

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Luis C. García Santander

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Evaluación e implementación de un sistema de
gestión de energía que permita mejorar la
continuidad del suministro para un centro
educacional, considerando presencia de sistema de
almacenamiento

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante
Dr. Luis C. García Santander

Evaluación e implementación de un sistema de gestión de energía que permita mejorar la continuidad del suministro para un centro educacional, considerando presencia de sistema de almacenamiento

Sebastián Alonso Torres Ortiz

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Enero 2025

Resumen

En este trabajo se diseñó y evaluó un sistema de gestión de energía basado en generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías BESS (del inglés *Battery Energy Storage System*) con el fin de mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un centro educacional. La solución propuesta busca reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y aumentar la autonomía energética del establecimiento, garantizando un suministro estable y continuo.

El diseño del sistema se llevó a cabo mediante el dimensionamiento de los paneles solares y las baterías, considerando las necesidades energéticas del centro educacional. Además, se utilizó el software System Advisor Model (SAM) para simular el comportamiento del sistema en diversos escenarios de demanda y generación, priorizando la capacidad de mantener el suministro de cargas críticas en caso de interrupciones en la red.

Los resultados obtenidos demostraron que la integración de paneles fotovoltaicos con sistemas BESS mejora significativamente la resiliencia del centro educativo ante eventuales fallas eléctricas. Este sistema garantiza un suministro eléctrico ininterrumpido y autónomo, lo que contribuye a una mayor continuidad en las actividades del establecimiento educacional, especialmente en situaciones de emergencia.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más profundos agradecimientos a quienes formaron parte de este largo y extenuante camino. A mi padre Sergio y mi madre Lidia, quienes, con su esfuerzo y dedicación, me han inculcado valores, enseñanzas y herramientas fundamentales que han sido clave en mi formación personal y académica, así como por la confianza que siempre han depositado en mí.

A mis hermanos, Felipe y Sergio, quienes me han acompañado en esta etapa, brindándome su apoyo y confianza constante, lo que ha sido fundamental para alcanzar este logro.

A mi familia, por ser un pilar fundamental en mi vida, brindándome su apoyo y cariño de tantas maneras. A cada uno de ellos, gracias por estar presentes y contribuir de alguna forma en mi camino. En especial, agradezco a mis tíos, Maricel y Carlos, por su cercanía, por estar siempre ahí para mí y por su constante apoyo que ha sido invaluable en este proceso.

A mi pareja Catalina, a quien agradezco todo su amor, confianza y cariño incondicional, que ha estado conmigo desde el principio de mi vida universitaria, entregándome bellos momentos y siendo un pilar fundamental en esta etapa.

A la familia de mi pareja, de la cual he pasado a ser parte, entregándome todo su cariño, amor y apoyo desde el principio, el cual agradeceré siempre.

A mis abuelos, Teresa y Hernán, quienes, a pesar de ya no estar, sus enseñanzas y valores siguen perdurando para siempre. A mi abuela María, que siempre me ha entregado su cariño y afecto. Los que, en conjunto, han sido siempre una motivación para seguir adelante en todo momento.

A mi grupo de amigos, por su respaldo y amistad incondicional, llenando esta etapa de buenos recuerdos y experiencias inolvidables.

Agradezco al profesor Luis García por su constante disposición para atender mis consultas, sus valiosas orientaciones y aportes que enriquecieron esta investigación, así como por brindarme la oportunidad de realizar esta memoria de título bajo su tutela, confiando en mis capacidades.

Agradezco a la profesora Andrea Martínez, cuya disposición y compromiso fueron esenciales para avanzar en esta investigación e integrarme plenamente en el proyecto. Su apoyo constante y retroalimentaciones constructivas aportaron claridad y dirección en el desarrollo de este trabajo.

Esta memoria de título fue apoyada por ANID mediante el FONDECYT Iniciación N°11240683: Classroom Retrofit: *“Evaluating the potential of transitioning existing schools towards healthy and high-performance environments as an urgent response to a changing climate”*.

Índice

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
ABREVIACIONES	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. TRABAJOS PREVIOS	2
1.3.1 <i>Sistemas de Gestión de Energía</i>	3
1.3.2 <i>Sistemas Fotovoltaicos</i>	4
1.3.3 <i>Sistemas de Almacenamiento</i>	5
1.3.4 <i>Discusión</i>	6
1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO	7
1.5. OBJETIVOS	7
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	7
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	7
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	7
1.7. TEMARIO Y METODOLOGÍA	8
2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	9
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	9
2.2. TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS	10
2.3. CONFIGURACIONES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	11
2.4. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	13
2.4.1 <i>Estimación del Consumo Energético</i>	14
2.4.2 <i>Determinación de la Irradiancia Solar</i>	14
2.4.3 <i>Cálculo del Número de Paneles Fotovoltaicos</i>	15
2.4.4 <i>Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento</i>	15
2.4.5 <i>Selección del Inversor y Regulador de Carga</i>	16
2.4.6 <i>Consideraciones de instalación: Área Disponible y Orientación</i>	16
2.5. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	19
2.6. SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT).....	19
2.7. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN CENTROS EDUCACIONALES	19
2.7.1 <i>Casos de Estudio</i>	20
3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	21
3.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	21
3.2. TIPOS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	22
3.3. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS).....	23
3.3.1 <i>Funcionamiento Básico de las Baterías en BESS</i>	23
3.3.2 <i>Estado de Carga (SoC) y Profundidad de Descarga (DoD)</i>	24
3.3.3 <i>Tipos de Baterías utilizadas en BESS</i>	25
3.3.4 <i>Ventajas, Desventajas y aplicaciones de los BESS</i>	26
3.4. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	27
3.5. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	28
3.5.1 <i>Beneficios de la Integración de BESS con Sistemas Fotovoltaicos</i>	29
3.5.2 <i>Dimensionamiento y Configuración de los BESS</i>	29
3.6. CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIONES EN CENTROS EDUCACIONALES.....	31
3.6.1 <i>Casos de Estudio</i>	31
3.7. DESAFÍOS Y TENDENCIAS FUTURAS EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	32
4. ESCUELA COLONIA ÁRABE.....	33
4.1. INTRODUCCIÓN	33
4.2. CONTEXTO Y CARACTERÍSTICAS DE LA ESCUELA COLONIA ÁRABE	34

4.3.	ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO	37
4.3.1	Consumo Energético General de la Escuela	37
4.3.2	Consumo Energético de la Sala de Clases Piloto	39
4.3.3	Identificación de Cargas Prioritarias.....	41
4.4.	DATOS CLIMÁTICOS Y ORIENTACIÓN	44
4.5.	PLAN REGULADOR DE LA ZONA.....	45
5.	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA.....	47
5.1.	COMPONENTES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA	47
5.2.	METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO	48
5.2.1	Criterios de Diseño.....	48
5.2.2	Procedimiento de Cálculo	49
5.2.3	Criterios para la Selección de Componentes.....	50
5.3.	DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	51
5.3.1	Cálculo de la Energía Necesaria.....	51
5.3.2	Selección de la Tecnología del Panel Fotovoltaico	51
5.3.3	Cálculo de la Cantidad de Paneles Necesarios	55
5.3.4	Verificación del Área Disponible	55
5.3.5	Paneles Solares con o sin Seguimiento.....	55
5.4.	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO (BESS)	56
5.4.1	Cálculo de la Capacidad del Sistema de Almacenamiento.....	57
5.4.2	Selección de las Baterías.	57
5.4.3	Conexión y Configuración del Sistema.....	60
5.5.	DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR Y REGULADOR DE CARGA	60
5.5.1	Cálculo de la Capacidad de Potencia Requerida por el Inversor	60
5.5.2	Cálculo de la Corriente del Regulador de Carga	61
5.5.3	Justificación del uso de un Inversor con Regulador MPPT	62
5.5.4	Selección del Inversor – Regulador de Carga	62
6.	SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
6.1.	INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	65
6.2.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	66
6.2.1	Escenarios Híbridos	66
6.3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES.....	67
6.3.1	Escenario Promedio	67
6.3.2	Escenario Crítico.....	71
6.3.3	Análisis Comparativo de Escenarios	76
6.3.4	Nueva Configuración Recomendada	77
6.4.	PLATAFORMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA	79
6.4.1	Diseño Conceptual de la Plataforma.....	79
6.4.2	Preparación e Integración de los Datos	80
6.4.3	Interpretación de los Datos Visualizados	81
6.4.4	Limitaciones y Carga de Datos Reales.....	81
6.4.5	Presentación y Disponibilidad de la Plataforma.....	82
7.	ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL	85
7.1.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	85
7.1.1	Costos Iniciales.....	86
7.1.2	Costos de Operación y Mantenimiento.....	87
7.1.3	Flujo de Caja e Ingresos Proyectados.....	88
7.2.	ANÁLISIS AMBIENTAL	91
7.2.1	Emisiones Evitadas.....	91
7.2.2	Impacto Ambiental de los Componentes Principales.....	92
7.2.3	Comparativa y Contribución Ambiental	93
7.2.4	Beneficios Sociales Indirectos	93
8.	CONCLUSIONES	95

8.1.	SUMARIO GENERAL	95
8.2.	CONCLUSIONES	95
8.3.	TRABAJO FUTURO	96
REFERENCIAS		97
ANEXO A. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y DE ALMACENAMIENTO		103
A.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES	103
A.2	DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	104
A.2.1	<i>Cálculo del Número de Paneles Fotovoltaicos</i>	104
A.3	FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	105
A.3.1	<i>Intensidad de la Radiación Solar</i>	105
A.3.2	<i>Temperatura de los Paneles</i>	106
A.3.3	<i>Suciedad y Sombra (Soiling)</i>	107
A.3.4	<i>Degradación de los Módulos</i>	107
A.3.5	<i>Resistencias Parásitas</i>	108
A.3.6	<i>Factor de llenado (Fill Factor)</i>	108
A.4	ALGORITMOS MPPT.....	109
A.5	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	111
A.6	CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE PANELES NECESARIOS	111
A.7	VERIFICACIÓN DEL ÁREA DISPONIBLE DEL TECHO	111
A.8	CÁLCULO DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	113
A.9	CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BESS EN SISTEMAS PV	114
ANEXO B. GRÁFICOS CONFIGURACIÓN 4 PANELES		115
ANEXO C. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL		117

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Tipos de celdas fotovoltaicas y sus características principales. Adaptado de [6][14][15].	11
Tabla 2.2 Configuraciones de Sistemas Fotovoltaicos. Adaptado de [16][17]	12
Tabla 3.1 Comparativa de los principales Sistemas de Almacenamiento de Energía [31][33]	23
Tabla 3.2 Comparativa general de tipos de baterías para BESS [31][32][35]	25
Tabla 3.3 Comparación de Tipos de Baterías para BESS [31][35]	26
Tabla 3.4 Comparación de Tecnologías de Baterías para BESS [31][32][35]	28
Tabla 4.1 Cargas - Equipos Eléctricos - Sala 4. Fuente: Elaboración propia con datos de [44].	39
Tabla 5.1 Sistema de Puntuación para la Evaluación de Paneles Fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 5.2 Características técnicas y económicas de los paneles analizados. Adaptado de [47].	54
Tabla 5.3 Puntaje de los paneles fotovoltaicos en base a los criterios de selección. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 5.4 Características técnicas de las baterías. Fuente: Elaboración propia adaptado de [47].	58
Tabla 5.5 Sistema de puntuación para elección de baterías. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 5.6 Puntajes obtenidos de cada batería. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 5.7 Componentes del Sistema de Gestión de Energía. Fuente: Elaboración propia.	64
Tabla 6.1 Indicadores claves del sistema. Elaboración propia basado en resultados de [50]	76
Tabla 7.1 Costos iniciales de cada configuración. Adaptado de [47][53][54][55]	86
Tabla 7.2 Indicadores económicos para cada configuración. Fuente: Elaboración propia	90
Tabla A.1 Algoritmos de MPPT [6]	110

