	99.7	144.7	185.3	204.1
$E_{día_{prom}}$ (kWh/día)	4.34	3.72	2.84	1.79	1.04	0.83	0.85	1.28	2.24	3.11	4.11	4.36
$E_{día_{Iqq}}$	6.84	6.26	6.19	5.24	4.26	3.69	3.66	4.13	5.34	6.19	7.05	7.09
$E_{día_{Quellón}}$	4.85	4.05	2.53	1.69	0.99	0.71	0.80	1.07	2.02	2.99	3.79	4.18

Como se puede observar en la Tabla 5.14 para la zona centro sur del país existe un déficit de generación solar por lo que es necesario contar con el BESS para cubrir la demanda energética de la casa rodante utilizada en el presente estudio. A diferencia de lo dicho en el norte del país la generación solar cubre completamente la demanda energética incluso generando un excedente energético que permite la carga del sistema de almacenamiento.

Al permitir energía proveniente de la red, es decir, que el sistema actúe como híbrido, la energía anual baja por la inyección a la red, se vende el excedente. Mas, la carga de la batería ya no depende netamente del arreglo solar sino también, es cargada a través de la red. Los valores que se muestran en la Tabla 5.15 no discrepan en exceso con el escenario 3 off-grid, por lo que, para tener la posibilidad de auto sustentar el sistema, es preferible añadir un inversor híbrido.

Tabla 5.15 Energía eléctrica generada para escenario 3 (híbrido) calculado por SAM

Métrica	Valor
Energía AC al año 1	885 kWh
Factor de capacidad DC (año 1)	9.7%
Relación de desempeño	0.71
Eficiencia ciclo completo batería	91.47%
Energía desde sistema a BESS	64%
LCOE nominal	84 CLP/kWh

5.3.4. Escenario 4

El último escenario considera una configuración avanzada en la cual se maximiza el área de captación solar, integrando celdas fotovoltaicas en toda la superficie exterior del carro, desde una altura segura para las celdas PV.

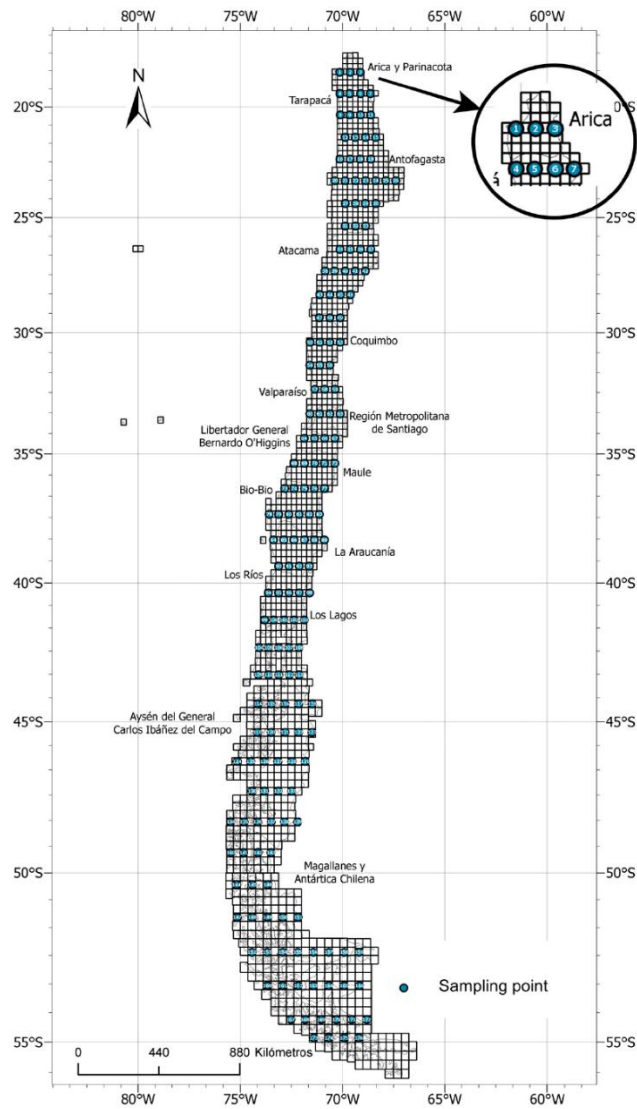
Se analiza cubrir la superficie del carro considerando el techo y los laterales. Para esto se estima una distancia mínima apropiada para que las celdas no se vean afectadas por desgaste físico o mecánico, es decir, se ubicaría la primera celda a 120 cm desde el suelo. Para el arreglo solar se tiene en consideración una celda de silicio monocristalina disponible en el mercado de 3 W y cuyas dimensiones son 125x125 mm (Sunpower C60). Al calcular la superficie útil de las tres caras disponibles y teniendo en consideración un “módulo” de 44 celdas se da cuenta de que solo es posible colocar seis módulos, obteniendo una potencia total de 870 W lo que refleja un peor escenario que en la sección 5.3.3.

Además, por limitaciones de software no es posible simular un arreglo solar que utilice módulos con ángulos de inclinación distintos, como sería el escenario 4 considerando tres caras del carro.

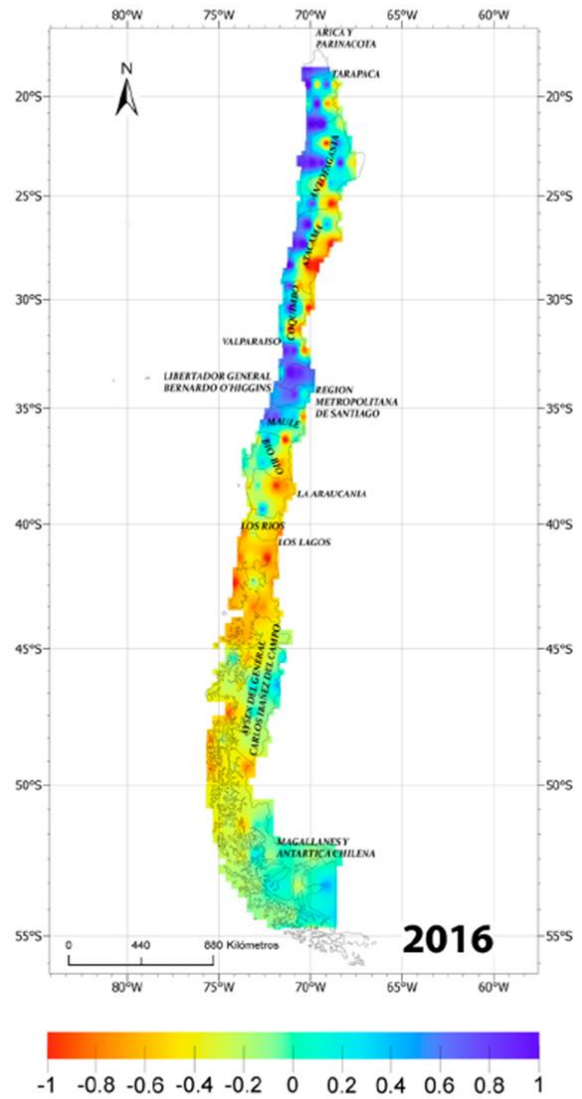
Según los resultados de las simulaciones, en sus distintos escenarios, se observa que existe un déficit en meses invernales, sobre todo entre mayo y agosto.

En este contexto, la incorporación de un generador eólico de pequeña escala como complemento al sistema híbrido móvil resulta una alternativa favorable para las condiciones climáticas del país. Como se ve en la Figura 5.7 (a), existe una correlación negativa entre los recursos solar y eólico, esto implica una complementariedad temporal entre ambos recursos. Así, en periodos de baja generación solar, existe una mayor cantidad de recurso eólico, lo que permite compensar parcialmente el déficit energético e incluso reducir el BESS.

Con el objetivo de analizar este comportamiento, el informe [32] representa los recursos energéticos disponibles en Chile, mediante una matriz discretizada en el dominio temporal, la matriz se muestra en la Figura 5.7 (b), esta discretización permite transformar el comportamiento continuo de los recursos energéticos en una estructura de datos analizable.



(a)



(b)

Figura 5.7 (a) Puntos seleccionados de mapa continental de Chile presentados en una grilla de 25 x 25
(b) Mapa de complementariedad temporal promedio diaria total para el coeficiente de correlación solar-eólica en Chile (2016) [32]

Capítulo 6. Desarrollo y validación del sistema fotovoltaico híbrido

La implementación del sistema PV móvil, orientada a una casa rodante con capacidad aproximada de 5 personas, se desarrolla considerando la configuración definida en el 5.3.1 Escenario 2, principalmente por disponibilidad de materiales. El sistema está diseñado para operar de manera autónoma (off-grid), permitiendo la carga de baterías a través de la conexión a la red eléctrica o un generador auxiliar.

6.1.1. Diseño planteado para planta piloto

El sistema del sistema se basa en la arquitectura previamente definida, incorporando los componentes principales: arreglo PV, controlador MPPT, BESS y sistema de protección eléctrica. Las conexiones fueron realizadas considerando los criterios establecidos en el reglamento RIC, asegurando un correcto funcionamiento y protección ante sobrecorrientes y fallas eléctricas. Se destaca el uso de conductores adecuados para sistemas fotovoltaicos y almacenamiento de energía, cumpliendo con lo establecido en el RIC N°04.

Para las conexiones en corriente continua, se utilizaron cables tipo RZ1-K (AS) ya que son libre de halógenos, presentan baja emisión de humos y alta resistencia al fuego, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieran mayor seguridad eléctrica. Por otra parte, para las conexiones de los módulos fotovoltaicos hacia el controlador MPPT se utilizan conductores tipo H1Z2Z2-K, diseñados específicamente para sistemas solares [53].

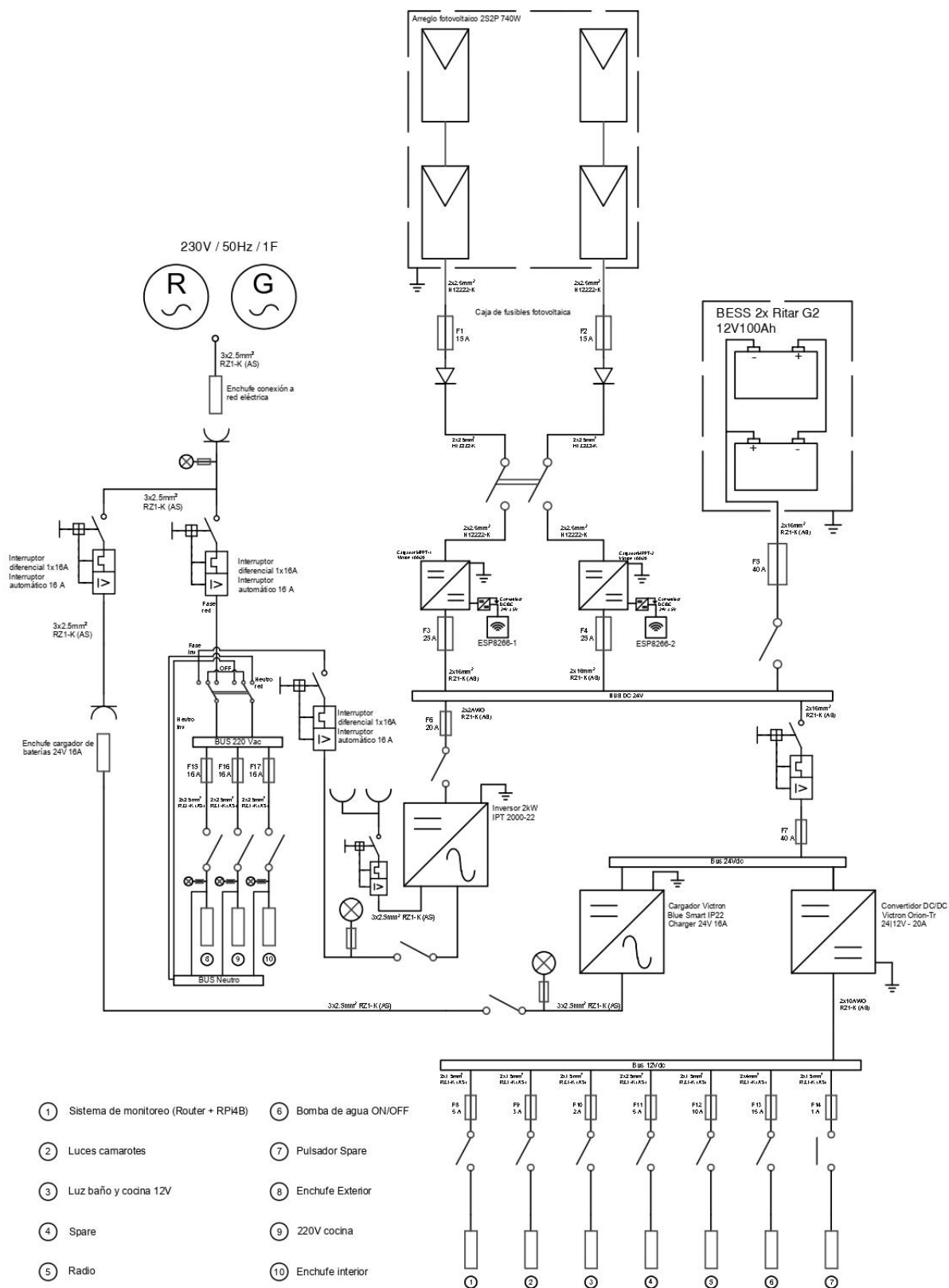


Figura 6.1 Diagrama con componentes comerciales seleccionados

En la Tabla 6.1 se enumeran los principales componentes del sistema fotovoltaico implementado en el carro de arrastre.