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Proyección PMGD (Potencial) en el SEN, período 2020-2040 [13]	10
Fig. 2.2 Capacidad instalada Net Billing en sector habitacional, período 2020-2040 [13]	10
Fig. 2.3 Configuración sistema PV tipo On-Grid [18]	12
Fig. 2.4 Configuración sistema PV tipo Off-Grid [19]	13
Fig. 2.5 Configuración sistema PV híbrido [20]	13
Fig. 2.6 Inclinação y orientación (ángulo azimuth) de un panel solar [25]	18
Fig. 3.1 Esquema de un Sistema de Almacenamiento [9]	22
Fig. 3.2 Esquema sistema BESS con múltiples celdas [31]	24
Fig. 3.3 Servicios auxiliares proveídos por BESS [34]	27
Fig. 4.1 Planta Escuela Colonia Árabe. Fuente: DAEM Los Ángeles	35
Fig. 4.2 Vista interior de sala 4 pabellón norte. Fuente: PhD. Andrea Martínez Arias.	36
Fig. 4.3 Consumo Energético General (2018-2023) Fuente: Elaboración propia	37
Fig. 4.4 Curva de demanda diaria invierno y verano. Fuente: Elaboración propia	40
Fig. 4.5 Curvas de demanda cargas críticas. Fuente: Elaboración propia	42
Fig. 4.6 Consumo energético mensual cargas críticas - sala 4. Fuente: Elaboración propia.	43
Fig. 4.7 Radiación solar y temperatura en Los Ángeles, Chile. Fuente: Elaboración propia, basado en datos de [22].	44
Fig. 4.8 Condiciones de edificación zona ZH-4 [45]	46
Fig. 5.1 Características técnicas inversor y cargador de baterías Growatt 5000 [W] 48 [Vcc]. [47]. 63	
Fig. 6.1 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].	68
Fig. 6.2 Estado de carga de las baterías (SoC %) – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]	69
Fig. 6.3 Flujo de energía desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]	70
Fig. 6.4 Energía transferida hacia y desde la red eléctrica (kW) – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]	71
Fig. 6.5 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].	72
Fig. 6.6 Estado de carga de las baterías (SoC %) – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]	73
Fig. 6.7 Flujo energético desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]	74
Fig. 6.8 Flujo energético entre el sistema y la red eléctrica – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].	75
Fig. 6.9 Diagrama Plataforma de Gestión Energética. Fuente: Elaboración propia	80
Fig. 6.10 Panel 1 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia	82
Fig. 6.11 Panel 2 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia	83
Fig. 6.12 Panel 3 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia	83
Fig. A.1 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica conectado a carga genérica [6]	104
Fig. A.2 Curva característica I-V de celda solar [27].	104
Fig. A.3 Curva I-V característica para diferentes valores de radiación solar [27]	105
Fig. A.4 Curva I-V característica a diferentes temperaturas de operación [27]	107
Fig. A.5 Eficiencia de una celda solar en verano a diferentes temperaturas de operación [26].	107
Fig. A.6 Característica I-V de la celda solar - Cambio en la resistencia serie R_s [69]	108

Fig. B.1 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].....	115
Fig. B.2 Estado de carga de las baterías (SOC %) – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].....	115
Fig. B.3 Flujo energético desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].....	116
Fig. B.4 Flujo energético entre el sistema y la red eléctrica – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50].....	116
Fig. C.1 Flujo de caja - Configuración 3 paneles. Fuente: Elaboración propia	117
Fig. C.2 Flujo de caja - Configuración 4 paneles. Fuente: Elaboración propia	117
Fig. C.3 Flujo de caja - Configuración 3 paneles. Fuente: Elaboración propia	118
Fig. C.4 Emisiones de CO2 evitadas por año. Fuente: Elaboración propia.....	118

Abreviaciones

Mayúsculas

B.E.S.S.	: Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías (del inglés <i>Battery Energy Storage System</i>).
P.V.	: Fotovoltaico (del inglés <i>Photovoltaic</i>).
M.P.P.T.	: Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (del inglés <i>Maximum Power Point Tracking</i>).
H.V.A.C.	: Aire Acondicionado (del inglés <i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i>).
A.N.F.I.S.	: Sistema de Inferencia Neuro-Fuzzy Adaptativo (del inglés <i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>).
P.&O.	: Perturbar y Observar.
S.A.M.	: System Advisor Model.
E.S.T.	: Tecnologías de Almacenamiento de Energía (del inglés <i>Energy Storage Technology</i>).
E.R.N.C.	: Energía Renovable No Convencional.
F.F.	: Factor de Llenado (del inglés <i>Fill Factor</i>).
M.P.P.	: Punto de Máxima Potencia (del inglés <i>Maximun Power Point</i>).
S.A.E.	: Sistemas de Almacenamiento de Energía.
P.C.M.	: Materiales de Cambio de Fase (del inglés <i>Phase Change Material</i>).
P.H.S.	: Almacenamiento Hidroeléctrico por Bombeo (del inglés <i>Pumped Hydroelectric Storage</i>).
C.A.E.S.	: Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido (del inglés <i>Compressed Air Energy Storage</i>).
S.o.C.	: Estado de Carga (del inglés <i>State of Charge</i>).
D.o.D.	: Profundidad de Descarga (del inglés <i>Depth of Discharge</i>).
T.C.O.	: Costo Total de Propiedad (del inglés <i>Total Cost of Ownership</i>).
R.O.I.	: Retorno de la Inversión (del inglés <i>Return of Invertment</i>).
E.M.S.	: Sistema de Gestión de Energía (del inglés <i>Energy Management System</i>).
V.A.N.	: Valor Actual Neto
T.I.R.	: Tasa Interna de Retorno
O.D.S.	: Objetivos de Desarrollo Sustentable

1. Introducción

1.1. Introducción

La creciente demanda de energía y la urgente necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero han hecho que la transición hacia sistemas energéticos sostenibles y renovables sea hoy en día una prioridad a nivel global. Países de todo el mundo, incluido Chile, están adoptando tecnologías de generación renovables, como la energía solar, con la finalidad de alcanzar el objetivo de carbono neutralidad. Sin embargo, esta energía presenta ciertos desafíos, siendo la intermitencia en la generación uno de los más significativos, debido al comportamiento variable de la irradiancia solar a lo largo del día [1].

En Chile, el sector educacional enfrenta retos importantes relacionados con la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico. Las interrupciones en el suministro afectan la calidad de la enseñanza, la operatividad de las actividades diarias y la seguridad de las instalaciones. En este contexto, la implementación de estrategias de gestión de energía que incluyan sistemas de almacenamiento en baterías ha demostrado ser efectiva para mitigar la variabilidad en la generación de energía solar. Estos sistemas permiten reducir el impacto de las fluctuaciones repentinas en la producción fotovoltaica, asegurando un suministro constante y estable [2].

La integración de sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento de energía en baterías (BESS) no solo responde a los desafíos de confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico, sino que también refleja el compromiso de los centros educacionales con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Estos sistemas permiten una mayor independencia de la red eléctrica convencional, mejorando la eficiencia en la gestión de la energía y garantizando un suministro estable incluso en condiciones adversas [3].

Este trabajo se centra en la evaluación y desarrollo de un sistema de gestión de energía fotovoltaica, complementado con almacenamiento de energía en baterías, con el objetivo de mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un centro educacional.

1.2. Descripción del Problema

La necesidad de un suministro eléctrico continuo y estable es fundamental para el buen funcionamiento en los centros educacionales, las interrupciones del suministro pueden afectar gravemente las actividades académicas, administrativas y operativas. La dependencia exclusiva de la red eléctrica convencional expone a estos centros educacionales a riesgos de cortes de energía ante eventualidades, que pueden interrumpir el proceso educativo, dañar equipos sensibles y afectar la seguridad del establecimiento. Este problema se agrava en el caso de escuelas ubicadas en zonas vulnerables, como Los Ángeles, Chile, donde la frecuencia de eventos climáticos extremos o desastres naturales pueden dejar a la comunidad sin acceso a energía por períodos prolongados. Además, muchas de estas escuelas fueron construidas hace décadas y operan con instalaciones eléctricas envejecidas y con mantenimiento limitado, lo que aumenta su vulnerabilidad ante interrupciones prolongadas del suministro eléctrico.

En este contexto, surge la necesidad de diseñar un sistema de gestión de energía que permita mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un centro educacional. Este sistema debe integrar de manera efectiva fuentes de energía renovables, como la generación fotovoltaica, y sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) para garantizar un suministro constante y estable. El objetivo principal es reducir la dependencia de la red eléctrica y asegurar que, incluso ante fallas o fluctuaciones en la red, el centro educativo pueda mantener sus operaciones críticas sin interrupciones. La importancia de la autonomía energética es aún más relevante en escuelas que pueden funcionar como albergues ante catástrofes, proporcionando un refugio seguro y con recursos energéticos autónomos para la comunidad afectada.

Este desafío se convierte en una prioridad en la búsqueda de soluciones energéticas eficientes y sostenibles que no solo mejoren la continuidad del suministro eléctrico, sino que también promuevan la adopción de tecnologías amigables con el medio ambiente y refuercen la capacidad de los centros educativos para enfrentar emergencias. La autonomía energética en estos centros no solo asegura un funcionamiento ininterrumpido, sino que también educa y sensibiliza a las nuevas generaciones sobre la importancia de las energías renovables y la autosuficiencia energética.

1.3. Trabajos Previos

Se presenta un resumen de trabajos clave estudiados en la revisión bibliográfica, los cuales proporcionaron la base teórica, metodológica y enfoques necesarios para desarrollar esta memoria de título y diseñar el sistema de gestión de energía propuesto.

1.3.1 Sistemas de Gestión de Energía

- ♣ A. B. El-Fawair, K. M. Al-Aubidy, and M. A. Al-Khawaldeh, “*Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources and Energy Storage System*,” in 2023 20th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 801–806. doi: 10.1109/SSD58187.2023.10411198, [4].

En este trabajo se presenta un esquema de gestión de energía para microrredes que incluyen fuentes de generación renovables, combinadas con sistemas de almacenamiento en baterías, con el objetivo de optimizar el suministro de energía y minimizar el intercambio con la red eléctrica principal. Los autores implementaron un sistema de gestión de energía junto con un controlador basado en un Sistema de Inferencia Neuro-Fuzzy Adaptativo (ANFIS) para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de los arreglos fotovoltaicos. Las simulaciones fueron realizadas en el software Matlab Simulink. Los resultados demostraron que el sistema de gestión de energía propuesto logró una reducción significativa en los costos operativos, mejoró la eficiencia del intercambio energético con la red, y optimizó el uso de la energía fotovoltaica generada, mostrando una alta eficacia en la gestión de la carga y descarga del sistema de almacenamiento. Este enfoque es relevante para el presente trabajo, ya que proporciona una referencia metodológica para la implementación de un sistema de gestión de energía que mejora el aprovechamiento de los recursos energéticos y reduce los costos asociados al almacenamiento energético.

- ♣ P. Moura, A. Correia, J. Delgado, P. Fonseca and A. d. Almeida, “*University Campus Microgrid for Supporting Sustainable Energy Systems Operation*,” 2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICPS48389.2020.9176755, [5].

Este trabajo describe el diseño e implementación de un sistema de gestión de energía en un campus universitario en Portugal, la cual integra generación fotovoltaica, almacenamiento en baterías de ion-litio, cargadores para vehículos eléctricos y un sistema de control de la demanda. Se realizó una caracterización exhaustiva del edificio y su demanda eléctrica para dimensionar adecuadamente el sistema de gestión de energía. Posteriormente, se implementaron los paneles solares, el sistema de almacenamiento, y el control para equipos HVAC y cargadores bidireccionales para vehículos eléctricos, permitiendo una gestión eficiente de la demanda y una respuesta adecuada a las variaciones

en la generación. El sistema se monitoreó en tiempo real utilizando LabVIEW. La implementación de esta micro red aumentó significativamente el autoconsumo de la energía generada, logrando un 21,4% de autosuficiencia energética en relación con la demanda total anual del edificio. Además, la integración del sistema de almacenamiento y la gestión de la demanda mejoraron la eficiencia y estabilidad del sistema, reduciendo los costos operativos. Este estudio aporta a este trabajo al evidenciar cómo la integración de sistemas de almacenamiento y control, junto con la monitorización en tiempo real, mejora la eficiencia y autosuficiencia energética en micro redes educativas.

1.3.2 *Sistemas Fotovoltaicos*

- ♣ R. Fuentes, D. Rojas, M. Rivera, J. Riveros, J. Muñoz and P. Wheeler, "*Technologies and MPPT algorithms for solar energy applications*," 2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Valparaíso, Chile, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/CHILECON54041.2021.9702987, [6].

En este trabajo se proporciona una visión general de la energía solar fotovoltaica, abarcando diferentes configuraciones y tipos de celdas, así como los pasos para dimensionar paneles solares en un proyecto. Además, se analizan los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y su impacto en la eficiencia de conversión energética. Los resultados destacan que el algoritmo Perturbar y Observar (P&O) es ampliamente utilizado por su simplicidad y rendimiento estable en diversas condiciones. Este estudio aporta una referencia clave para comprender los factores críticos en la optimización del sistema fotovoltaico, lo cual es relevante para el análisis y dimensionamiento realizado en esta memoria.

- ♣ I. Izquierdo, M. Pacheco, L. González, y E. Zalamea, "*Simulación fotovoltaica considerando parámetros de integración en edificaciones*", Ingenius, no. 21, pp. 21-31, 2019. DOI: 10.17163/ings.n21.2019.02, [7].

Este trabajo valida un modelo de sistemas fotovoltaicos usando el software System Advisor Model (SAM) para simular la generación eléctrica de un arreglo fotovoltaico, tomando en consideración las características meteorológicas de Cuenca, Ecuador. Se analiza el rendimiento eléctrico de los paneles con diferentes inclinaciones y orientaciones, con el fin de identificar la inclinación óptima y evaluar las pérdidas de eficiencia por acumulación de suciedad y aumento de temperatura. Los resultados muestran que la inclinación óptima de los paneles es de 25° hacia el norte y que las pérdidas por suciedad y temperatura afectan significativamente el rendimiento. La simulación en SAM confirmó que la adecuada integración de los paneles puede cubrir el consumo energético de los edificios estudiados y generar excedentes. Este estudio aporta al trabajo al demostrar la utilidad del software SAM para validar modelos energéticos basados en datos locales, optimizando el rendimiento en contextos específicos.

1.3.3 Sistemas de Almacenamiento

- ♣ B. Chreim, M. Esseghir, and L. Merghem-Boulahia, "*Recent sizing, placement, and management techniques for individual and shared battery energy storage systems in residential areas: A review*," Energy Reports, vol. 11, pp. 250–260, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.11.053, [8].

Este trabajo realiza una revisión exhaustiva de la literatura sobre el dimensionamiento, la ubicación y la gestión de sistemas de almacenamiento en baterías (BESS) tanto individuales como compartidos en áreas residenciales. El enfoque principal es cómo estos sistemas pueden mejorar la eficiencia energética, aumentar la confiabilidad del suministro eléctrico y reducir los costos de las tarifas eléctricas. Los autores revisaron estudios recientes que examinan la instalación de BESS en áreas residenciales, clasificándolos según varios criterios, como las funciones objetivo consideradas, las técnicas empleadas y las limitaciones identificadas. Los resultados de la revisión destacan que, si bien los BESS individuales ofrecen beneficios significativos, los BESS compartidos pueden ser más efectivos en términos de costo – beneficio y más ventajosos para las comunidades, especialmente cuando se considera la complementariedad de los perfiles de consumo de los usuarios.

- ♣ H. Z. Odero, C. W. Wekesa, and G. K. Irungu, “*Comprehensive Review of Energy Storage Technologies: Types, Applications, Optimal Sizing and Siting in Power Systems*,” in 2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905263, [9].

Este trabajo ofrece una revisión exhaustiva de las tecnologías de almacenamiento de energía (EST), incluyendo los sistemas de almacenamiento en baterías (BESS). Se detallan los tipos de EST, sus aplicaciones, ventajas y desventajas, así como las técnicas para determinar el tamaño y la ubicación óptima de estos sistemas en las redes eléctricas. Los autores analizaron estudios de casos reales, evaluando la eficacia de las estrategias de almacenamiento energético implementadas. Los resultados destacan que ninguna tecnología de almacenamiento puede satisfacer todas las aplicaciones energéticas debido a las diferencias en los rangos de potencia y tiempos de carga/descarga. Este trabajo proporciona una visión clara sobre las capacidades y limitaciones de los BESS, permitiendo fundamentar la selección y dimensionamiento de estos sistemas para una adecuada gestión energética en microredes.

1.3.4 *Discusión*

La revisión bibliográfica evidencia que, aunque existen numerosos estudios sobre la integración de sistemas de gestión de energía con fuentes fotovoltaicas y almacenamiento en baterías, la mayoría de estos trabajos se enfocan en aplicaciones residenciales o industriales. Los centros educacionales, por su parte, presentan desafíos únicos debido a sus patrones de consumo, limitaciones presupuestarias y necesidades operativas específicas. Si bien las metodologías y modelos analizados en la literatura son en muchos casos extrapolables a estos entornos, se identifica una carencia significativa de estudios enfocados en el contexto educativo, particularmente en Chile.

De la revisión de la literatura se desprende que es fundamental dimensionar adecuadamente los sistemas de almacenamiento en baterías (BESS) para asegurar su viabilidad económica y técnica. Además, si bien es cierto que los sistemas fotovoltaicos pueden cubrir gran parte del consumo energético, la intermitencia solar sigue siendo un desafío. Las ineficiencias y costos actuales de los sistemas de almacenamiento, junto con restricciones normativas y técnicas, justifican la necesidad de encontrar nuevos enfoques innovadores para implementar estas tecnologías.

Este proyecto buscará entregar una metodología específica para implementar sistemas de gestión de energía que mejoren la continuidad del suministro eléctrico para centros educacionales,

aplicando metodologías avanzadas y adaptando las tecnologías analizadas en la literatura para cumplir estos objetivos.

1.4. Hipótesis de Trabajo

La implementación de un sistema de gestión de energía que integre generación solar y almacenamiento de energía en un centro educacional es técnica y económicamente viable, y contribuirá a mejorar la continuidad del suministro eléctrico

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar un sistema de gestión de energía basado en energía solar fotovoltaica en conjunto con almacenamiento en baterías para mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un centro educacional.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar el tamaño y potencia del sistema fotovoltaico y de almacenamiento propuesto, mediante un análisis técnico, para cubrir las necesidades energéticas del centro educacional.
- Evaluar y simular el desempeño del sistema propuesto, utilizando el software System Advisor Model (SAM) para obtener datos precisos sobre su operación y rendimiento.
- Realizar una evaluación económica del proyecto, aplicando indicadores financieros, para analizar la viabilidad de la implementación del sistema propuesto, considerando costos de instalación y operación.
- Evaluar el impacto del sistema en la continuidad del suministro eléctrico, mediante el análisis de métricas clave bajo diferentes escenarios de operación.

1.6. Alcances y Limitaciones

- El diseño del sistema de gestión de energía se centrará en una sala del centro educacional.
- El diseño no incluirá el sistema de comunicación entre los componentes del sistema de gestión de energía, ni se tomará en consideración el mantenimiento futuro de los componentes del sistema.
- Las simulaciones de prueba de este sistema de gestión de energía se realizarán en el software System Advisor Model (SAM), una herramienta gratuita para el análisis técnico y económico

de tecnologías energéticas, accesible al público sin necesidad de autorización.

- La plataforma de gestión energética se desarrolló utilizando la herramienta Power Bi Desktop, una versión gratuita y accesible al público. Esta herramienta permitió crear visualizaciones dinámicas e interactivas para analizar las variables clave del sistema, facilitando la comprensión del desempeño energético y su gestión.
- Todas las referencias a costos y precios en este documento estarán expresadas en pesos chilenos (CLP).
- La propuesta de este sistema queda limitada a una evaluación técnica, económica y ambiental, incluyendo el desarrollo de una plataforma digital de gestión energética. No se considera la implementación física del sistema debido a restricciones presupuestarias, sin embargo, se incluye un análisis de viabilidad económica como uno de los resultados principales del proyecto, orientado a evaluar la factibilidad futura de su implementación.
- El análisis ambiental se centra en evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas mediante la energía limpia generada por los paneles solares, comparándolas con fuentes tradicionales. Este análisis considera únicamente la etapa operativa del sistema, excluyendo impactos de fabricación y disposición final de baterías.

1.7. Temario y Metodología

El presente informe está organizado en un total de ocho capítulos, el capítulo 1 presenta la introducción general, la descripción del problema, los trabajos previos, el objetivo general y los específicos, así como los alcances y limitaciones del proyecto. En el capítulo 2 se establecen las bases teóricas de los sistemas fotovoltaicos, el funcionamiento de las celdas solares, los tipos de sistemas fotovoltaicos y las tecnologías actuales. El capítulo 3 aborda los sistemas de almacenamiento de energía, las tecnologías actuales, los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento y sus aplicaciones en sistemas de gestión energética. El capítulo 4 describe el contexto de la escuela dónde se evaluará la viabilidad del proyecto, junto con el análisis de sus consumos energéticos y curvas de demanda. El capítulo 5 presenta el diseño y dimensionamiento de los componentes del sistema de gestión de energía, además de la selección de las tecnologías más adecuadas para cada componente. El capítulo 6 incluye las simulaciones de los escenarios de operación, el análisis de los resultados, y la implementación de la plataforma de gestión energética. El capítulo 7 está dedicado al análisis económico y ambiental del proyecto. Finalmente, el capítulo 8 presenta las conclusiones generales, el sumario y los trabajos futuros derivados del presente informe.

2. Sistemas Fotovoltaicos

2.1. Introducción a los Sistemas Fotovoltaicos

El calentamiento global se ha convertido en una seria problemática que afecta gravemente al mundo, lo que ha impulsado la necesidad de encontrar alternativas energéticas sostenibles y amigables con el medio ambiente. El agotamiento de los combustibles fósiles y sus efectos adversos han llevado a la búsqueda de fuentes de energía renovable, destacando la energía solar como una de las mejores opciones, debido a que es limpia, renovable y se encuentra abundantemente en la mayoría de los lugares [10]. Esta energía es aprovechada mediante el efecto fotoeléctrico, que convierte la radiación en energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos [1][6].

El desierto de Atacama, ubicado en el norte de Chile, tiene el mayor índice de irradiancia a nivel mundial, lo que otorga a Chile un enorme potencial fotovoltaico, que lo ha posicionado como un líder en la adopción de la energía solar en América Latina [6]. La capacidad instalada de energía fotovoltaica ha crecido considerablemente, diversificando la matriz energética nacional. Políticas gubernamentales que fomentan el uso de energías renovables, junto con la disminución proyectada de los costos asociados con la tecnología fotovoltaica [11], han facilitado el acceso a esta fuente de energía.

En 2024, la energía solar mostró un crecimiento significativo en la matriz energética nacional, alcanzando una generación acumulada de 10.453,3 [GWh] en julio, lo que representa un aumento del 14,3% respecto al año anterior. Esta fuente renovable aportó un 17,9% a la generación total de Energía Renovable No Convencional (ERNC), superando a la energía eólica (13,9%) y a la hidroeléctrica (3,2%), consolidándose como la principal fuente de generación renovable en Chile [12].

Las figuras 2.1 y 2.2 presentan proyecciones clave para comprender el impacto futuro de los sistemas de generación solar distribuida en Chile. La figura 2.1 muestra la proyección de potencia instalada de los Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD) en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), mientras que la figura 2.2 representa la capacidad instalada de Net Billing en el sector habitacional para el período 2020-2040. Estas proyecciones permiten contextualizar el crecimiento esperado de estos sistemas y su aporte a la matriz energética nacional [13].