Tabla 6.1 Componentes implementados en sistema PV híbrido

Componente	Descripción
Panel fotovoltaico	Modelo JS185D de silicio monocristalino rígido dimensiones1580x808x35 mm arreglo solar 2S2P
Sistema de almacenamiento de baterías	Banco de baterías de ion-litio (Ritar G2) tecnología LiFePO ₄ compuesto por 2x12V100Ah en una configuración 2S1P
Inversor	Inversor off-grid IPT2000-22 con una potencia nominal de 2kW y dos salidas AC
Regulador MPPT	Controlador MPPT Victron SmartSolar 100/20 con voltaje máximo 100 Vdc y 20 A Se utiliza un MPPT para cada cadena
Cargador unidireccional AC/DC	Permite la carga del BESS a través de la red eléctrica

6.1.2. Cuadro interior de la casa rodante

Para el control manual de las cargas se conectan a distintos interruptores las cargas como se observa en la Figura 6.2



Figura 6.2 Interruptores rotulados al interior de la planta

6.2. Sistema de monitoreo y adquisición de datos

Para monitorear el sistema y evaluar el desempeño del sistema, se incorpora un sistema de monitoreo en tiempo real basado en microcontroladores, utilizando dispositivos ESP8266 del tipo D1 mini para adquirir y transmitir datos.

6.2.1. Arquitectura del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se compone de dos módulos principales basados en ESP8266, lo que permite una adquisición distribuida de las variables eléctricas. Esta configuración, que se muestra en la Figura 6.3, mejora la confiabilidad del sistema, flexibilidad y descentralización en comparación a soluciones propias de marcas específicas.

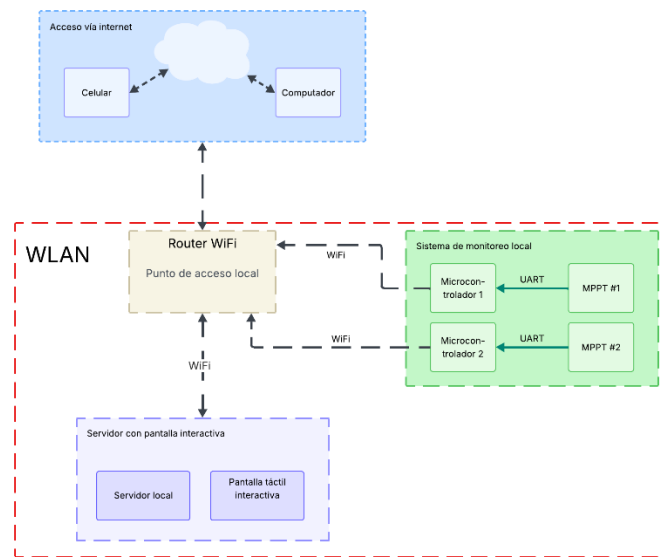


Figura 6.3 Sistema general de comunicación inalámbrica

Los datos adquiridos se envían a un servidor implementado en una Raspberry Pi 4B, utilizando la plataforma Home Assistant, la cual permite visualizar las variables enviadas por el ESP8266 en tiempo real.

6.2.2. Variables monitoreadas

Se definen como variables principales y fundamentales de monitoreo aquellas que permiten caracterizar el comportamiento energético del sistema, incluyendo: voltaje generador por el arreglo fotovoltaico, potencia generada, energía generada, tensión del sistema BESS, corriente de carga y descarga, estado de carga de la batería.

Al monitorear estas variables, se puede analizar el desempeño energético del sistema bajo distintas condiciones de operación.

6.2.3. Adquisición y transmisión de datos

La adquisición de datos se lleva a cabo de forma inalámbrica mediante comunicación WiFi, con un intervalo de actualización de 10 segundos, definido en código para evitar saturar la red y el sistema de procesamiento.

El sistema permite monitorear en tiempo real y generar un registro histórico de las variables, facilitando el análisis posterior de desempeño y comparación con resultados obtenidos en simulación.

Para el monitoreo del BESS, se propone utilizar un microcontrolador ESP32 como gateway, que permita actuar como puente entre el BMS con bluetooth integrado de la batería y el servidor, decodificando los datos enviados como SoC, voltaje por celda y corriente.

6.2.4. Diseño del circuito electrónico en KiCad

El desarrollo del sistema de monitoreo se desarrolló utilizando el software de diseño electrónico KiCad, permitiendo la creación del esquemático y el diseño de la placa de circuito impresa (PCB).

El esquemático considera los microcontroladores basados en el kit D1 Mini, alimentación para los módulos ESP8266 a través de USB C y conectores para la comunicación con el regulador Victron MPPT 100/20. Se observa en la Figura 6.4 el esquemático junto a los componentes enumerados.

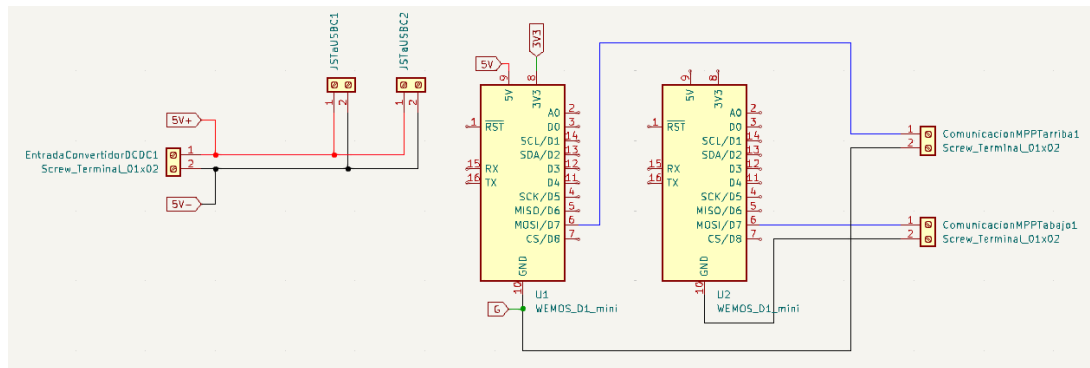


Figura 6.4 Esquemático de circuito de monitoreo

El diseño de la PCB, que se observa en la Figura 6.5, se realiza considerando criterios de electrónica de potencia, tales como el dimensionamiento del ancho de pista según corriente de operación, reducción de interferencias electromagnéticas y distribución compacta de los componentes.

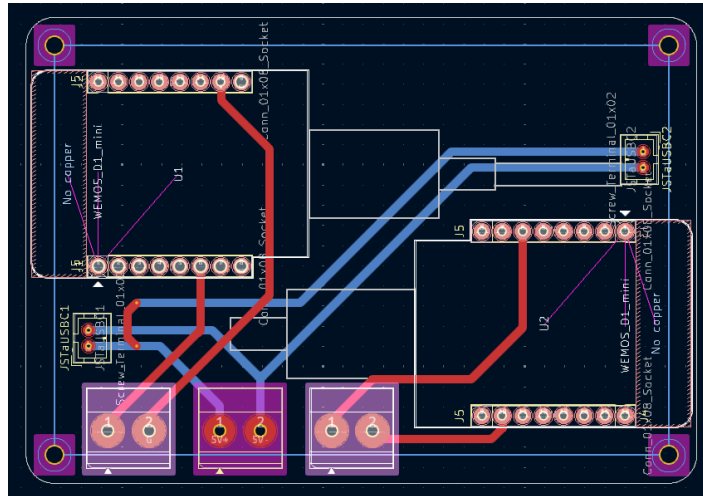


Figura 6.5 Distribución de componentes

Adicionalmente, el entorno de KiCad permite generar y exportar una representación tridimensional de la PCB (Figura 6.6), lo que facilita la verificación de interferencias físicas entre componentes y el diseño de una carcasa de protección para la placa mediante impresión 3D (Figura 6.7).

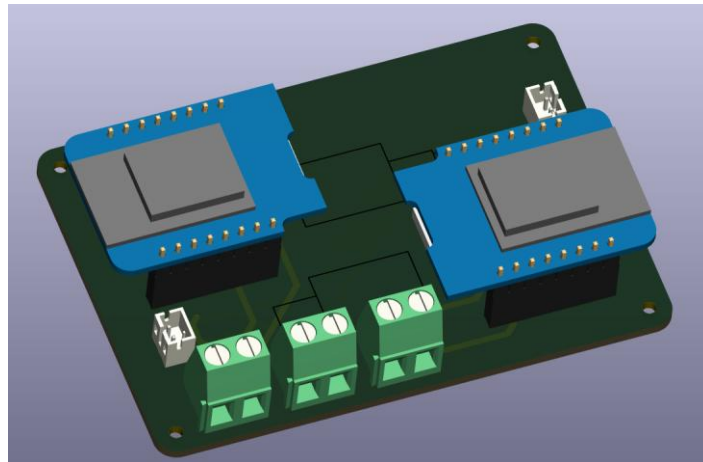


Figura 6.6 Modelo 3D del circuito

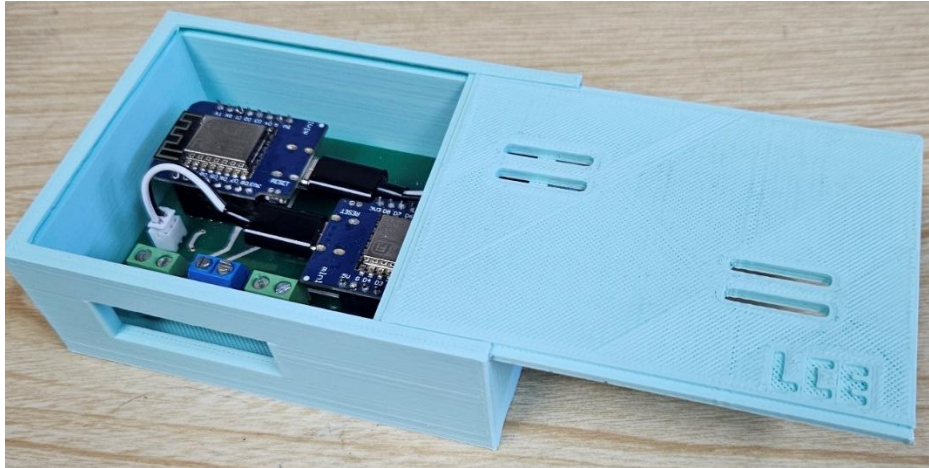


Figura 6.7 Placa de monitoreo con caja de protección impresa

6.2.5. Programación del microcontrolador

La programación del microcontrolador se realiza mediante ESPHome Builder, el cual permite crear el firmware mediante archivos de configuración YAML y tiene compatibilidad nativa con el servidor Home Assistant. El firmware desarrollado permite comunicación serial entre el microcontrolador y regulador MPPT, consultando periódicamente las variables monitoreadas.

En el código, presente en ANEXO A, se observa la implementación de “external_components”, una decisión que se fundamenta por el uso del protocolo VE.Direct. Dado que el protocolo utilizado por los reguladores Victron no se encuentra soportado de forma nativa, se utiliza el repositorio de GitHub [79] para decodificar las tramas de datos y transformarlas en variables legibles.

6.2.6. Comunicación serial

La comunicación se establece mediante el pin D7 del ESP8266, que corresponde al GPIO13, utilizado como receptor RX, asegurando la estabilidad en la recepción de datos y, a diferencia de otros pines, no interfiere con el arranque del microcontrolador. Como la comunicación para este caso es unidireccional, el ESP8266 solo se encarga de recibir datos, se deja el pin D8 (TX) libre, la conexión se realiza como se observa en la Figura 6.8. La velocidad de transmisión se configura en 19200 baudios, dado que es el estándar definido del protocolo VE.Direct. Si se utilizara otra velocidad, esto resultaría en una desincronización de los bits, invalidando cualquier intento de lectura.

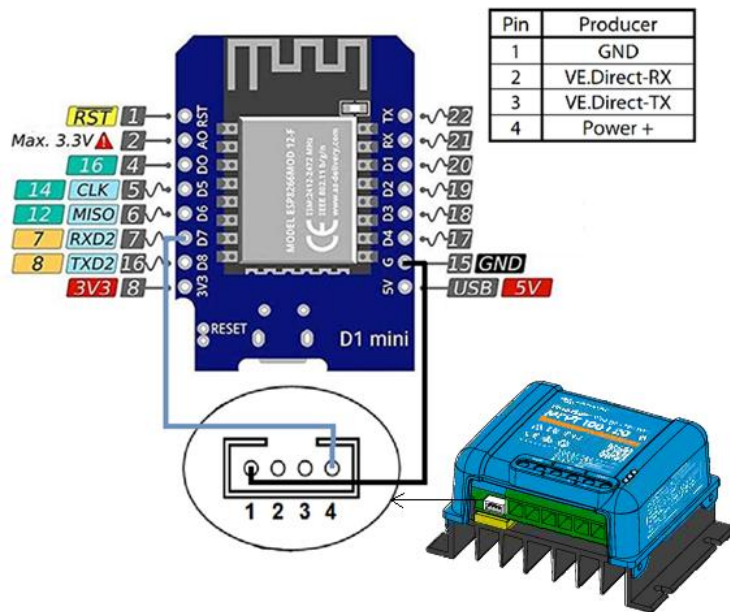


Figura 6.8 Conexión ESP D1 Mini a MPPT Victron 100/20

El procesador del microcontrolador utilizado opera a una frecuencia de 80 MHz, permitiendo ejecutar de manera simultánea tareas de comunicación, procesamiento y transmisión de datos. Además, se controla el tráfico de datos a través del comando “throttle” para reducir el uso de la CPU, tráfico en la red WiFi y carga sobre el sistema.

6.2.7. Plataforma de visualización

Para centralizar la visualización, se implementa una interfaz gráfica basada en el sistema operativo Home Assistant (HAOS), ejecutándose sobre una placa de desarrollo Raspberry Pi 4B que actúa como servidor y, simultáneamente, como pantalla táctil interactiva mediante un display de 10 pulgadas.

Según [80], existen dos opciones de instalación de HAOS utilizando una placa Raspberry Pi. La primera, consta en instalar directamente “Home Assistant Operating System” sobre la placa, lo que convierte la placa Raspberry Pi en un servidor dedicado, con soporte para add-ons y actualizaciones simplificadas, pero, sin un entorno de escritorio para usar la placa como interfaz local. La segunda opción es instalar HAOS como contenedor (HA Container) sobre un sistema operativo general como PiOS, lo que permite utilizar la placa como computador de escritorio con interfaz gráfica, pero limita funciones como la integración de add-ons.

	HA OS ¹	Container ¹
Automations	✓	✓
Dashboards	✓	✓
Integrations	✓	✓
Add-ons	✓	✗
Blueprints	✓	✓
One-click updates	✓	✗
Backups	✓	✓

Figura 6.9 Comparación entre HA OS y HA Container [80]

En esta memoria de título se opta por un enfoque intermedio, instalando PiOS con escritorio como sistema operativo, de modo que la placa pueda funcionar como interfaz interactiva, y luego emplear HAOS en un contenedor (Docker). Para lograr ello, se utiliza la herramienta “Raspberry Pi Imager”, se selecciona el modelo del dispositivo, sistema operativo PiOS Desktop y la unidad de almacenamiento, tal como se muestra en Figura 6.10. Una vez instalado el sistema operativo y configurada la conexión a la red, se procede a instalar Docker desde la consola y, posteriormente, se instala HAOS en un contenedor, siguiendo las instrucciones recomendadas por la documentación oficial [80]. De esta forma, la placa Raspberry Pi puede actuar como servidor de HA con acceso a add-ons y, simultáneamente, como interfaz local.

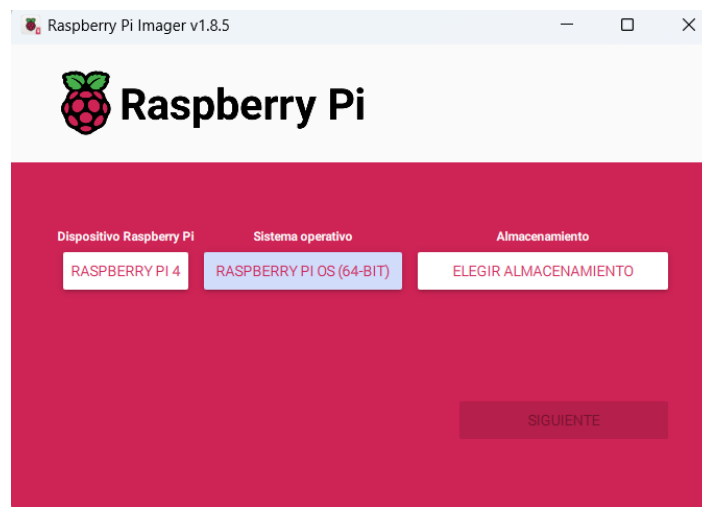


Figura 6.10 Selección de dispositivo, OS y almacenamiento en Raspberry Imager

El objetivo principal de la interfaz gráfica interactiva en esta etapa es el monitoreo centralizado en tiempo real de las variables eléctricas asociadas al sistema PV y BESS, así como el registro y análisis para su posterior comparación con las simulaciones del sistema.

6.2.8. Sistema y protocolo de comunicación inalámbrico

El sistema de monitoreo se basa en una arquitectura inalámbrica donde los microcontroladores

adquieren los datos desde el controlador MPPT mediante comunicación serial UART como se describe en la sección 6.2.6. Para enviar los datos recibidos, la comunicación se realiza mediante un router que actúa como nodo de la red local para la casa rodante, permitiendo la conexión entre los dispositivos y la Raspberry Pi 4B que ejecuta el servidor HAOS. Se fija una IP para el servidor dentro de la red local, a través de esta IP se puede acceder luego a la interfaz gráfica. Los datos recibidos se almacenan en la base de datos interna de HAOS, permitiendo visualizar y analizar los históricos.

Para adquirir acceso remoto, se utiliza el servicio Nabu Casa, el cual establece una conexión segura desde el servidor local hacia la nube, permitiendo el acceso al sistema sin necesidad de configurar puertos en el router.

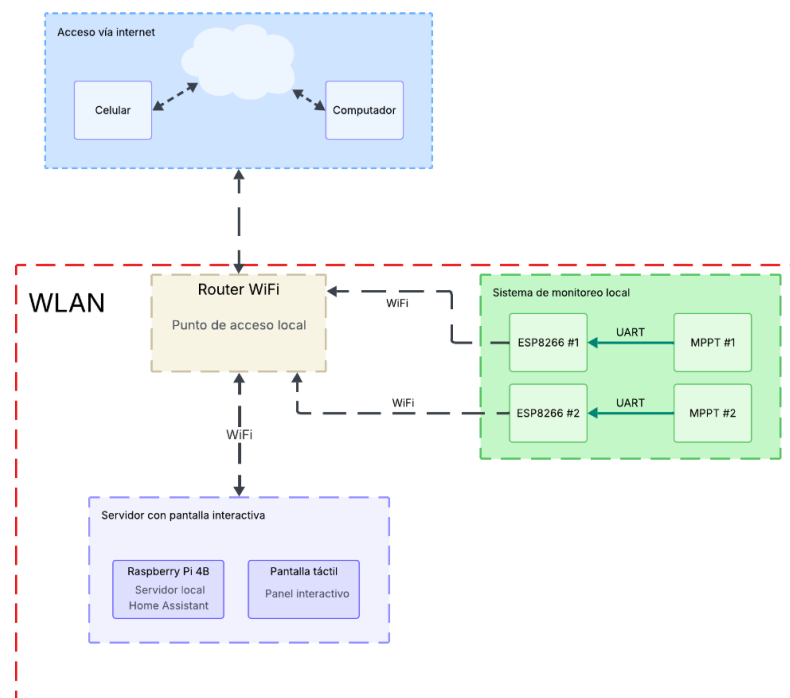


Figura 6.11 Sistema de intercomunicación inalámbrica e interfaz gráfica

6.2.9. Diseño de interfaz gráfica

La visualización de los datos se realiza mediante paneles de control configurados en HAOS, permitiendo una representación clara e intuitiva del estado del sistema. Se realiza el diseño de la interfaz, tal como se observa en la Figura 6.12, considerando variables críticas como voltaje, corriente y potencia del arreglo solar, corriente y voltaje del BESS, junto a el estado de carga de los controladores MPPT.

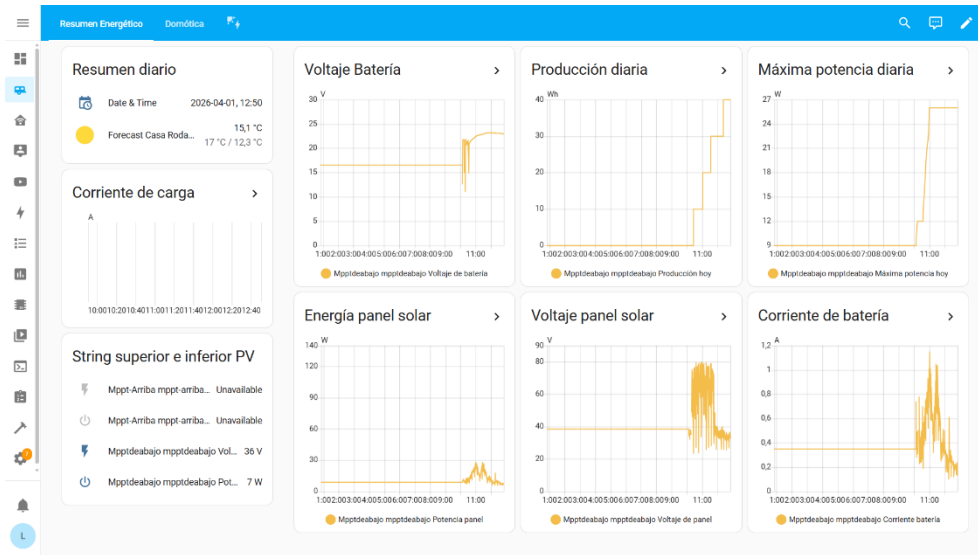


Figura 6.12 Interfaz gráfica con variables fundamentales en Home Assistant

6.3. Resultados de generación fotovoltaica

En esta sección se presentan los resultados asociados a la generación energética del sistema fotovoltaico, utilizando datos obtenidos durante el periodo de medición.

La Figura 6.13 despliega el nivel de potencia generado con un panel de 185 W las 24 horas en un día de sol.