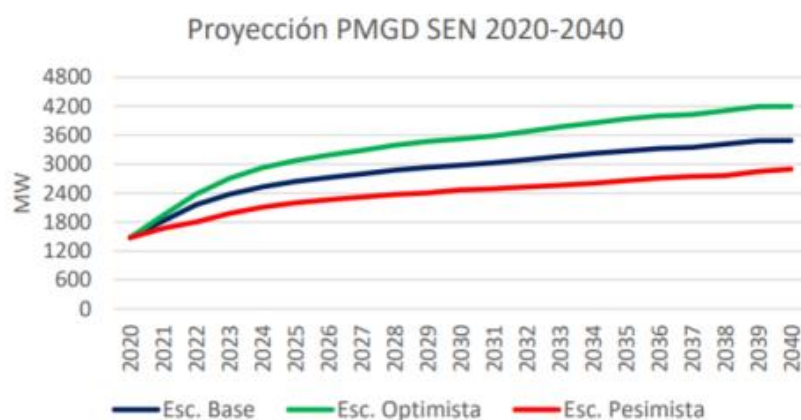


Fig. 2.1 Proyección PMGD (Potencial) en el SEN, período 2020-2040 [13]

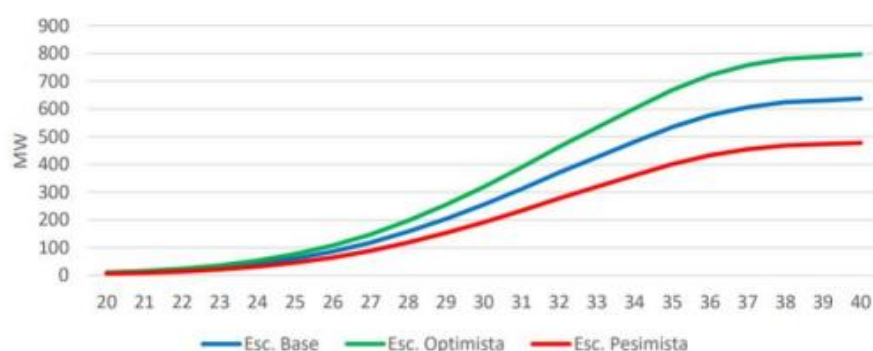


Fig. 2.2 Capacidad instalada Net Billing en sector habitacional, período 2020-2040 [13]

2.2. Tipos de Celdas Fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son el componente principal de los paneles solares y han sido objeto de múltiples desarrollos tecnológicos con la finalidad de mejorar su eficiencia y reducir sus costos de producción. Una descripción detallada del principio de funcionamiento de las celdas solares, su modelo eléctrico equivalente y la curva característica I-V se encuentra en el [Anexo A.1](#), donde se explica su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

En la actualidad existen diversos tipos de celdas fotovoltaicas que se diferencian en su mayoría por los materiales utilizados en su fabricación y en su eficiencia. A continuación, en Tabla 2.1 se presenta un resumen de los tipos de celdas fotovoltaicas más relevantes, destacando sus características principales, eficiencia promedio y aplicaciones comunes.

Tabla 2.1 Tipos de celdas fotovoltaicas y sus características principales. Adaptado de [6][14][15]

Tipo de Celda	Características Principales	Eficiencia Promedio	Aplicaciones Comunes
Silicio Monocristalino	Mayor eficiencia y costos más altos. Mejor rendimiento a altas temperaturas	24%	Residencial e Industrial
Silicio Policristalino	Menor costo debido a menos fases de cristalización. Menor eficiencia en comparación con las monocristalinas	19%	Residencial e Industrial
Silicio Amorfo	Más económicas, menor eficiencia. Mejor rendimiento a altas temperaturas	13%	Arquitectura, fachadas de edificios
Compuestos III-V	Altamente eficientes pero costosas. No son comunes comercialmente	39%	Aplicaciones espaciales, tecnología avanzada
Compuestos II-VI	Bajo costo y buen rendimiento. Alta eficiencia	22%	Grandes plantas solares, aplicaciones específicas

2.3. Configuraciones de Sistemas Fotovoltaicos

La implementación de los sistemas fotovoltaicos se puede implementar mediante diferentes tipos de configuraciones, cada una de ellas diseñada específicamente para satisfacer las necesidades según el entorno y los requisitos energéticos. Estas configuraciones determinan cómo se integran los paneles solares con otros componentes de un sistema de gestión de energía y cómo interactúan con la red eléctrica, si es que están conectados a ellas.

A continuación, en Tabla 2.2 se presenta un resumen de las configuraciones más relevantes de los sistemas fotovoltaicos, destacando sus principales características, ventajas y desventajas.

Tabla 2.2 Configuraciones de Sistemas Fotovoltaicos. Adaptado de [16][17]

Configuración	Características Principales	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones Comunes
On-grid	Conectados a la red eléctrica, sin necesidad de baterías	Menor costo comparativo, posibilidad de vender excedentes	Dependencia de la red, intermitencia en la generación solar	Residencial, industrial
Off-Grid	Independientes de la red eléctrica, utilizan baterías para almacenar energía	Independencia energética, operación en zonas remotas	Alto costo, necesidad de dimensionar baterías	Zonas aisladas, rurales
Híbrido	Combinación de sistemas On-Grid y Off-Grid, con baterías de respaldo	Mayor autonomía, posibilidad de vender excedentes	Alto costo, mayor complejidad en la instalación	Residencial, industrial y zonas con suministro inestable

En Tabla 2.2 se resume de manera clara y concisa las configuraciones más comunes, facilitando la comparación entre ellas y proporcionando una visión general de sus aplicaciones más habituales. Las figuras 2.3, 2.4 y 2.5 complementan esta información, mostrando representaciones gráficas para cada configuración de los sistemas fotovoltaicos.

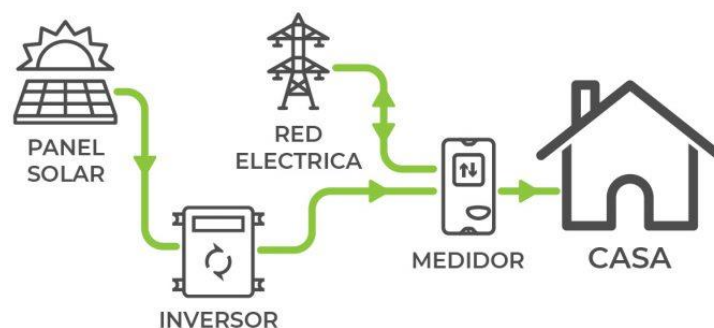


Fig. 2.3 Configuración sistema PV tipo On-Grid [18]

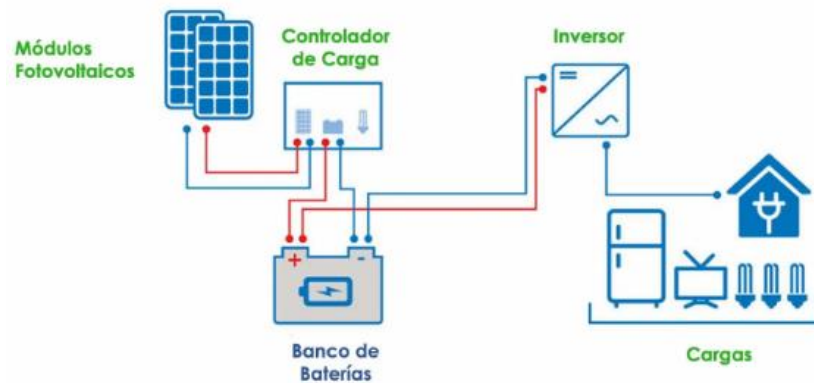


Fig. 2.4 Configuración sistema PV tipo Off-Grid [19]

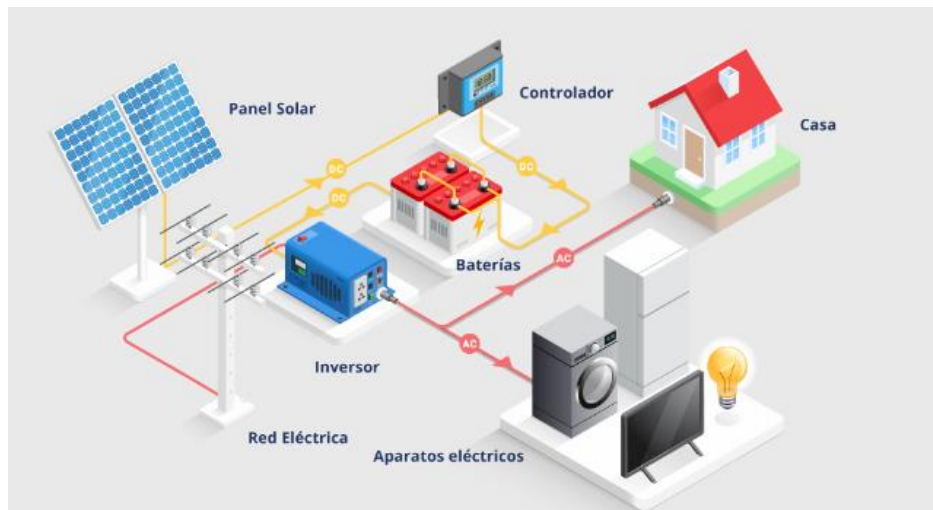


Fig. 2.5 Configuración sistema PV híbrido [20]

2.4. Dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos

El dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos es fundamental para asegurar que la instalación de los paneles solares satisfaga la demanda energética de un sitio específico de manera eficiente. Este proceso debe incluir el cálculo detallado del número de paneles solares y si existiese, la capacidad de almacenamiento de las baterías, en dónde se debe considerar tanto la demanda energética diaria como las condiciones de operación en escenarios críticos, como en meses de invierno con baja irradiancia solar [6]. Los cálculos de potencia de los paneles solares deben ser ajustados en función de factores que afectan la eficiencia del sistema, como temperatura, sombras y eficiencia de los inversores y

baterías, lo cual es fundamental para maximizar la fiabilidad del sistema.

Es importante evaluar cuidadosamente el consumo de las cargas presentes en el lugar a instalar el sistema fotovoltaico y ajustar la configuración de este mismo para optimizar la generación y el uso de la energía. Según [6] es recomendable incorporar algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) para mejorar la eficiencia de los paneles y asegurar que el sistema pueda adaptarse a las variaciones en la irradiancia, maximizando la generación de energía incluso en condiciones adversas. De acuerdo con los estudios realizados en [6] y [21], los pasos a seguir para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico incluyen:

2.4.1 Estimación del Consumo Energético

La primera etapa para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico es evaluar el consumo energético de las cargas que se planean alimentar con energía eléctrica, esto implica establecer la duración del uso de las cargas y fijar cuáles serán las cargas críticas que deberán permanecer operativas durante cortes de energía.

Se debe registrar el consumo energético de las cargas a lo largo de un día típico, esto incluye medir o estimar el uso de energía en cada hora del día para reflejar las variaciones en el uso de las cargas y ver su variabilidad. Además, se debe considerar como varía el consumo energético entre estaciones, con la finalidad de establecer el caso crítico que será fundamental para el dimensionamiento del sistema.

2.4.2 Determinación de la Irradiancia Solar

El siguiente paso es determinar la irradiancia solar disponible en la ubicación de la instalación del sistema fotovoltaico, que varía según la latitud, el clima y la estación del año. En [6] se destaca la importancia de considerar la irradiancia mínima durante el período más crítico, por ejemplo, en invierno, para garantizar que el sistema pueda operar adecuadamente bajo las peores condiciones.

Estos datos de irradiancia solar pueden ser obtenidos en páginas web tales como la del explorador solar del Ministerio de Energía [22] o Nasa Power Project's Data Access Viewer (DAV) [23].

También es importante el cálculo de las Horas de Sol Pico (HSP), las cuales representan el número de horas de irradiancia solar plena (equivalente a $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) en un día. Este es un parámetro clave para estimar la energía que se puede generar con los paneles solares.

2.4.3 Cálculo del Número de Paneles Fotovoltaicos

El cálculo del número de paneles necesarios se realiza con base en la demanda energética previamente calculada y la capacidad de generación esperada, la ecuación (2.1) provee lo necesario para realizar este cálculo.

$$N_T = \frac{E_{nec}}{P_{mpp} * HPS_{cri} * PR} \quad (2.1)$$

donde,

- N_T : Número total de paneles solares,
- E_{nec} : Energía diaria necesaria para cubrir la demanda [kWh],
- P_{mpp} : Potencia nominal del panel solar [kW],
- HPS_{cri} : Horas de sol pico [h], y
- PR : Factor de rendimiento (Entre 0,75 y 0,9 [6]).