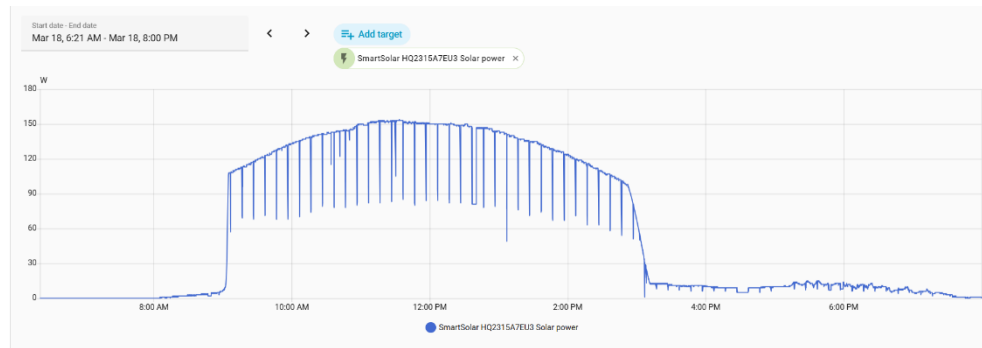


Figura 6.13 Generación solar módulo JS185D un día de sol

La Figura 6.14 muestra los valores de voltaje del BESS de 24V nominal viendo que, por las mañanas, hasta las 15:00 horas la batería logra mantener un equilibrio entre las cargas y proceso de carga de la batería. Luego, entre 15:00 y 18:00 horas, el sistema de almacenamiento recupera carga ya que la radiación solar es mayor en ese periodo, hasta la puesta de sol que, la batería empieza un periodo de descarga.

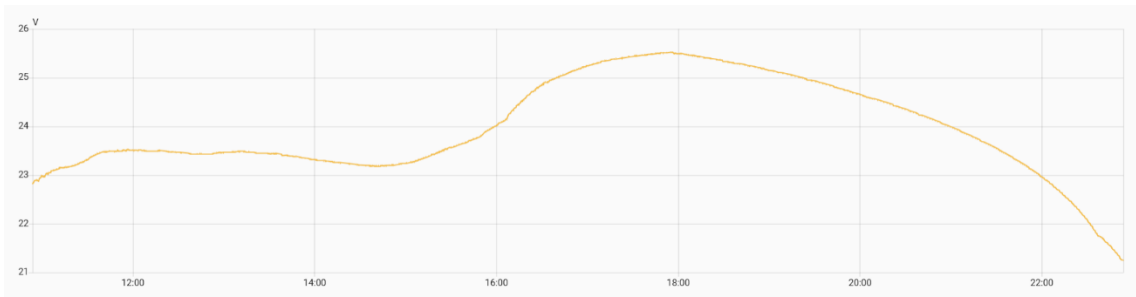


Figura 6.14 Voltaje de BESS durante un día

En la Figura 6.15, se muestra el comportamiento de la batería durante dos días, se observa que, durante la noche, entre 00:00 y 9:00 AM no hay datos o existe pérdida de datos ya que el sistema de monitoreo se alimenta desde los paneles, por lo que, el voltaje durante el periodo mencionado no es suficiente.



Figura 6.15 Comportamiento de tensión del BESS durante dos días

Capítulo 7. Discusión

7.1. Sumario

En esta memoria de título se desarrolló el diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico híbrido móvil orientado al suministro eléctrico de unidades móviles de servicio, considerando las condiciones meteorológicas en distintas regiones de Chile. El estudio contempló el levantamiento de demanda energética, selección y comparación de tecnologías de almacenamiento, dimensionamiento del sistema fotovoltaico y análisis de distintas configuraciones de operación.

Para ello, se utilizaron bases de datos meteorológicas y herramientas de simulación energética, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de operación. Luego, se efectuó el análisis técnico-económico considerando las restricciones de espacio, disponibilidad de materiales y tecnologías en el mercado chileno y requerimientos de autonomía energética.

Se desarrolló una plataforma de monitoreo y supervisión de datos basada en dispositivos de bajo costo, utilizando módulos ESP8266 y una Raspberry Pi 4B, logrando comunicación inalámbrica y visualización mediante Home Assistant.

7.2. Conclusiones

Se comprobó que un sistema PV híbrido móvil con BESS puede cubrir parcialmente la demanda energética anual de una unidad móvil destinada a una casa rodante para 5 personas, siempre que el dimensionamiento del sistema considere adecuadamente las condiciones de irradiancia, restricciones de espacio y perfil de carga asociado a la aplicación.

El análisis técnico-económico realizado permitió determinar la tecnología de almacenamiento LFP presenta un desempeño significativamente superior frente a baterías de plomo-ácido para aplicaciones móviles por su mayor profundidad de descarga, menor peso, mejor eficiencia energética y mayor vida útil. Esto se reflejó directamente en una reducción considerable del costo nivelado de energía (LCOE), validando su conveniencia técnica y económica para sistemas PV híbridos.

Los resultados evidencian que el desempeño energético del sistema presenta una alta dependencia de las condiciones climáticas y ubicación geográfica. Particularmente en escenarios de invierno en la zona centro-sur del país, la generación resulta insuficiente para garantizar la autonomía de operación total.

La implementación del sistema de monitoreo basado en ESP8266 y Raspberry Pi 4B permitió validar la factibilidad de utilizar herramientas de bajo costo para supervisar energéticamente el

sistema en tiempo real, facilitando la adquisición de datos relevantes para el análisis y seguridad del sistema híbrido móvil.

7.3. Trabajos futuros

Se propone implementar un sistema de gestión energética más robusto mediante el reemplazo del inversor off-grid y cargador unidireccional por un inversor híbrido bidireccional que permita mejorar el flujo energético entre generación fotovoltaica, almacenamiento de energía y red eléctrica.

Se propone evaluar e implementar configuraciones fotovoltaicas de mayor capacidad o tecnologías de mayor eficiencia, especialmente orientadas a mejorar la autonomía energética en la zona centro-sur de Chile en periodos de invierno.

Se recomienda integrar una fuente de generación eólica complementaria, con el objetivo de desarrollar una arquitectura híbrida más robusta y que tome ventaja de la complementariedad de recursos solar-eólica en el país.

Referencias

- [1] Coordinador Eléctrico Nacional, «Información respecto de la situación del Sistema Eléctrico Nacional,» 26 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.coordinador.cl/novedades/informacion-respecto-de-la-situacion-del-sistema-electrico-nacional/>.
- [2] L. Sun, J. Teh, W. Liu, C.-M. Lai y L.-R. Chen, «Impact of electric vehicles on power system reliability and related improvements: A review,» *Electric Power Systems Research*, vol. 247, 2025.
- [3] Ministerio de Energía, «Explorador Solar,» 2017. [En línea]. Available: <https://solar.minenergia.cl/fotovoltaico>. [Último acceso: 2025].
- [4] J. Ramanujam, D. M. Bishop, T. K. Todorov, O. Gunawan, J. Rath, R. N. E. Artegiani y A. Romeo, «Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review,» *Progress in Materials Science* 110, 2020.
- [5] W. Shockley y H. J. Queisser, «Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells,» *Journal of Applied Physics*, vol. 32, n° 3, 1960.
- [6] A. D. Vos, «Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 13, n° 1, pp. 839-846, 1980.
- [7] A. R. Zanatta, «The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells,» *Results in Optics*, vol. 9, p. 100320, 2022.
- [8] A. Karakilic, A. Karafil y N. Genc, «Effects of Temperature and Solar Irradiation on Performance of Monocrystalline, Polycrystalline and Thin-Film PV Panels,» *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, vol. 14, n° 51, pp. 254-260, 2022.
- [9] M. Green, A. Blakers, S. Narayanan y M. Taouk, «Improvements in silicon solar cell efficiency,» *Solar Cells*, vol. 17, n° 1, pp. 75-83, 1986.
- [10] M. Green, «The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 143, pp. 190-197, 2015.
- [11] M. S. Siddiqui, B. K. Pant, A. K. Saxena, Shivangi y S. Chandril, «An analysis of Passivated emitter and rear contact (PERC) cell and module,» de *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, 2019.
- [12] R. Kopecek y J. Libal, «Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges,» *Energies*, vol. 14, 2021.
- [13] E. Mouhib, L. Micheli, F. M. Almonacid y E. F. Fernández, «Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics,» *Energies*, vol. 15, n° 22, 2022.
- [14] S. Jouttijärvi, G. Lobaccaro, A. Kamppinen y K. Miettunen, «Benefits of bifacial solar cells combined with low voltage power grids at high latitudes,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, 2022.
- [15] C. S. Solanki y G. Beaucarne, «Advanced solar cell concepts,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 11, n° 3, pp. 17-23, 2007.
- [16] T. N. Silva, U. Arachchige, C. Kumaragamage y V. Perera, «Solar Energy Technologies: A Complete review of the Solar system technologies,» *Journal Of Research Technology & Engineering*, 2024.
- [17] C. Yang, W. Hu y J. e. a. Liu, «Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells,» *Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells.*, vol. 13, n° 227, 2024.

- [18] M. Afroz, R. K. Ratnesh, S. Srivastava y J. Singh, «Perovskite solar cells: Progress, challenges, and future avenues to clean energy,» *Solar Energy*, 2025.
- [19] C. Isabela, R. Lameirinhas, J. Torres y C. Fernandes, «Comparative study of the copper indium gallium selenide (CIGS) solar cell with other solar technologies,» *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 5, nº 8, pp. 2273-2283, 2021.
- [20] A. C. Hua y B. Z. Syue, «Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO₄ Battery,» *International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 1478-1483, 2010.
- [21] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello y E. d. Obaldía, «Baterías de ion litio: características y aplicaciones,» *Revista de I+D Tecnológico*, vol. vol. 17, nº no. 1, 2021.
- [22] S. Nyamathulla y C. Dhanamjayulu, «A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations,» *Journal of Energy Storage*, Vols. %1 de %2Volume 86, Part A, 2024.
- [23] J. A. Duffie y W. A. Beckman, «Solar Radiation,» de *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4 ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2013, pp. 3-42.
- [24] M. Despotovic y V. Nedic, Comparison of Optimum Tilt Angles of Solar Collectors Determined at Yearly, Seasonal and Monthly Levels, *Energy Conversion and Management*, vol 97, pp-121-131, 2015.
- [25] E. Urrejola, J. Antonanzas, P. Ayala, M. Salgado, G. Ramírez-Sagner, C. Cortés, A. Pino y R. Escobar, «Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile,» *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [26] R. Cordero R, A. Damiani, D. Laroze, S. MacDonell, J. Jorquera, E. Sepulveda, S. Feron, P. Llanillo, F. Labbe, F. Carrasco J., J. Ferrer y G. Torres, «Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert,» *Scientific Reports*, vol. 8, nº 1, p. 13943, 2018.
- [27] J. Teo, R. Tan, V. H. Mok, V. Ramachandaramurthy y C. Tan, «Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String,» *Energies*, vol. 11, nº 7, p. 1860, 2018.
- [28] A.-D. Olteanu y Ș. Gheorghe, «Exploring The Impact of Shading on The Efficiency of Photovoltaic Panels - Part I,» de *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2024.
- [29] A.-D. Olteanu y Ș. Gheorghe, «Exploring The Impact of Shading on The Efficiency of Photovoltaic Panels – Part II,» de *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2024.
- [30] R. Chairma Lakshmi K, R. Vijay Anandh, K. Rajalakshmi, S. Simon, G. Stepha y T. Gnanasekaran, «Impact of Shadow or Dust on Solar Photovoltaic Power Generation System,» de *2nd International Conference Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, 2023.
- [31] A. Molina, M. Falvey y R. Rondanelli, «A solar radiation database for Chile," *Scientific Reports*,» *Scientific Reports*, vol. 7, nº 1, p. 14465, 2017.
- [32] J. L. Muñoz-Pincheira, L. Salazar, F. Sanhueza y A. Lüer-Villagra, «Temporal Complementarity Analysis of Wind and Solar Power Potential for Distributed Hybrid Electric Generation in Chile,» *Energies*, vol. 17, nº 8, p. 1890, 2024.
- [33] N. H. A. Dulaimi, «Design of an Off-Grid Solar PV System for a Rural Shelter,» German Jordanian University, Amman, Jordan, 2018.
- [34] O. E. Olabode, T. O. Ajewole, I. K. Okakwu, A. S. Alayande y D. O. Akinyele, «Hybrid power systems for off-grid locations: A comprehensive review of design technologies, applications and future trends,» *Scientific African*, vol. 13, p. e00884, 2021.
- [35] M. S. Y. Ebaid, «Offgrid Portable Solar PV system for Emergency Conditions,» de *20th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2023.
- [36] S. Yan Qi y B. Poobalan, «The Design of Photovoltaic based Mobile Dental Healthcare System,» de

- 9th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2023.
- [37] VeraSol, «System Design Guidelines for Component-based Off-grid Solar Energy Systems,» de *World Bank Group*, 2024.
 - [38] M. Abed, B. Amarendra R., R. Jyothsna T y M. Nabil, «Optimal sizing and performance assessment of stand-alone PV systems using optimum hybrid sizing strategy,» *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103793, 2025.
 - [39] N. Kumar, M. Subathra y J. Moses, «On-grid solar photovoltaic system: components, design considerations, and case study,» de *4th International Conference Electrical Energy Systems*, India, 2018.
 - [40] A. Saymbetov, M. Nurgaliyev, N. Kuttynay, M. Adbullozoda, G. Dosymbetova y D. Tukymbekov, «Design of autonomous mobile PV system for remote regions,» de *16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania, 2021.
 - [41] M. U. Manoo, F. Shaikh, L. Kumar y S. I. Mustapa, «Comparative Investigation of On-Grid and Off-Grid Hybrid Energy System for a Remote Area in District Jamshoro of Sindh, Pakistan,» *Urban Science*, vol. 7, n° 2, p. 63, 2023.
 - [42] D. Turcotte, D. Ross M. M. y F. Sheriff, «Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: Status and Needs,» 2001.
 - [43] T. Gurupira y A. Rix, «PV Simulation Software Comparisons: PVSyst, NREL SAM and PVLlib,» 2017.
 - [44] M. K. a. N. Rajasekar, «Soiling and Shading Analysis of Hybrid PV System for Rural Application using PVsyst Software,» *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pp. 1-7, 2021.
 - [45] J. A. Duffie y W. A. Beckman, «Design Guidelines for Component-Based Off-Grid Solar Energy Systems,» *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, 2010.
 - [46] A. Yilmaz, A. Demirci y S. M. Tercan, «Technical Comparison of PWM and MPPT Charge Regulators,» *13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 78-83, 2021.
 - [47] T. Majaw, D. Reeny, S. R. y G. Bikramjit, «Solar Charge Controllers using MPPT and PWM: A Review,» *ADB U Journal on Electrical and Electronics Engineering (AJEEE)*, vol. 2, n° 1, 2018.
 - [48] A. U. Rehman y M. T. Iqbal, «Design and Control of an Off-Grid Solar System for a Rural House in Pakistan,» de *11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2020.
 - [49] J. C. Paguay, G. H. Brito, D. H. Rojas y J. C. Calva, «Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assistant platform,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, n° 7, pp. 829-838, 2023.
 - [50] M. Arun mozhi, D. Gunaseelan, N. K. M. y P. Prakash, «Wind and Solar Mobile Charging Station with IoT,» *2024 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, pp. 1-6, 2024.
 - [51] S. Sarkar, A. Nimbalkar, S. More, O. Kesarkar y A. Patil, «Design of Solar Panel Monitoring System Using ESP32 & IOT,» *2024 IEEE International Conference on Smart Power Control and Renewable Energy (ICSPCRE)*, pp. 1-6, 2024.
 - [52] N. Iksan, P. Purwanto y H. Sutanto, «Real-Time Monitoring of Photovoltaic Systems and Control of Electricity Supply for Smart Micro Grid-PV using IoT,» *TEM Journal*, vol. 13, n° 1, pp. 514-523, 2024.
 - [53] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo – RIC N° 04: Conductores, materiales y sistemas de canalización,» 2020.
 - [54] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo – RIC N° 09:

- Sistemas de autogeneración,» 2020.
- [55] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo – RIC N° 11: Instalaciones especiales,» 2020.
 - [56] Superintendencia de Electricidad y Combustible, «Pliego Técnico Normativo - RIC N°15: Infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos,» 2024.
 - [57] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Política Energética Nacional (PEN 2050) - Actualización marzo 2022,» Marzo 2022. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022.pdf.
 - [58] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Informe Definitivo - Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027,» 2025. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/informe_definitivo_pelp_2023-2027.pdf.
 - [59] Generadoras de Chile, «Boletín Mensual: Diciembre 2024,» 2025.
 - [60] L. Salazar, «Energía Solar a Eléctrica: Fundamentos y Aplicaciones,» Doctorado en Energías, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2025.
 - [61] M. Arslan y M. Çunkaş, «An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems,» *Journal of Engineering Research*, 2024.
 - [62] A. Correa-Guamán, A. Moreno-Salazar, D. Paccha-Soto y X. Jaramillo-Fierro, «Impact of Azimuth Angle on Photovoltaic Energy Production: Experimental Analysis in Loja, Ecuador,» *Energies*, vol. 18, no. 8, Art. 1998, 2025.
 - [63] Z. Ibrahim y M. Aljanabi, «Influence of Tilt Angle on PV Output for Solar Energy Optimization in Iraq,» *alud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*, vol. 3, p. 871, 2024.
 - [64] National Renewable Energy Laboratory, «Best Research-Cell Efficiency Chart,» Golden, CO, Julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>.
 - [65] A. Blakers, A. Wang, A. Milne, J. Zhao y M. Green, 22.8% Efficient Silicon Solar Cell, *Appl. Phys. Lett* 55, 1989.
 - [66] J. L. Bryan, «Inserting a Low-Refractive-Index Dielectric Rear Reflector into PERC Cells: Challenges and Opportunities,» NREL/CP-5K00-75157, 2019.
 - [67] R. Marques Lameirinhas, J. Torres y J. A. de Melo Cunha, «Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications,» *Energies* 2022, 15, 1823, 2022.
 - [68] N. S. D'Souza, X. Luo, C. Szczygiel y H. Krishnaswami, «Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithms Using Microchip's 16-bit Digital Signal Controllers,» 2013. [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001521a.pdf#:~:text=P%26O%20is%20one%20of%20the%20most%20discussed%20and,is%20done%20becomes%20important%20for%20some%20converter%20topologies..>
 - [69] S. Koohi-Fayegh y M. Rosen, «A review of energy storage types, applications and recent developments,» *Journal of Energy Storage*, vol. vol. 27, 2020.
 - [70] A. Tremblay, D. Zabinsky y H. Zhang, «Electric Plug Load Savings Potential of Commercial Foodservice Equipment,» Febrero 2014. [En línea]. Available: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-07/CEC-500-2021-040.pdf>.
 - [71] Efficiency for Access Coalition, CLASP, «Off-Grid Appliance Market Survey, Fourth Edition,» 2020. [En línea]. Available: <https://efficiencyforaccess.org/wp-content/uploads/CLASP-MarketSurvey-2020.pdf>.
 - [72] Enel Chile, «Consumo artefactos eléctricos en el hogar,» julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.enel.cl/es/clientes/tarifas-y-regulacion/consumo-artefactos-electricos.html>.
 - [73] Generator Fixer Company, «Generator Wattage Chart | How Much Power Do Your Appliances Use?,» 2025. [En línea]. Available: <https://generatorfixer.com/generator-wattage-chart/>.

- [74] NAMA Chile Energías Renovables para Autoconsumo, Ministerio de Energía, «Sistemas de Almacenamiento con Energía Solar Fotovoltaica en Chile,» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Santiago de Chile, 2020.
- [75] S. Molina, «Diseño de sistema fotovoltaico para vehículo de servicios móviles,» 2024.
- [76] Ministerio de Energía, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, «Reporte: Recurso solar y datos meteorológicos - Iquique,» 2025.
- [77] Ministerio de Energía, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, «Reporte: Recurso solar y datos meteorológicos - UdeC,» 2025.
- [78] Ministerio de Energía, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, «Reporte: Recurso solar y datos meteorológicos - Hito 0,» 2025.
- [79] KinDR007, «VictronMPPT-ESPHome,» [En línea]. Available: <https://github.com/KinDR007/VictronMPPT-ESPHOME/tree/main>.
- [80] Home Assistant, «Installation,» [En línea]. Available: <https://www.home-assistant.io/installation/>.
- [81] Home Assistant, «Understanding Home Energy Management,» [En línea]. Available: <https://www.home-assistant.io/docs/energy/>.
- [82] Home Assistant, «Automating Home Assistant,» [En línea]. Available: <https://www.home-assistant.io/docs/automation/>.
- [83] Victron Energy, «Victron Remote Management (VRM) - Remote monitoring,» [En línea]. Available: <https://www.victronenergy.com/panel-systems-remote-monitoring/vrm>.
- [84] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo – RIC N° 05: Medidas de protección contra tensiones peligrosas y descargas eléctricas».
- [85] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo – RIC N° 06: Puesta a tierra y enlace equipotencial».
- [86] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo - RIC N°01: Empalmes».
- [87] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo - RIC N°16: Subsistemas de distribución».
- [88] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo - RIC N°17: Operación y mantenimiento».
- [89] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Pliego Técnico Normativo - RIC N°19: Puesta en servicio».
- [90] M. Green, E. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao y J. Yiang, «Solar Cell Efficiency Tables (Version 66),» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. vol. 33, n° no. 7, pp. pp. 795-810, 2025.
- [91] J. Zhong, W. Zhang, L. Xie, O. Zhao, X. Wu, X. Zeng y J. Guo, «Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, 2023.
- [92] S. Costa, L. Kazmerski y A. Diniz, «Impact of soiling on Si and CdTe PV modules: Case study in different Brazil climate zones,» *Energy Conversion and Management: X*, vol. 10, 2021.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera	: Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista	: Maximiliano Esteban Caamaño Iturria
Título de la memoria	: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS PARA
SERVICIOS MÓVILES	
Fecha de la presentación oral	: Día/mes/año
Profesor(es) guía	: Lautaro David Salazar Silva
Profesor(es) revisor(es)	: Nombres
Concepto	: Aprobado/Bueno/Muy bueno/Sobresaliente
Calificación	: Nota

Resumen (máximo 200 palabras)

La memoria de título presenta el diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos híbridos con almacenamiento energético, orientado a aplicaciones móviles como casas rodantes y unidades de servicio. La motivación surge de la dependencia de combustibles fósiles en unidades móviles y la fragilidad del sistema eléctrico chileno, evidenciada en el apagón masivo de febrero de 2025.

Se analizó el recurso solar a lo largo de Chile, evidenciando una correlación entre recursos solar y eólico, especialmente en la zona centro-sur del país. Se diseñaron dos plantas híbridas, validadas mediante el software SAM, evaluando cuatro escenarios con distintas tecnologías de paneles y almacenamiento.

Los resultados muestran que reemplazar baterías de plomo-ácido por LiFePO_4 reduce el LCOE de 338 a 139 CLP/kWh. El escenario con paneles flexibles de 520 W baja el LCOE a 81 CLP/kWh, siendo una opción competitiva frente a la tarifa de la red (220 CLP/kWh).

Se implementó un sistema de monitoreo IoT con microcontroladores ESP8266 integrados a Home Assistant mediante protocolo de comunicación serial, permitiendo la visualización en tiempo real.

Se identificó como trabajo a futuro la integración física del inversor híbrido y generación eólica complementaria para cubrir el déficit energético invernal en el sur del país.