Se consideran ajustes por factores de pérdida que incluyen eficiencia del panel, temperatura, cableado y sombreado parcial. El desarrollo detallado de este cálculo, con valores específicos utilizados y ajustes aplicados, se presentan en el [Anexo A.2.1](#).

2.4.4 Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento

Para el caso de un sistema fotovoltaico con almacenamiento de energía, es necesario dimensionar el número de baterías, las cuáles dependerán de la potencia eléctrica de las cargas, la duración del uso de las cargas y los días de autonomía que se espera obtener con el sistema propuesto.

La ecuación (2.2) es utilizada para calcular la capacidad del sistema de almacenamiento en baterías necesaria para el sistema.

$$C_{bat} = \frac{P_t * t}{DoD * \eta_{bat}} \quad (2.2)$$

donde,

- C_{bat} : Capacidad de las baterías [kWh],
- t : Tiempo de autonomía esperado [h],
- P_t : Potencia total requerida por las cargas [kW],
- DoD : Profundidad de descargas de las baterías, y
- η_{bat} : Eficiencia de las baterías

2.4.5 Selección del Inversor y Regulador de Carga

El inversor y el regulador de carga son componentes esenciales para garantizar el correcto funcionamiento y eficiencia de un sistema fotovoltaico.

- Inversor: Se recomienda dimensionarlo con un margen de seguridad adicional del 20% al 30% para cubrir variaciones en la irradiancia solar, sobrecargas y peaks de demanda [24].
- Regulador de carga: Debe coincidir con el voltaje del banco de baterías y ser capaz de manejar adecuadamente las fluctuaciones del voltaje y temperatura de los paneles solares. Además, se recomienda un margen adicional del 20% en la corriente nominal para evitar sobrecargas [24].
- Controlador MPPT: Optimiza la recolección de energía ajustando dinámicamente la carga, maximizando la eficiencia de los paneles bajo diferentes condiciones de irradiancia [24].

La corriente nominal del regulador de carga debe ser suficiente para manejar la corriente máxima esperada de los paneles solares, esto se representa en la ecuación (2.3).

$$I_{regulador} = \frac{P_{total\ paneles}}{V_{baterias}} \quad (2.3)$$

donde,

$I_{regulador}$: Corriente nominal del regulador de carga [A],

$P_{total\ paneles}$: Potencia total de los paneles solares [kW], y

$V_{baterias}$: Voltaje del banco de baterías [V].

Este método de dimensionamiento asegura que tanto el inversor como el regulador de carga puedan manejar las condiciones operativas máximas esperadas, optimizando el rendimiento y la fiabilidad del sistema fotovoltaico.

2.4.6 Consideraciones de instalación: Área Disponible y Orientación

Para el dimensionamiento efectivo de sistemas fotovoltaicos, no solo es importante calcular la cantidad de paneles solares necesarios y la capacidad de almacenamiento del sistema, sino también considerar las condiciones físicas y geométricas de la instalación. El área disponible en el techo en dónde se instalarán los paneles y la orientación de ellos, incluidos los ángulos de inclinación el azimuth, son factores fundamentales que afectarán a la eficiencia de los paneles solares y su generación de energía eléctrica.

A. Área Disponible en el Techo

El área disponible en el techo de la instalación es un factor determinante para la capacidad total que tendrá el sistema fotovoltaico, este espacio definirá el número máximo de paneles solares que podrán ser instalados y, por lo tanto, la generación potencial de energía. Al evaluar esta área utilizable, es esencial considerar obstáculos fijos como conductos de ventilación, antenas o áreas sombreadas que puedan reducir la eficiencia de los paneles solares. Asimismo, deben contemplarse los espacios necesarios entre los paneles para evitar sombreados entre ellos mismos, permitir el acceso para el mantenimiento y garantizar una ventilación adecuada que evite sobrecalentamientos y pérdida de eficiencia.

Sin embargo, no toda el área del techo puede ser utilizada exclusivamente para la instalación de paneles. De acuerdo con [25] se debe dejar un espacio libre de 1 [m] a lo largo del perímetro del techo, lo que reduce el área efectiva utilizable. Además, es necesario considerar un factor de sombreado, que contempla el espacio necesario entre los paneles para evitar la proyección de sombras y así facilitar el mantenimiento. Estos dos ajustes se incorporan mediante un factor de corrección total (F_C), que se descompone de la siguiente manera:

1. Factor de corrección por perímetro (F_{libre}): Se calcula considerando la reducción del área utilizable al dejar un margen libre de 1 [m] alrededor del techo. Este factor varía según las dimensiones del techo [25] y se expresa en la ecuación (2.4) como:

$$F_{libre} = \frac{(L - 2) * (A - 2)}{L * A} \quad (2.4)$$

donde,

L : Largo total del techo [m], y

A : Ancho total del techo [m].

2. Factor de corrección por sombras ($F_{sombras}$): Este factor representa el ajuste necesario para evitar el sombreado entre los paneles y facilitar el mantenimiento. Este factor suele estar entre 0,7 y 0,9 [25], dependiendo de las características de instalación y la inclinación de los paneles.

La fórmula ajustada para calcular el número máximo de paneles que se pueden instalar en el área disponible, considerando los factores anteriores, está representado por la ecuación (2.5).

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{\text{Área Disponible [m}^2\text{]} * F_{libre} * F_{sombras}}{\text{Área de un Panel [m}^2\text{]}} \quad (2.5)$$

Dónde $N_{m\acute{a}x}$ representa el número máximo de paneles solares que se pueden instalar en el área disponible.

B. Ángulo de Inclinación

El ángulo de inclinación en que se instalan los paneles solares es otro factor crítico que afecta la captación de la irradiancia solar. La inclinación óptima maximiza la captación de irradiación solar a lo largo del año, especialmente en condiciones críticas como en meses de invierno. En general, la inclinación ideal para paneles solares suele ser cercana a la latitud del lugar de instalación, teniendo algunos ajustes ligeros que permiten optimizar la generación en estaciones específicas del año. Para el caso de Los Ángeles, Chile, que posee una latitud aproximada de 37° S, la inclinación ideal de los paneles sería alrededor de los 37° [25].

C. Orientación y Azimuth

El azimuth se refiere a la orientación horizontal de los paneles solares con respecto al norte geográfico. Para maximizar la generación de energía, los paneles deben orientarse hacia el norte en el hemisferio sur, un ajuste incorrecto de este ángulo puede llevar a una pérdida significativa de eficiencia, por lo que es recomendable una orientación lo más cercana posible al norte verdadero, para el caso de Los Ángeles, Chile, es de una orientación cercana a 0° [25], ahora, en la figura 2.6 se presenta gráficamente a qué corresponden estos ángulos.

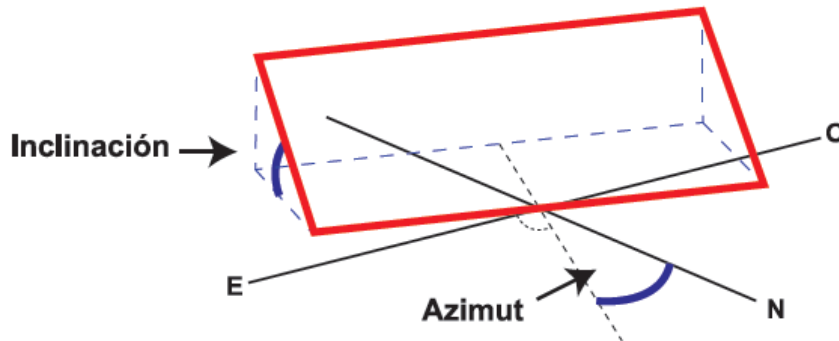


Fig. 2.6 Inclinación y orientación (ángulo azimuth) de un panel solar [25]

Al integrar estos factores, el área disponible, la inclinación y el azimuth en el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos, se garantiza un diseño del sistema que no solo

cumple con los requisitos energéticos, sino que también operará de manera eficiente en las condiciones específicas en el sitio de instalación. Estos pasos por seguir y criterios proporcionan una guía práctica para dimensionar sistemas fotovoltaicos.

2.5. Factores que afectan a la eficiencia de los paneles fotovoltaicos

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos está influenciada por factores ambientales y operativos, como la intensidad de la radiación solar, la temperatura de los módulos, la suciedad y sombras, entre otros, que afectan directamente su capacidad de conversión de energía [26]. Las variaciones en estos factores, especialmente en la radiación y la temperatura de los módulos, son críticas para un rendimiento eficiente de las celdas solares, por lo que su monitoreo y control adecuado resultan esenciales para maximizar la producción energética [27].

En el [Anexo A.3](#) se detallan los principales factores que influyen en la eficiencia de los paneles solares, incluyendo gráficos y ecuaciones representativas de estos fenómenos.

2.6. Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) permite maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos al ajustar dinámicamente el punto de operación de los paneles solares para obtener el máximo rendimiento energético. Para más detalles sobre los algoritmos MPPT, su funcionamiento y curvas características, consultar el [Anexo A.4](#).

2.7. Aplicaciones de los Sistemas Fotovoltaicos en Centros Educativos

La implementación de sistemas fotovoltaicos en centros educativos proporciona múltiples beneficios económicos, operativos y educativos. Estos sistemas no solo reducen los costos energéticos y mejoran la confiabilidad del suministro eléctrico, sino que también fomentan la sostenibilidad energética y funcionan como herramientas educativas que inspiran prácticas sostenibles en la comunidad estudiantil. Además, permiten a las instituciones generar su propia energía, reduciendo los gastos en electricidad, especialmente en escuelas públicas con presupuestos limitados, además de garantizar la continuidad de sus operaciones durante cortes de energía mediante el uso de baterías. Esto asegura el funcionamiento de sistemas críticos y contribuye a una mayor resiliencia energética en los centros educativos [28].

A continuación, se muestran 3 casos de estudios de evaluaciones de proyectos con sistemas fotovoltaicos y los beneficios que traen la incorporación de paneles solares en estos recintos.

2.7.1 Casos de Estudio

A. *Universidad de Begum Rokeya, Bangladesh*

En el estudio realizado en [21], un sistema fotovoltaico de 60 [kW] fue instalado en la azotea de un edificio académico en Bangladesh, generando una cantidad de energía de 91,39 [MWh/año], logrando cubrir aproximadamente el 69% de la demanda energética del edificio. Este proyecto no solo redujo los costos de electricidad, sino que también disminuyó la dependencia de la red basada en combustibles fósiles, demostrando la viabilidad técnica y económica de este proyecto en aquel recinto universitario.

B. *Escuela Primaria en Yakarta, Indonesia*

En el estudio realizado en [28], un sistema fotovoltaico de 20 [kWp] fue instalado en una escuela primaria, el cual logró reducir los costos de electricidad en un 51,6%. Este proyecto no solo proporcionó ahorros significativos, sino que también sirvió como modelo para futuras implementaciones en otras escuelas, destacando cómo los sistemas fotovoltaicos pueden ser adaptados a diferentes contextos educativos según sus necesidades energéticas para maximizar sus beneficios.

C. *Edificios Educativos en Concepción, Chile*

En el estudio realizado en [29], se evaluó la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios educativos para la ciudad de Concepción, Chile. En este trabajo, se optimizó la posición y orientación de los paneles para maximizar la generación de energía. Los resultados mostraron que la energía generada no solo cubría las necesidades de cuatro plantas en el ciclo básica-media y tres en nivel superior, sino que también el sistema era capaz de generar excedentes que podían ser compartidos localmente o integrados a la red eléctrica. Este proyecto subraya la importancia de un diseño arquitectónico que maximice el potencial solar, ofreciendo un modelo replicable para otros establecimientos en la región.

La implementación de sistemas fotovoltaicos en centros educativos reduce costos energéticos, garantiza un suministro confiable y fomenta la sostenibilidad. Su adopción, viable en distintos contextos, contribuye al desarrollo sostenible y seguirá expandiéndose a medida que la tecnología solar sea más accesible y rentable.