ANEXO A. CONFIGURACIÓN DE SISTEMA DE MONITOREO ESP8266 Y HAOS

7.4. Configuración de la Raspberry Pi 4B con Home Assistant

Para instalar HAOS sobre el sistema operativo Raspberry Pi OS se siguen los pasos que se muestran a continuación:

- i. Descargar Raspberry Pi OS desde Raspberry Imager
- ii. Grabar la imagen en una microSD
- iii. Insertar la SD y encender la Raspberry Pi
- iv. Configurar usuario, red Ethernet o Wifi

Para instalar HAOS, se instala un Docker dentro de PiOS siguiendo los comandos:

```
sudo apt update && sudo apt upgrade -y  
sudo apt install docker.io -y  
sudo systemctl enable Docker
```

Al ejecutar Home Assistant:

```
docker run -d \  
--name homeassistant \  
--restart=unless-stopped \  
-v /home/pi/homeassistant:/config \  
--network=host \  
ghcr.io/home-assistant/home-assistant:stable
```

Luego, para acceder desde el navegador, se inserta en enlace:

http://IP_RASPBERRY:8123

En la configuración inicial, se debe crear el usuario y definir la ubicación.

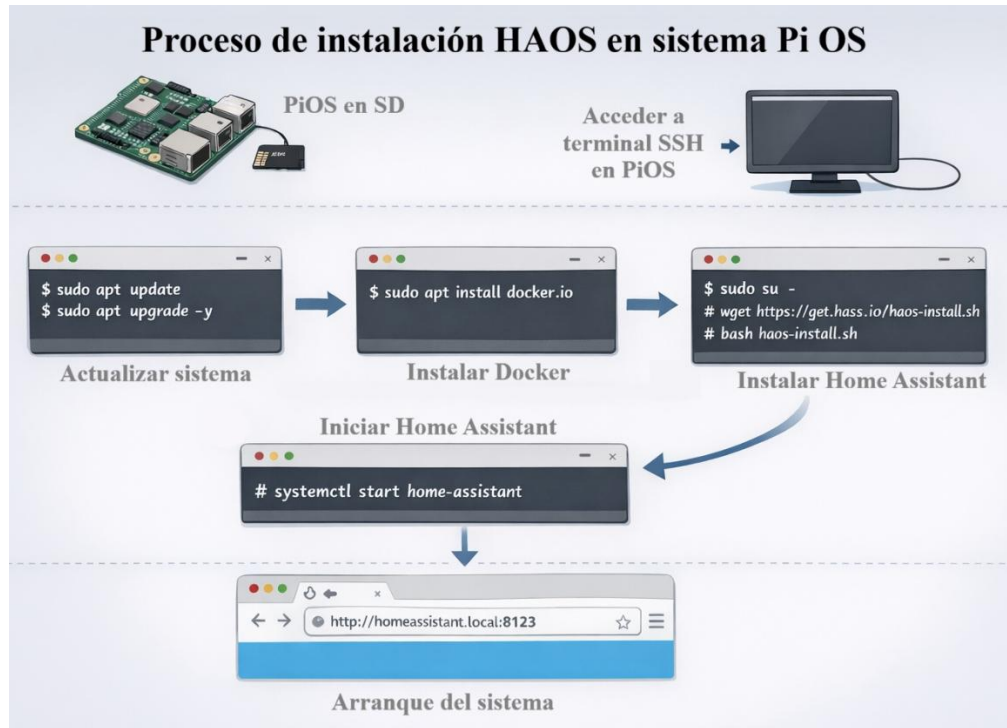


Figura 0.1 Proceso de instalación HAOS en Raspberry Pi con PiOS

7.5. Configuración ESP8266

El primer paso para la configuración de los microcontroladores es instalar ESPHome en Home Assistant, para aquello, se debe acceder a la configuración, en el apartado “Add-ons”, buscar “ESPHome” e instalar.

En la interfaz de ESPHome, se crea un nuevo dispositivo, configurando el nombre y tipo de microcontrolador. Luego, se programa o escribe el código de configuración YAML. El siguiente paso es cargar el firmware al microcontrolador ESP8266 conectando a través de USB.

7.5.1. Código de monitoreo ESP8266

substitutions:

```
external_components_source: github://KinDR007/VictronMPPT-ESPHOME@main
lower_devicename: "MPPT String 1"
devicename: "SmartSolar_100_20"
wifi_fast_connect: "false"
```

esphome:

```
name: "${lower_devicename}"
```


esp8266:

board: d1_mini

external_components:

- source: \${external_components_source}
refresh: 0s

wifi:

ssid: !secret wifi_ssid
password: !secret wifi_password
power_save_mode: none
fast_connect: \$wifi_fast_connect

En caso de falla de Wifi, habilita fallback hotspot

ap:

ssid: "\${devicename} Hotspot"
password: !secret wifi_password

captive_portal:

ota:

platform: esphome

logger:

baud_rate: 0
esp8266_store_log_strings_in_flash: false

api:

web_server:

port: 80

time:

- platform: sntp

id: uart_bus

tx_pin: D8 # No conectado

rx_pin: D7 # Conectado a MPPT

baud_rate: 19200

stop_bits: 1

data_bits: 8

parity: NONE

rx_buffer_size: 256

victron:

id: victron0

uart_id: uart_bus

throttle: 10s

sensor:

- platform: victron

victron_id: victron0

panel_voltage:

name: "Voltaje de Panel"

id: pv

battery_voltage:

name: "Voltaje de batería"

id: bv

battery_current:

name: "Corriente de batería"

id: bc

load_current:

name: "Corriente de carga (MPPT)"

id: corriente_carga_mppt

max_power_yesterday:
 name: "Máxima potencia ayer"
 id: max_potencia_ayer
 max_power_today:
 name: "Potencia máxima hoy"
 id: max_potencia_hoy
 accuracy_decimals: \${accuracy}
 yield_total:
 name: "Producción Total"
 id: produccion_total
 filters:
 #De W a kW
 - multiply: 0.001
 unit_of_measurement: kWh
 accuracy_decimals: \${accuracy}
 yield_yesterday:
 name: "Producción ayer"
 id: produccion_ayer
 filters:
 #De W a kW
 - multiply: 0.001
 unit_of_measurement: kWh
 accuracy_decimals: \${accuracy}
 yield_today:
 name: "Producción hoy"
 id: produccion_hoy
 filters:
 #De W a kW
 - multiply: 0.001
 unit_of_measurement: kWh
 accuracy_decimals: \${accuracy}
 panel_power:

```

    name: "Potencia panel"
    id: potencia_panel
day_number:
    name: "Día consecutivo"
    id: dia_consec
    icon: "mdi:calendar-today"
charging_mode_id:
    name: "Modo de carga"
error_code:
    name: "Código de error"
tracking_mode_id:
    name: "Modo de tracker"

text_sensor:
- platform: victron
  victron_id: victron0
  charging_mode:
    name: "Modo de carga"
  error:
    name: "Error"
  tracking_mode:
    name: "Modo de Tracking"
  firmware_version:
    name: "Versión del firmware"
  device_type:
    name: "Device Type"

switch:
- platform: restart
  icon: mdi:reload-alert
  name: "${devicename} Restart"

```

El último paso es la conexión física entre el microcontrolador y regulador Victron, para luego integrar a Home Assistant los dispositivos. Esto, se realiza en Configuraciones, Dispositivos y servicios donde aparecerá el dispositivo con el nombre dado en ESPHome. Para verificar la conexión de los dispositivos ESP8266 D1 mini a la plataforma Home Assistant se verifica el estado en ESPHome Builder como se aprecia en la Figura 0.2.

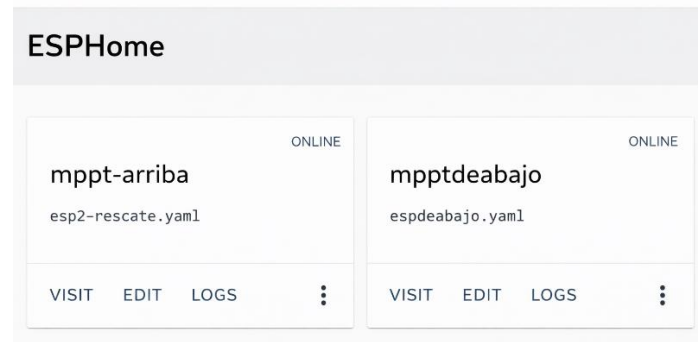


Figura 0.2 Pantallazo a interfaz con microcontroladores conectados (online)

Para mejorar el sistema de monitoreo, se puede implementar una fuente de alimentación extra para que la confiabilidad de los datos sea mayor, gracias a la redundancia en la alimentación. La configuración quedaría tal como se observa en la Figura 0.3.

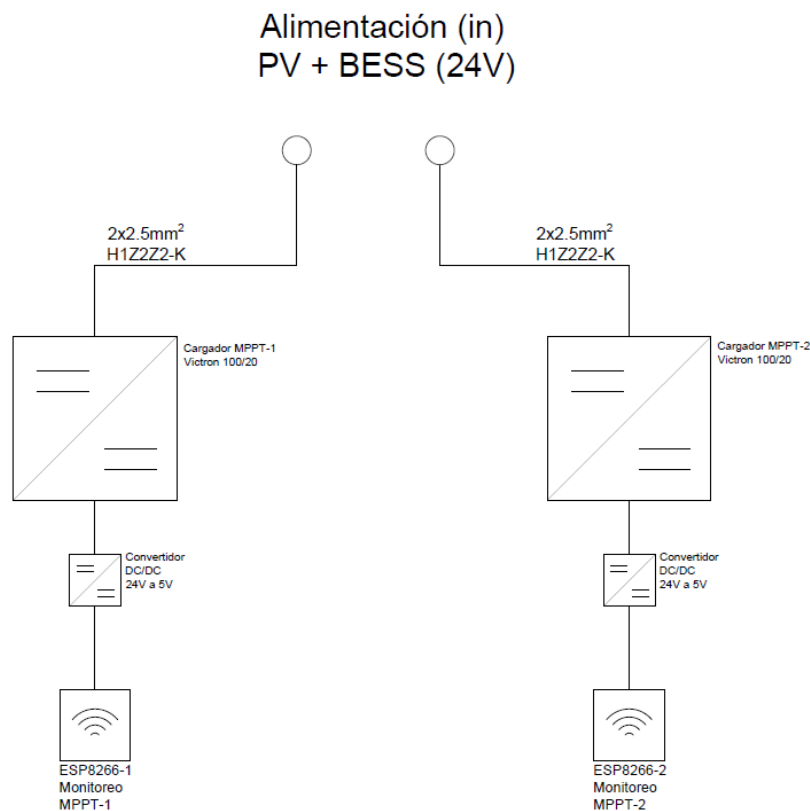


Figura 0.3 Diagrama de conexión para sistema de monitoreo con doble fuente de alimentación

ANEXO B. Parámetros para software SAM

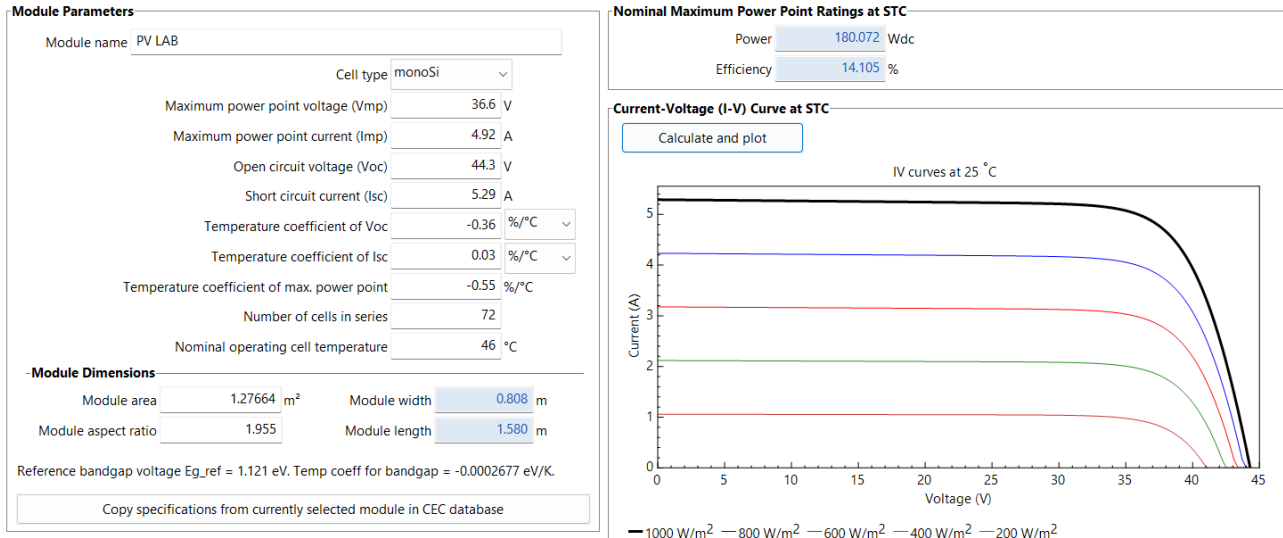


Figura 0.4 Especificaciones PV JS185D montado según datasheet en software SAM

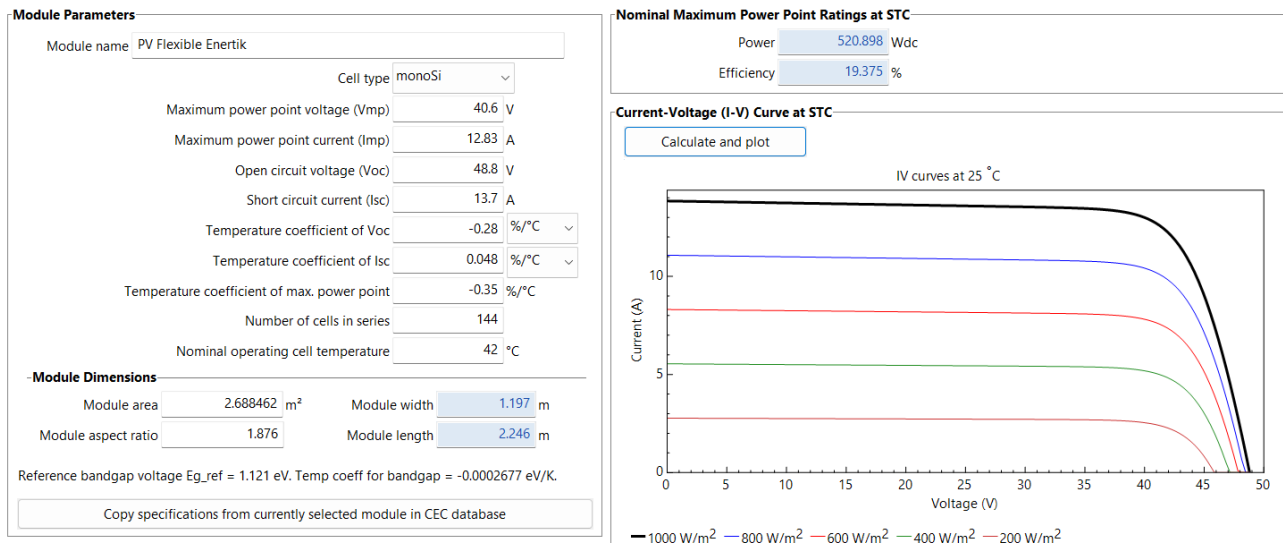
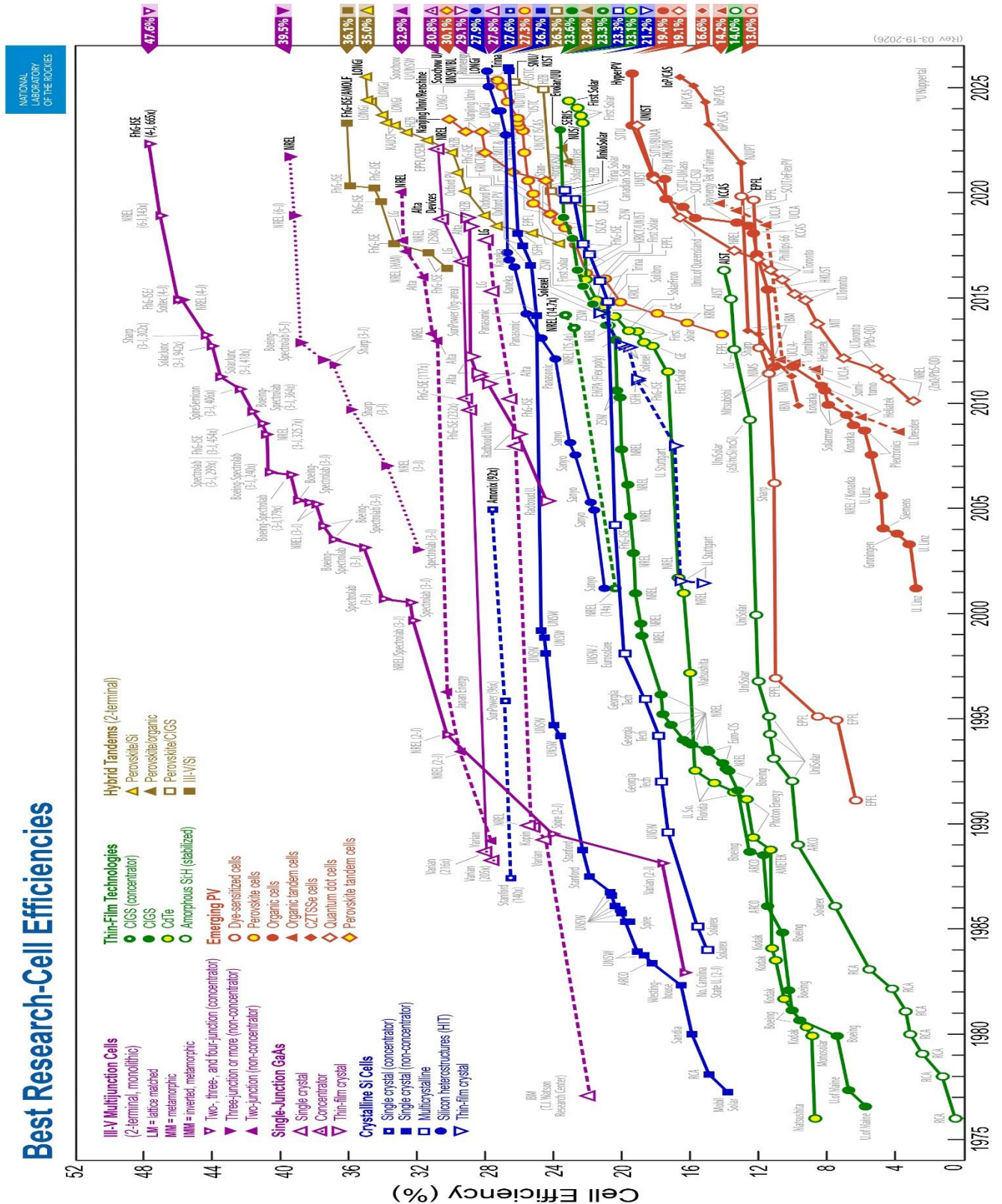
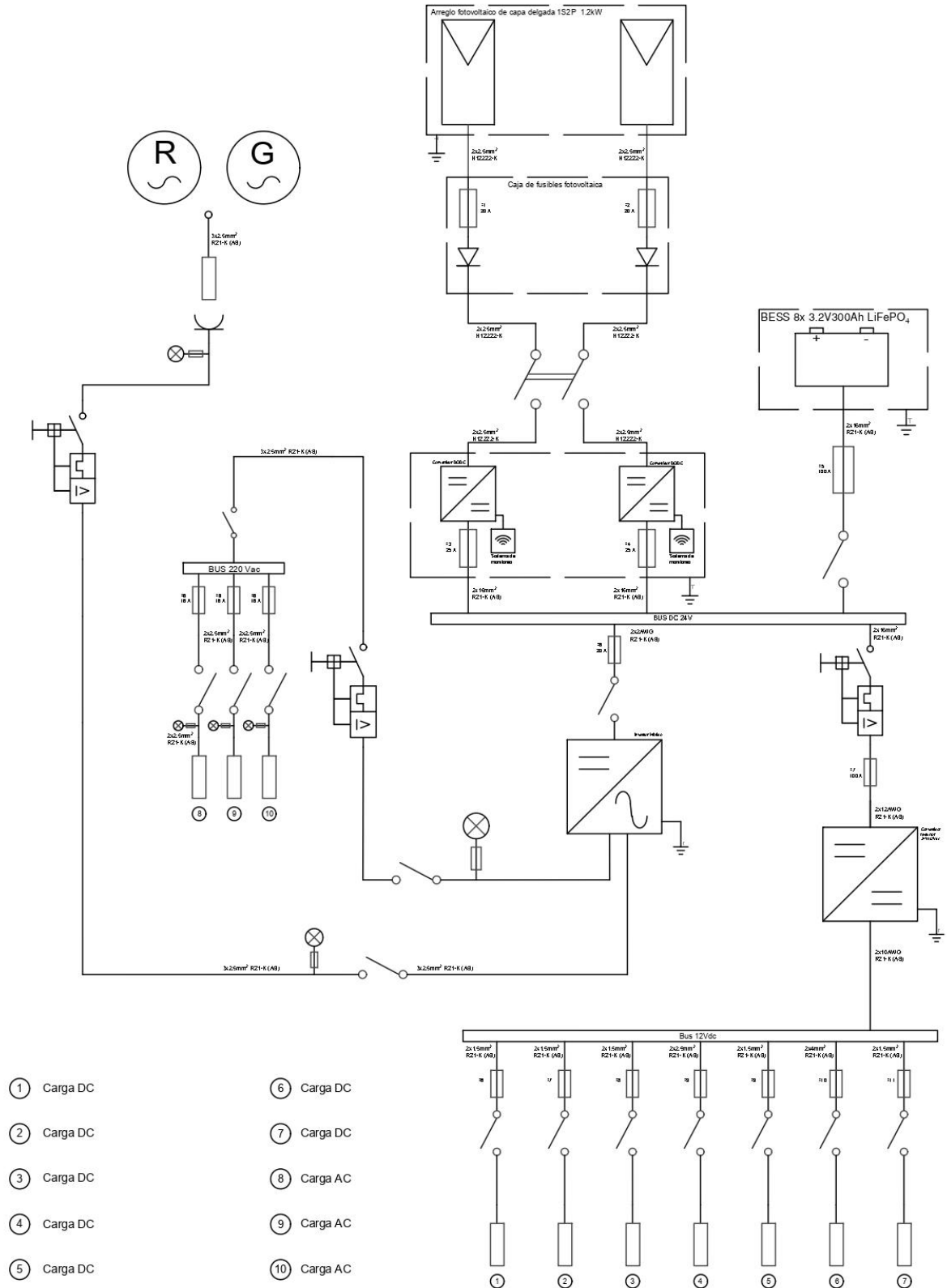


Figura 0.5 Especificaciones panel flexible 520 W en SAM

ANEXO C. Eficiencia de celdas en investigación por NREL



ANEXO D. Diagrama unilineal según escenario simulado 3



ANEXO E. Hojas de datos

CURTISS
TECHNOLOGIES

CT12 440

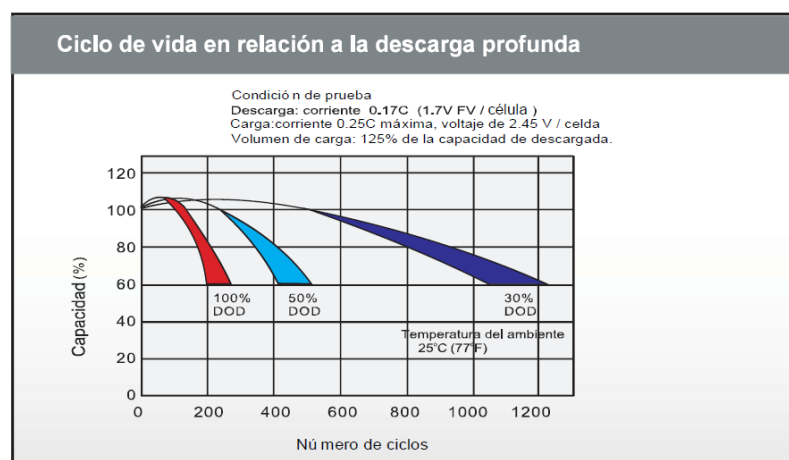
12V 45AH

Especificaciones técnicas

Referencia:	CT 12 440
Largo:	197 ± 2 mm (7.76 inches)
Ancho:	165 ± 2 mm (6.50 inches)
Alto:	170 ± 2 mm (6.69 inches)
Alto total (con terminal):	170 ± 2 mm (6.69 inches)
Peso aproximado:	Approx14.2 kg (31.3 lbs)