3. Sistemas de Almacenamiento

3.1. Introducción a los Sistemas de Almacenamiento de Energía

Los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) son tecnologías diseñadas para capturar, almacenar y liberar energía de manera controlada, adaptándose a las necesidades de consumo o demanda. Estos sistemas almacenan energía en diversas formas, como eléctrica, térmica, mecánica o química, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde equilibrar la oferta y la demanda en redes eléctricas hasta proporcionar energía de respaldo en instalaciones críticas. Los SAE son esenciales para mejorar la eficiencia y estabilidad del suministro energético, permitiendo gestionar la energía disponible de fuentes como la red eléctrica, fuentes renovables y procesos industriales [31].

Los SAE se presentan como una solución efectiva para gestionar la variabilidad en la generación y el consumo de energía, especialmente en la integración de fuentes renovables. Estos sistemas permiten mitigar la intermitencia innata a la generación de energías renovables como la solar y la eólica, al almacenar el exceso de energía durante los periodos de alta producción y liberarla cuando la generación es insuficiente o la demanda es elevada. Esto contribuye a mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico, garantizando un abastecimiento constante y eficiente en diversos sectores [31].

Además de su papel en la gestión de la intermitencia de las energías renovables, los sistemas de almacenamiento también son fundamentales para proporcionar servicios auxiliares como la regulación de frecuencia y voltaje en redes eléctricas, descongestionar los sistemas de transmisión y distribución, reducir la necesidad de infraestructura adicional al desplazar peaks de carga, entre otros. Esto es especialmente valioso en aplicaciones como microrredes, sistemas de energía aislados (off-grid), y en sectores donde la continuidad del suministro es crítica, como hospitales, centros educativos y servidores de datos [32].

En el contexto de centros educativos, los SAE no solo aseguran la continuidad del suministro durante cortes de energía, sino que también permiten una gestión más eficiente y autónoma de la energía, reduciendo costos operativos y contribuyendo a la sostenibilidad energética [32]. Este capítulo entregará información sobre los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, sus aplicaciones y cómo su integración con sistemas fotovoltaicos puede optimizar la gestión energética en entornos educativos.

3.2. Tipos de Sistemas de Almacenamiento de Energía

Los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) son tecnologías diseñadas para conservar energía en distintos momentos y liberarla cuando sea necesario, permitiendo un uso más eficiente y controlado de los recursos energéticos. Estos sistemas cumplen un rol fundamental en la gestión energética al facilitar la disponibilidad de energía de manera continua y adaptable a diversas necesidades. Dependiendo del método que utilizan para almacenar y liberar energía, los SAE se clasifican en eléctricos, térmicos, mecánicos y químicos, cada uno con características particulares para diferentes aplicaciones en sectores industriales, comerciales y residenciales [9].

A continuación, en la figura 3.1 se presenta un esquema general de un SAE, que ilustra su funcionamiento básico y los componentes clave involucrados en el proceso.

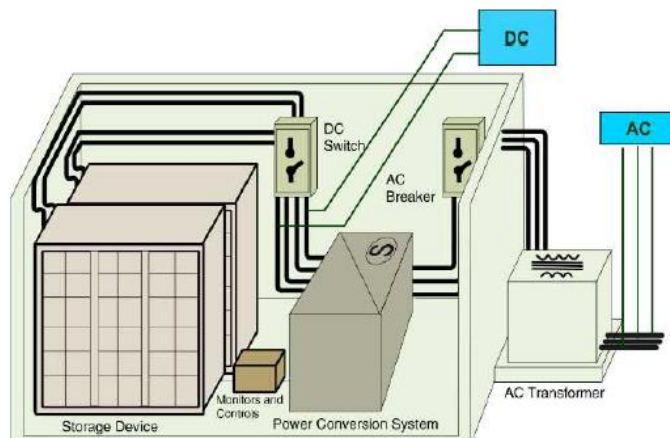


Fig. 3.1 Esquema de un Sistema de Almacenamiento [9]

Los SAE eléctricos, como los BESS y los supercapacitores, permiten una respuesta rápida y flexible, siendo ideales para estabilizar redes eléctricas o aplicaciones de alta demanda momentánea [33]. Por otro lado, los SAE térmicos, como el almacenamiento en sales fundidas, destacan por su capacidad de conservar energía térmica para procesos industriales y plantas solares [31]. En el almacenamiento mecánico, el bombeo hidroeléctrico (PHS) es uno de los métodos más eficientes y utilizados a gran escala, mientras que los volantes de inercia son más adecuados para aplicaciones de corto plazo [31]. Finalmente, los SAE químicos, como las celdas de hidrógeno, ofrecen una opción limpia y flexible para gestionar la intermitencia de las fuentes renovables.

En Tabla 3.1, se resumen las principales características, ventajas y aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía más representativos.

Tabla 3.1 Comparativa de los principales Sistemas de Almacenamiento de Energía [31][33]

Tipo de SAE	Ejemplos	Características Principales	Ventajas	Aplicaciones Comunes
Eléctrico	BESS, Supercapacitores	Respuesta rápida, alta densidad energética	Flexibilidad, eficiencia en cargas y descargas rápidas	Redes eléctricas, alta demanda momentánea
Térmico	Sales fundidas	Almacenamiento de calor a alta temperatura	Alta capacidad térmica, aplicaciones industriales	Procesos industriales, plantas solares
Mecánico	PHS, Volantes de inercia	Energía cinética o potencial almacenada mecánicamente	Eficiencia a gran escala, respuesta rápida	Redes eléctricas, aplicaciones puntuales
Químico	Celdas de hidrógeno	Reacciones electroquímicas para generar energía	Limpieza, flexibilidad, almacenamiento prolongado	Transporte, aplicaciones estacionarias

3.3. Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS)

Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) son una de las soluciones más versátiles y ampliamente adoptadas para la gestión de energía. Estos sistemas utilizan diferentes tipos de baterías para almacenar electricidad, ofreciendo diversos servicios auxiliares al sistema eléctrico, proporcionar energía de respaldo y mejorar la integración de fuentes de energía renovables. Los BESS son esenciales para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida y flexible, lo cual es especialmente relevante en la estabilización de redes eléctricas y en entornos con una alta penetración de energías intermitentes como la solar y la eólica [32].

3.3.1 Funcionamiento Básico de las Baterías en BESS

Las baterías almacenan energía eléctrica mediante procesos electroquímicos que tienen lugar en sus celdas, cada celda de una batería está compuesta por un ánodo, un cátodo y un electrolito que permite el movimiento de iones entre ambos electrodos. Durante la carga, una fuente externa de electricidad induce una reacción química que desplaza los iones del cátodo al ánodo a través del electrolito, almacenando energía en forma de energía química. Durante la descarga, este proceso se

invierte, los iones se desplazan de vuelta al cátodo, liberando la energía almacenada como corriente eléctrica utilizable [9]. En la figura 3.2 se presenta un esquema general de un sistema BESS.

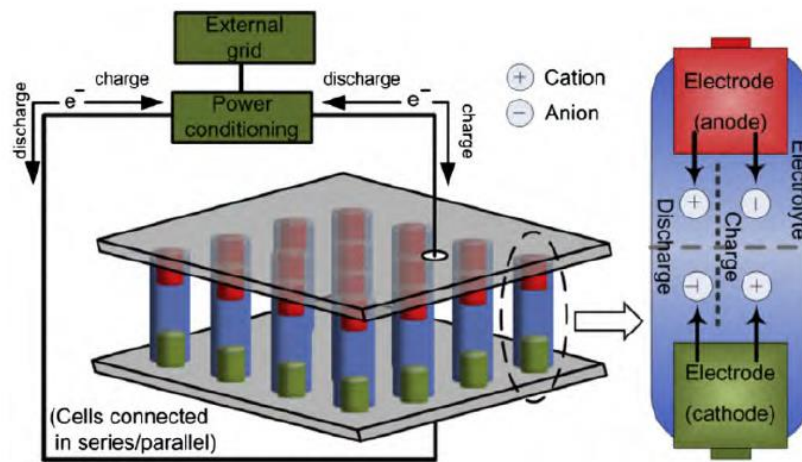


Fig. 3.2 Esquema sistema BESS con múltiples celdas [31]

3.3.2 Estado de Carga (SoC) y Profundidad de Descarga (DoD)

El estado de carga (del inglés *State of Charge* SoC) es un parámetro que indica el nivel de energía almacenada en una batería, expresado como un porcentaje de su capacidad total. Un SoC alto significa que la batería está cargada y lista para suministrar energía, mientras que un SoC bajo indica poca energía disponible. El SoC es crucial para gestionar la disponibilidad de energía en los BESS y para prevenir la sobrecarga de las baterías, lo cual puede provocar su degradación o incluso fallas en el sistema de gestión [34].

La profundidad de descarga (del inglés *Depth of Discharge* DoD), por otro lado, mide la cantidad de energía extraída de la batería en comparación con su capacidad total. Un DoD del 80% indica que se ha utilizado el 80% de la capacidad de la batería. Este es un parámetro crítico, ya que ciclos de descarga profundos y repetitivos pueden acelerar la degradación de la batería, reduciendo su vida útil y afectando negativamente el rendimiento del sistema [34].

La gestión adecuada del SoC y DoD permite maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil de las baterías, asegurando que operen dentro de rangos seguros. Esto es especialmente importante en aplicaciones donde la fiabilidad es crucial, como en sistemas de respaldo para hospitales o microrredes, donde un suministro continuo de energía es esencial. Mantener el SoC en niveles óptimos y evitar descargas excesivas ayuda a preservar la capacidad de respuesta y la integridad del sistema a largo plazo.

3.3.3 Tipos de Baterías utilizadas en BESS

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS) utilizan diversas tecnologías, cada una con características específicas que las hacen más adecuadas para distintas aplicaciones. Las baterías más comunes incluyen las de ion-litio, plomo-ácido, sodio-azufre, flujo rojo de vanadio y níquel-cadmio. Estas tecnologías varían en términos de densidad energética, ciclos de vida, eficiencia de carga/descarga, potencia específica y costos [31]. En Tabla 3.2, se presenta un resumen comparativo de sus principales características, ventajas y desventajas. Mientras que, en Tabla 3.3, se detallan los valores técnicos específicos de cada tipo de batería para una comparación más cuantitativa.

Tabla 3.2 Comparativa general de tipos de baterías para BESS [31][32][35]

Tipo de Batería	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones comunes
Ion-Litio (Li-ion)	Alta densidad energética, ciclos de vida prolongados, tiempos de respuesta rápidos	Alto costo inicial, problemas ambientales en reciclaje	Redes eléctricas, proyectos de ERNC
Plomo-Ácido	Bajo costo inicial, confiabilidad	Vida útil corta, mantenimiento frecuente	Aplicaciones de bajo costo
Sodio-Azufre (Na-S)	Alta eficiencia, adecuada para almacenamiento estacionario	Alta temperatura de operación, riesgo de corrosión	Almacenamiento a gran escala, regulación de frecuencia
Flujo Redox de Vanadio (VRFB)	Larga vida útil, alto número de ciclos de carga/descarga	Baja densidad energética, alto costo inicial	Aplicaciones estacionarias de gran escala
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Robustez, operación en condiciones extremas	Problemas ambientales con el cadmio, menor eficiencia	Aplicaciones industriales específicas

Tabla 3.3 Comparación de Tipos de Baterías para BESS [31][35]

Tipo de Batería	Densidad Energética [Wh/kg]	Ciclos de vida	Eficiencia de Carga/Descarga [%]	Potencia Específica [W/kg]	Costo [\$/kWh]
Ion-Litio (Li-ion)	150-250	3.000-5.000	85-95	250-340	350-600
Plomo-Ácido	30-50	300-500	70-85	180-250	50-150
Sodio-Azufre (Na-S)	100-150	2.500-4.500	75-85	150-230	400-700
Flujo Redox de Vanadio (VRFB)	10-30	10.000-15.000	65-75	10-30	500-800
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	40-60	1.500-3.000	60-70	150-180	400-600

3.3.4 Ventajas, Desventajas y aplicaciones de los BESS

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS) destacan por su alta eficiencia en la conversión de energía, rápida capacidad de respuesta y versatilidad para proveer servicios auxiliares clave, como la regulación de frecuencia y la reserva de energía para emergencias [34]. Estas características los hacen adecuados tanto para redes eléctricas como para sistemas aislados y microrredes.