Especificaciones

	Voltaje Nominal	12V
	Capacidad Nominal (20HR)	45AH
Tipo de terminal	Terminal estandar	BOLT & NUT TYPE
	Terminal opcional	
Material contenido	Opción estandar	ABS
	Opción retardante de llama	ABS (UL94:VO available)
Capacidad nominal	46.8 AH/2.34A	(20hr,1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	45.0AH/4.50A	(10hr,1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	39.75 AH/7.95A	(5hr,1.70V/cell, 25°C / 77°F)
	36.0 AH/12.0A	(3hr,1.70V/cell, 25°C / 77°F)
	27.5AH/27.5A	(1hr,1.60V/cell, 25°C / 77°F)
Máxima corriente de descarga	540 A (5s)	
Resistencia interna	Approx 9.0mΩ	
Características de descarga	Rango de temperatura de funcionamiento	Descarga: -15 ~ 50°C (5 ~ 122°F) Carga: 0 ~ 40°C (32 ~ 104°F) Almacenaje: -15 ~ 40°C (5 ~ 104°F)
	Rango nominal de temperatura de funcionamiento	25 ± 3°C (77 ± 5°F)
	Rango nominal de temperatura de funcionamiento	Carga corriente inicial menos de 13.5A Voltaje 14.4V ~15.0V at 25°C (77°F) Temp
	Uso standby	No límite en la corriente inicial de carga corriente 13.5V ~13.8V at 25°C (77°F) Temp
	Capacidad afectada por la temperatura	40°C (104°F) 103% 25°C (77°F) 100% 0°C (32°F) 86%
Diseño de vida de flotación 20°C	4 ~ 6 años	
Autodescarga	Las baterías Curtiss pueden almacenarse hasta 6 meses a 25°C (77°F), entonces una recarga será necesaria. Para temperaturas más altas el intervalo de tiempo para realizar esta recarga será menor.	





嘉JS盛



JS SOLAR

5" mono
72 cells
JS 185W-205W

ELECTRIC CHARACTERISTICS (STC*)

TYPE	JS	185D	190D	195D	200D	205D
Norminal Power(Pmax)	[W]	185	190	195	200	205
Voltage at Pmax(Vmp)	[V]	37.00	37.10	37.30	37.51	37.7
Current at Pmax(Imp)	[A]	5.00	5.12	5.23	5.34	5.45
Open Circuit Voltage(Voc)	[V]	44.50	44.60	44.70	44.80	44.90
Short Circuit Current(Isc)	[A]	5.39	5.50	5.60	5.70	5.80
Power Tolerance	[%]	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3
Maximum System Voltage	IEC EN:1000V / UL: 600V / UL:1000V					
Module Efficiency	[%]	14.50%	14.80%	15.28%	15.69%	16.01%

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

TYPE	JS185W-205W
NOCT*	45±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.45%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Maximum Series Fuse Rating	15A
Operatating Temperature	-40 to 85°C
Storage Temperature	-40 to 60°C

OPTIONS AVAILABLE

Transparent	Frameless
-------------	-----------

SPECIFICATIONS

Dimension A*B*C (mm)	1580*808*35
Weight(kg)	16.5
Glass Type and Thickness	3.2mm/ 4.0mm, tempered glass / AR coating glass
Cable Length (mm)	900
Type of Connector	MC4 or compatible connectors



Product Characteristics

- Optimized composite materials, 70% lighter at the same power
- Used advanced organic polymer encapsulation materials, bending radius reach 0.30m, fit all kinds of curved surface perfectly
- Through quickly bonding installation, requires no penetration, eliminates the use of mounting hardware

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC

Maximum Power (P_{max})	520W	525W	530W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	48.8V	49.0V	49.2V
Short Circuit Current (I_{sc})	13.70A	13.74A	13.78A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	40.6V	40.8V	41.0V
Current at Maximum Power (I_{mp})	12.83A	12.88A	12.93A
Module Efficiency (%)	19.34	19.52	19.71
Operating Temperature	-40°C to +85°C		
Maximum System Voltage	1000V DC/1500V DC		
Fire Resistance Rating	Type 1(in accordance with UL1703)/Class C(IEC61730)		
Maximum Series Fuse Rating	25A		

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5; Tolerance of P_{max}: ±3%; Measurement Tolerance: ±3%

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Monocrystalline PERC 182*91mm
Number of cells	144(12x12)
Module dimensions	2246x1197x2mm
Weight	8.0kg
Front cover	Lightweight high transparent polymer materials
Junction box	IP68, 3 diodes
Cable	4mm ² , Portrait: 300mm; Customized Length
Connector	MC4 compatible

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	42°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.35%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.28%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.048%/°C

PACKAGING

Standard packaging	66pcs/pallet
Module quantity per 20' container	264pcs
Module quantity per 40' container	1122pcs (HQ)

12.8V100Ah



NEW GENERATION RV BATTERY



SPECIFICATION

Model	LFP12.8V100AH G1	LFP12.8V100AH G2	LFP12.8V100AH G3
Cell and Connection	3.2V104Ah, 1P4S	3.2V104Ah, 1P4S	3.2V104Ah, 1P4S
Nominal Voltage [V]	12.8	12.8	12.8
Nominal Capacity [Ah]	100	100	100
Total Energy [Wh]	1280	1280	1280
Max. Charging Current [A]	100	100	100
Recommended Charging Current [A]	50	50	50
Charging Voltage [V]	14.2~14.6	14.2~14.6	14.2~14.6
Max. Discharging Current [A]	100	100	100
End of Discharge Voltage [V]	11.2	11.2	11.2
Operating Temperature Range	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C With Heater: Charge/Discharge -20~+55°C	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C With Heater: Charge/Discharge -20~+55°C
Protection	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit
Cycle Life ¹	>3500 cycles	>3500 cycles	>3500 cycles
Designed Calendar Life	10 Years	10 Years	10 Years
Communication Port	/	/	RS485; CAN
LED Indicator and Button	/	SOC, ALM, RUN, ON/OFF	SOC, ALM, RUN, ON/OFF
Dimension (W*D*H, mm)	330*172*214	330*172*214	330*172*214
Weight [Kg]	10.5	10.5	10.5
Operation Humidity	0~95% RH (No condensing)	0~95% RH (No condensing)	0~95% RH (No condensing)
IP Class	IP65	IP65	IP30
Parallel Support ²	Yes, Max, 4Sets	Yes, Max, 4Sets	Yes, Max, 4Sets
Series Support	Yes, Max. 4 Sets	Yes, Max. 4 Sets	Yes, Max. 4 Sets
Certification-Cell	UN38.3; ROHS; IEC62619; UL1973; UL9540A		
Certification-Battery	UN38.3; MSDS; CE;		
Optional Parts	Internal Bluetooth Module	Internal Bluetooth Module Heater	Internal Bluetooth Module Heater External Bluetooth Module External Display Module RS485-USB Device

Overview

IPower series is a kind of pure sine wave inverter which can convert 12/24/48VDC to 220/230VAC(or 110/120VAC). Industrial design, compared with the civil design, has a wider operating temperature, easy installation and operation. The wide input voltage range is ideal for solar system application. The inverter can be applied in many fields, such as household emergency lighting system, vehicle mounted system and small field power supply etc.



Features

- Safe design with input and output electrical isolation
- Adoption of advanced SPWM technology, pure sine wave output
- Optional output voltage 220/230VAC(or 110/120VAC), choosing by DIP switch
- LED indicators for fault status and working status
- Lower No-load consumption
- Max. efficiency up to 95%(IP2000-22, IP2000-42)①
- Input protection: Over voltage protection, low voltage protection
- Output protection: Over load protection, short circuit protection
- Over temperature protection: Temperature-controlled Fan Ventilation; Inverter turns off automatically when overheating
- Operational USB output 5VDC/1A
- Operational RS485 communication port②

①The efficiency is tested at rated input voltage,220V output with resistive load, 25℃ Ambient temperature,1500W and higher version

②1000W and higher version support RS485 communication port optional.

Overview

The EPEVER WiFi 2.4G RJ45 D WiFi adapter is mainly used for real-time transmission of various power generation data from EPEVER controllers, inverters, hybrid inverter chargers, etc. to the EPEVER cloud server. It supports wireless monitoring and parameter setting of on-site devices via cloud servers, mobile apps, or large screens.



Parameter	Model	EPEVER WiFi 2.4G RJ45 D
Working voltage		5V± 0.5V(Powered by RS485 com. port)
Power consumption		Peak emission: 150mA; Idle: 310uA
Enclosure		IP30
Communication method		RS485
Communication parameters		115200Bps, 8N1
Interface standard		EPEVER communication standard V1-1.0
Work frequency		2.4 ~ 2.4835GHz
Work temperature range		-40°C~ 85°C
Dimension		63mm x 19mm x 10mm
Net weight		7.7g

Item	IP350-12	IP350-22	IP500-12	IP500-22	IP1000-12	IP1000-22	IP1500-12	IP1500-22	IP2000-22	IP2000-42
Rated Input Voltage	12VDC	24VDC	12VDC	24VDC	12VDC	24VDC	12VDC	24VDC	24VDC	48VDC
Input Voltage Range	10.8~16VDC	21.6~32VDC	10.8~16VDC	21.6~32VDC	10.8~16VDC	21.6~32VDC	10.8~16VDC	21.6~32VDC	21.6~32VDC	43.2~60VDC
Input surge voltage	<32VDC	<44VDC	<32VDC	<44VDC	<20VDC	<40VDC	<20VDC	<40VDC	<40VDC	<80VDC
Output Voltage	220VAC(±5%) 230VAC(-7%~+5%)		220VAC(±5%) 230VAC(-10%~+5%)		220VAC/230VAC(±5%)	220VAC/230VAC(±5%)	220VAC(±5%) 230VAC(-7%~+5%)		220VAC(±5%) 230VAC(-10%~+5%)	
Output Frequency			50/60±0.1Hz					50/60±0.1Hz		
Output Continuous Power	280W	280W	400W	400W	800W	800W	1200W	1200W	1600W	1600W
Output Power 15 min.	350W	350W	500W	500W	1000W	1000W	1500W	1500W	2000W	2000W
Surge power	750W	750W	1000W	1000W	1600W	1600W	2400W	2400W	3200W	3200W
Power factor					0.2-1(V/A lower than output continuous power)					
Output Wave					Pure sine wave					
Distortion THD					THD≤3%					
Max. Efficiency	91%	92%	92%	92%	94.50%	94.50%	93%	94%	95%	95%
No-load current	<0.7A	<0.5A	<0.9A	<0.5A	<0.8A	<0.5A	<1.0A	<0.6A	<0.6A	<0.4A
USB Output Port			5VDC/Max. 1A				5VDC/Max. 1A			
RS485 Com. Port			/				5VDC/200mA			
Binding post		Φ6mm					Φ10mm			
Overall dimension	214×105.5×57.7		232.2×132×74.5		296.3×231.5×98.5	284.7×231.5×98.5	326.12×231.5×98.5	326.1×231.5×98.5	326.1×231.5×98.5	326.1×231.5×98.5
Mounting dimension	185.5×76.7mm	185.5×76.7mm	205×102mm	205×102mm	183×220mm	163×219.5mm	208×220mm	208×219.5mm	208×219.5mm	208×219.5mm
Mounting hole size	Φ4.2mm	Φ4.2mm	Φ5.2mm	Φ5.2mm	Φ5.5mm	Φ5.5mm	Φ5.5mm	Φ5.5mm	Φ5.5mm	Φ5.5mm
Net weight	1.0kg	1.0kg	1.7kg	1.7kg	3.9kg	3.6kg	4.6kg	3.9kg	4.6kg	4.6kg



Figura 0.6 Montaje tablero de control