Sin embargo, los BESS presentan desafíos importantes, como sus altos costos iniciales de instalación, la necesidad de mantenimiento periódico, la degradación de su capacidad de almacenamiento con el tiempo y los desafíos ambientales asociados al reciclaje de sus componentes [31][33].

En cuanto a sus aplicaciones, los BESS son esenciales para estabilizar redes eléctricas, mitigar peaks de demanda y almacenar energía en períodos de baja generación. Además, son clave en sistemas aislados y en entornos críticos como hospitales y centros educativos, donde garantizan la continuidad del suministro eléctrico y optimizan el uso de la energía disponible [31].

En la figura 3.3, se presentan los principales servicios auxiliares que pueden proveer los BESS, mientras que el desglose de los costos asociados con su implementación se encuentra detallado en la [figura A.7](#) del [Anexo A.5](#).

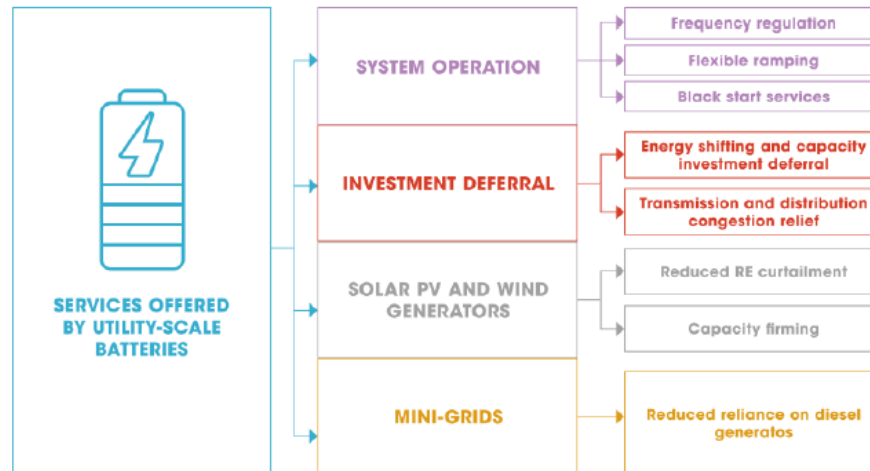


Fig. 3.3 Servicios auxiliares proveídos por BESS [34]

3.4. Criterios de Selección de Sistemas de Almacenamiento

La selección de un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) implica considerar criterios clave que aseguren su eficiencia, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental en el contexto del proyecto educativo. Estos criterios se agrupan en tres categorías principales: técnicos, económicos y ambientales.

- **Criterios Técnicos y Operativos:** Aseguran que el sistema tenga la capacidad adecuada para responder a la demanda energética crítica, mantener operativas cargas esenciales y adaptarse a variaciones de consumo. Además, se debe garantizar un uso eficiente de la energía almacenada, maximizando los ciclos de carga y descarga para prolongar la vida útil de las baterías [31][33].
- **Criterios Económicos:** Evalúan el costo total de propiedad (TCO) y el retorno de la inversión (ROI) para determinar la viabilidad financiera a largo plazo [34].
- **Criterios Ambientales y Normativos:** Consideran el impacto ambiental, la sostenibilidad en la fabricación y reciclaje, así como el cumplimiento de regulaciones locales e internacionales [33].

A continuación, en Tabla 3.4 se presenta un resumen con los criterios clave de selección de diferentes tecnologías de baterías utilizadas en sistemas BESS. La tabla evalúa el desempeño de cada tipo de batería en términos de capacidad y potencia, eficiencia energética, tiempo de respuesta, costo total de propiedad (TCO), impacto ambiental y compatibilidad con fuentes renovables.

Tabla 3.4 Comparación de Tecnologías de Baterías para BESS [31][32][35]

Criterio	Ion-Litio	Plomo-Ácido	Sodio-Azufre	Flujo Redox	Níquel-Cadmio
Capacidad y Potencia	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
Eficiencia Energética	85-95%	70-85%	75-90%	65-75%	60-70%
Tiempo de Respuesta	Milisegundos	Segundos	Segundos	Segundos	Segundos
TCO	Alto	Bajo	Moderado	Alto	Alto
Impacto Ambiental	Bajo	Moderado	Alto	Moderado	Alto
Compatibilidad con Fuentes Renovables	Alta	Moderada	Alta	Alta	Baja

En resumen, las baterías de ion-litio se postulan como una de las opciones más adecuadas en aplicaciones de respaldo en sistemas BESS, especialmente cuando se combinan con sistemas fotovoltaicos [36]. Su alta capacidad de ciclos de carga y descarga, junto con su eficiencia energética superior, las convierte en una gran solución para ser utilizadas en centros educativos que requieren un uso confiable tanto diario como en situaciones donde el suministro eléctrico no esté disponible.

Además, las baterías de Litio-Fosfato de Hierro (LiFePO₄) destacan por su estabilidad y seguridad [36], lo que asegura una operación segura y confiable incluso bajo condiciones de alta demanda. El rápido tiempo de respuesta de estas baterías permite que el sistema de respaldo entre en operación de forma casi instantánea ante un corte de energía, lo cual es un requisito fundamental para garantizar la continuidad de las actividades en un centro educativo.

Por estas razones, las baterías de ion-litio son ampliamente recomendadas para sistemas de respaldo, no solo por su compatibilidad para ser integradas con sistemas fotovoltaicos, sino también por su capacidad para maximizar el rendimiento y minimizar los costos operativos a largo plazo [36].

3.5. Integración de Sistemas de Almacenamiento con Sistemas Fotovoltaicos

La integración de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) con sistemas fotovoltaicos (PV) proporcionan una gran alternativa para mejorar la gestión energética, incrementar

la eficiencia y garantizar la continuidad del suministro eléctrico en diversas aplicaciones [34]. Esta combinación permite almacenar el exceso de energía generado durante los períodos de alta irradiación solar, además de tener la posibilidad de poder cargarse con energía de la red eléctrica, lo que aumenta la confiabilidad y resiliencia energética, aspectos que son críticos en sectores como el educativo, industrial y residencial [31].

3.5.1 Beneficios de la Integración de BESS con Sistemas Fotovoltaicos

La integración de los sistemas BESS con sistemas fotovoltaicos permite optimizar el aprovechamiento de la energía solar generada, especialmente en contextos donde las fluctuaciones diarias y estacionales de irradiación afectan la estabilidad del suministro energético. Estos sistemas permiten almacenar el exceso de energía generada durante el día para su uso en momentos de mayor demanda o durante la noche, reduciendo así la dependencia de la red eléctrica y evitando el desperdicio de energía renovable no utilizada [37].

En aplicaciones críticas como centros educacionales, hospitales o instalaciones industriales, la capacidad de los BESS para proporcionar energía de respaldo mejora significativamente la resiliencia del sistema frente a eventuales fallas en la red [32]. Esto asegura la continuidad de las operaciones y minimiza el impacto de los cortes de energía en actividades críticas.

3.5.2 Dimensionamiento y Configuración de los BESS

El dimensionamiento adecuado de los BESS en un sistema PV es esencial para asegurar que el sistema pueda cumplir con las necesidades energéticas específicas del sitio. A continuación, se detallan los pasos y consideraciones clave.

A. Capacidad de Almacenamiento

La capacidad del BESS debe ser suficiente para cubrir la demanda energética durante los períodos sin generación solar, considerando tanto la energía consumida por las cargas ya sea diaria o un promedio del consumo anual, así como también los peaks de demanda. Esto implica calcular el almacenamiento necesario para varios escenarios de uso, como días nublados o temporadas de baja irradiación, por ende, se deberá tener en consideración el peor escenario para dimensionar este sistema y no subdimensionarlo, con la finalidad de evitar problemas en la operación del sistema de gestión de energía. También es necesario ajustar la capacidad según el estado de carga (SoC) y la profundidad de descarga (DoD) para optimizar la vida útil de las baterías.

En el punto 2.4.4 del presente informe, se presentó la ecuación (2.2) que indica la fórmula para

calcular la capacidad de almacenamiento necesaria de las baterías en un proyecto fotovoltaico.

B. *Potencia de Descarga*

La potencia de descarga de un BESS define la capacidad del sistema para suministrar energía a una tasa específica durante los peaks de demanda. Esta potencia debe dimensionarse en función de los requerimientos del sistema, considerando tanto la capacidad de respuesta inmediata para cubrir variaciones rápidas en el consumo, como la necesidad de proporcionar energía de respaldo en caso de fallas en la red [37].

Para dimensionar la potencia de descarga, se puede utilizar la ecuación (3.1), presentada a continuación:

$$P_{descarga} = V * I_{m\acute{a}x} \quad (3.1)$$

donde,

$P_{descarga}$: Potencia de descarga [kW],

V : Voltaje nominal del sistema de baterías [V], y

$I_{m\acute{a}x}$: Corriente máxima de descarga que puede suministrar la batería [A].

Esta relación indica que la potencia de descarga es directamente proporcional al voltaje del sistema y la corriente máxima que puede entregar el BESS. Para asegurar un dimensionamiento adecuado, es crucial que la potencia de descarga esté alineada con los peaks de demanda del sistema y con los requisitos de potencia de los equipos críticos que necesitan respaldo energético [37].

La eficiencia de los inversores y otros componentes también afectan a la potencia útil entregada por el BESS. Al dimensionar la potencia de descarga, es recomendable incluir un factor de corrección para las pérdidas de eficiencia del sistema.

C. *Selección del Tipo de Batería*

Las baterías de ion-litio son generalmente la opción más utilizada para sistemas integrados PV-BESS debido a su alta densidad energética, eficiencia en la conversión de energía y ciclos de vida prolongados [32]. Sin embargo, dependiendo del contexto y los costos, pueden considerarse otras tecnologías como las baterías de flujo redox, que ofrecen ventajas en términos de escalabilidad y seguridad operativa, o las baterías de sodio-azufre, conocidas por su capacidad para aplicaciones a

gran escala [38].

Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para la implementación de sistemas BESS en conjunto con sistemas fotovoltaicos, se presentan en el [Anexo A.9](#).

3.6. Casos de Estudio y Aplicaciones en Centros Educativos

La implementación de sistemas fotovoltaicos (PV) combinados con sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) en centros educativos ofrece una solución efectiva para reducir los costos energéticos, mejorar la resiliencia de la red y apoyar las iniciativas de sostenibilidad. Los centros educativos son entornos ideales para estas instalaciones debido a sus patrones de consumo predecibles y su capacidad para incorporar la educación sobre energías renovables. A continuación, se presentan tres casos de estudio que destacan los beneficios y desafíos de integrar sistemas PV con BESS en instituciones educativas.

3.6.1 Casos de Estudio

A. Sistema BESS en un Campus Universitario en India

El estudio realizado en [24] evalúa la planificación de un sistema BESS en un campus universitario en la India, donde la integración de baterías de iones de litio con un sistema fotovoltaico permitió no solo la reducción de costos energéticos, sino también una mejora significativa en la estabilidad de la red interna del campus. Este proyecto optimizó la gestión de la energía, logrando una reducción de la dependencia de la red convencional y permitiendo al campus operar de manera más autónoma durante períodos de alta demanda.

B. Sistema PV con BESS en una Escuela Primaria en Indonesia

El estudio realizado en [28] describe la instalación de un sistema fotovoltaico con BESS en una escuela primaria de Yakarta, Indonesia. Este sistema no solo ayudó a reducir un 51,6% los costos de electricidad, sino que también proporcionó una plataforma educativa para que los estudiantes aprendieran sobre energías renovables. Los resultados mostraron una mejora en la continuidad del suministro eléctrico durante las horas peak de demanda, lo que es crucial en un contexto donde las interrupciones son comunes.

C. *Dimensionamiento Óptimo de BESS en Plantas Solares en Áreas Remotas*

En el estudio realizado en [38] se examina la optimización del dimensionamiento de un sistema BESS para plantas solares en áreas remotas, lo cual es aplicable a centros educativos que estén ubicados en regiones aisladas. Este trabajo destaca cómo un adecuado dimensionamiento y configuración del BESS puede maximizar el uso de la energía solar disponible, reduciendo las pérdidas y garantizando un suministro constante y confiable para las operaciones del día a día.

Comparando estos tres casos de estudio, se observa que todos lograron importantes reducciones en los costos energéticos y mejoras en la resiliencia de sus sistemas eléctricos. Los resultados muestran que los sistemas PV con BESS son efectivos para reducir la dependencia de la red y ofrecer una fuente de energía más sostenible y confiable. Los factores clave para el éxito incluyen el dimensionamiento adecuado del sistema y la integración efectiva con las infraestructuras existentes.

Estos casos de estudio subrayan la efectividad y la relevancia de integrar sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía en baterías en centros educativos. La combinación de PV y BESS no solo contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental de las instituciones, sino que también tiene un impacto educativo significativo.

3.7. Desafíos y Tendencias Futuras en Sistemas de Almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento de energía enfrentan varios desafíos clave, especialmente en su integración con sistemas fotovoltaicos en entornos educativos. Los costos iniciales elevados y la necesidad de un mantenimiento continuo afectan la viabilidad de estos sistemas [32], además, las barreras regulatorias y normativas, junto con limitaciones técnicas como la eficiencia de carga/descarga y la adaptación a la demanda variable [33], complican su adopción.

En cuanto a las tendencias futuras, se espera que el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, como las de estado sólido, mejoren la densidad energética y la seguridad, reduciendo así los costos operativos [31]. Los avances en la gestión inteligente de energía, mediante inteligencia artificial y machine learning, optimizarán el uso de los SAE [34]. También, la sostenibilidad y el reciclaje de baterías están tomando relevancia, mediante normativas que fomentan prácticas más ecológicas para el término de la vida útil de las baterías [35]. Además, la integración con redes inteligentes y microrredes presentan oportunidades para mejorar la resiliencia y eficiencia de los sistemas eléctricos, lo que contribuirá a la viabilidad de la implementación de estos proyectos en centros educativos.

4. Escuela Colonia Árabe

En este capítulo se presenta un análisis detallado del contexto y las condiciones energéticas de la Escuela Colonia Árabe de Los Ángeles, Chile, seleccionada como caso de estudio en el marco del Proyecto FONDECYT N° 11240683: Classroom Retrofit [39]. Se examinarán las características de la infraestructura, el consumo eléctrico de la escuela y de una sala de clases piloto. Además, se identificarán las cargas críticas que requieren respaldo en caso de fallas en el suministro eléctrico. También se mostrarán los datos climáticos de la zona, que influyen en el rendimiento energético y en el diseño del sistema de gestión de energía y, por último, se entregará información sobre el plan regulatorio de la zona.

4.1. Introducción

Esta memoria de título se enmarca en el Proyecto FONDECYT N°11240683: Classroom Retrofit: “Evaluar el potencial de transformar las escuelas existentes en entornos saludables y de alto rendimiento como una respuesta urgente a un clima cambiante”, cuyo objetivo es evaluar y mejorar las condiciones energéticas y estructurales de un conjunto de escuelas públicas en Chile. Estas escuelas presentan deficiencias en su infraestructura general, propias de su diseño y construcción original, por lo que han sido seleccionadas para analizar su situación actual y proponer soluciones de mejora.

En este contexto, la Escuela Colonia Árabe de Los Ángeles, Chile, ha sido elegida caso de estudio para evaluar su infraestructura energética y proponer un sistema de gestión de energía que permita mejorar la continuidad del suministro eléctrico, especialmente en la sala de clases piloto, donde se han implementado diversas intervenciones. Investigaciones previas sobre esta escuela y otras similares han abordado la eficiencia en iluminación y energía en establecimientos educativos, evaluando las condiciones actuales y formulando recomendaciones de mejora energética y resiliencia ante situaciones críticas [40][41][42].

Además, esta escuela desempeña un rol fundamental dentro de la comunidad, ya que está designada como albergue en situaciones de emergencia y también funciona como local de votaciones, lo que hace aún más relevante la evaluación de su infraestructura energética. Garantizar la disponibilidad y continuidad del suministro eléctrico en estos casos es clave para el funcionamiento del albergue, reforzando la necesidad de contar con un sistema de gestión energética eficiente que soporte tanto las actividades cotidianas de la escuela como su operación en situaciones críticas.

Para cumplir este objetivo se evaluarán diversos factores, tales como:

- Características constructivas y energéticas de la escuela, tomando en consideración las intervenciones realizadas en la sala piloto.
- El comportamiento del consumo energético de la escuela en general y de la sala monitoreada en particular.
- La identificación de las cargas que requieren respaldo para garantizar la continuidad del suministro en caso de fallas.
- Los factores climáticos y urbanísticos de la región, incluidos los datos meteorológicos y el plan regulatorio de la zona, que pueden afectar al rendimiento del sistema.

4.2. Contexto y Características de la Escuela Colonia Árabe

La Escuela Colonia Árabe está localizada en Miguel Gacitúa 885, Los Ángeles, Chile. Esta escuela fue construida por la Sociedad Constructora de Edificios Educativos en el año 1981, la escuela se encuentra a una altitud de 135 [msnm] y posee un RBD 4171, lo que la identifica en los registros oficiales del Ministerio de Educación de Chile [43].

El recinto educacional tiene una superficie total de 10.304 [m^2], de los cuáles 2.635 [m^2] corresponden a superficie construida, con instalaciones distribuidas en pabellones perimetrales y un pabellón central, optimizando el uso del espacio para las actividades académicas y administrativas. En la actualidad, la escuela alberga a 282 estudiantes de nivel educación parvularia y básica, distribuidos en cursos con un promedio de 20 estudiantes por clase. Las clases se imparten bajo la jornada escolar completa, de 08:00 a 16:00 [h], de lunes a jueves, y el viernes de 08:00 a 14:00 [h].

A continuación, en la figura 4.1 se presenta un plano general de la Escuela Colonia Árabe.

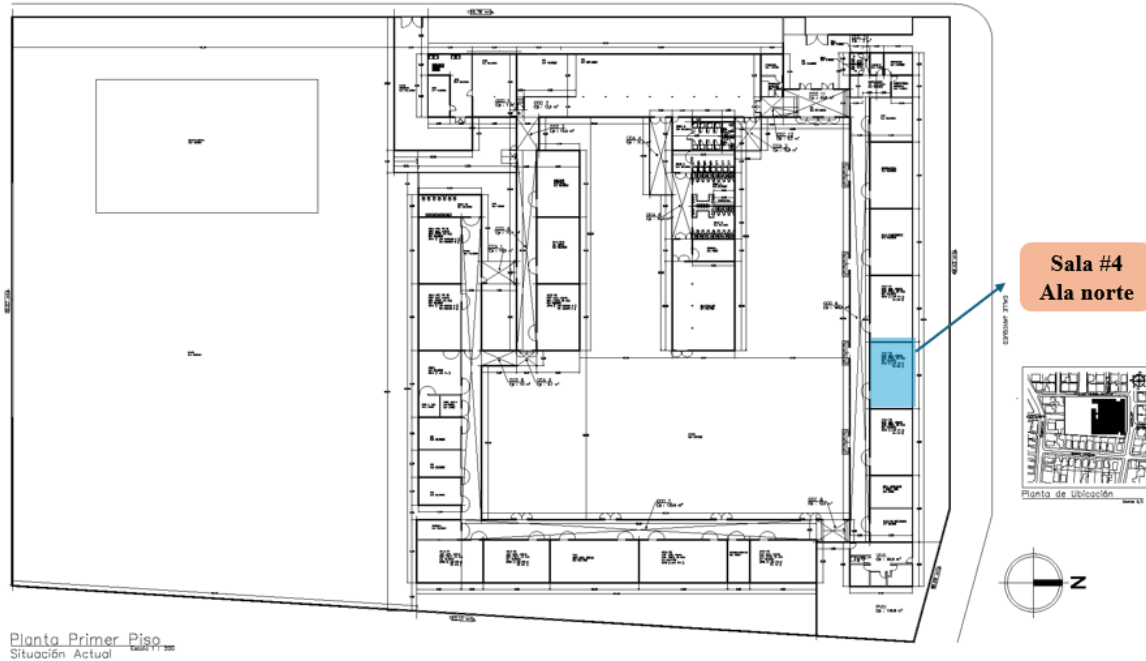


Fig. 4.1 Planta Escuela Colonia Árabe. Fuente: DAEM Los Ángeles.

Entre los principales problemas en la infraestructura se encuentran la falta de aislamiento térmico, lo que genera pérdidas energéticas significativas, y los sistemas de calefacción que dependían en su mayoría de estufas a leña, presentando una problemática a nivel ambiental. Sin embargo, en el año 2022, la escuela implementó una mejora clave al reemplazar las estufas a combustión lenta por sistemas de aire acondicionado, lo que ha mejorado considerablemente el control de la temperatura interior, reduciendo la dependencia de fuentes de calefacción menos eficientes.

Una de las aulas, específicamente la sala #4, ubicada en el pabellón norte, que se visualiza en la figura 4.2, ha sido seleccionada por el proyecto como sala de clases piloto para implementar diversas intervenciones. Estas intervenciones tienen el objetivo de mejorar tanto la eficiencia energética como las condiciones ambientales y de confort dentro del aula.



Fig. 4.2 Vista interior de sala 4 pabellón norte. Fuente: PhD. Andrea Martínez Arias.

Entre las mejoras realizadas en esta sala destacan:

- Cambio de la pintura del techo, lo que mejora la reflexión de la luz y regula las condiciones térmicas
- Instalación de repisas solares en el exterior, las cuales mejoran la captación de luz solar que ingresa a la sala de clases, disminuyendo el uso de luz artificial.
- Instalación de sensores ambientales que monitorean humedad, la concentración de CO_2 y la temperatura interior, con el fin de garantizar un ambiente saludable.
- Instalación de sensores eléctricos para monitorear el consumo energético de los equipos presentes en la sala, como las luminarias y los dispositivos electrónicos utilizados por los estudiantes y profesores.

Esta sala de clases piloto alberga a un promedio de 20 estudiantes durante la jornada escolar completa. Los sensores instalados en el aula han sido fundamentales para recolectar datos precisos sobre las condiciones ambientales y el consumo energético. Estos datos permiten evaluar no solo el impacto de las intervenciones en términos de eficiencia energética y ambiental, sino que también han sido cruciales para generar las curvas de consumo energético de la sala, que se analizarán en detalle en la sección 4.3. Esta información facilita la toma de decisiones para replicar estas mejoras en otras áreas de la escuela y mejorar el uso de energía en todo el establecimiento.

4.3. Análisis del Consumo Energético

En esta sección se presenta un análisis detallado del consumo energético de la Escuela Colonia Árabe, tanto a nivel general como específico en la sala de clases piloto. Los datos recolectados a través de las mediciones realizadas por los sensores instalados permiten identificar los patrones de consumo diario y mensual, lo que es fundamental para diseñar un sistema de gestión energética eficiente.

Adicionalmente, se obtuvieron datos complementarios sobre el tiempo de uso de las cargas presentes en la sala de clases piloto, consultando con funcionarios de la escuela [44], quienes proporcionaron esta información relevante que ha sido clave para completar el análisis energético y determinar las cargas que tienen un mayor uso e impacto en el consumo de la sala.

4.3.1 Consumo Energético General de la Escuela

El análisis del consumo energético general de la Escuela Colonia Árabe se realizó a partir de los registros mensuales de consumo eléctrico durante los años 2018 al 2023, obtenidos de las facturas de electricidad proporcionadas por la administración del establecimiento educacional. Estos datos fueron ordenados en un gráfico que se presenta en la figura 4.3, en dónde se observan las curvas de consumo energético mensual de los años 2018 al 2023 y además se visualiza el promedio del consumo anual de cada año.

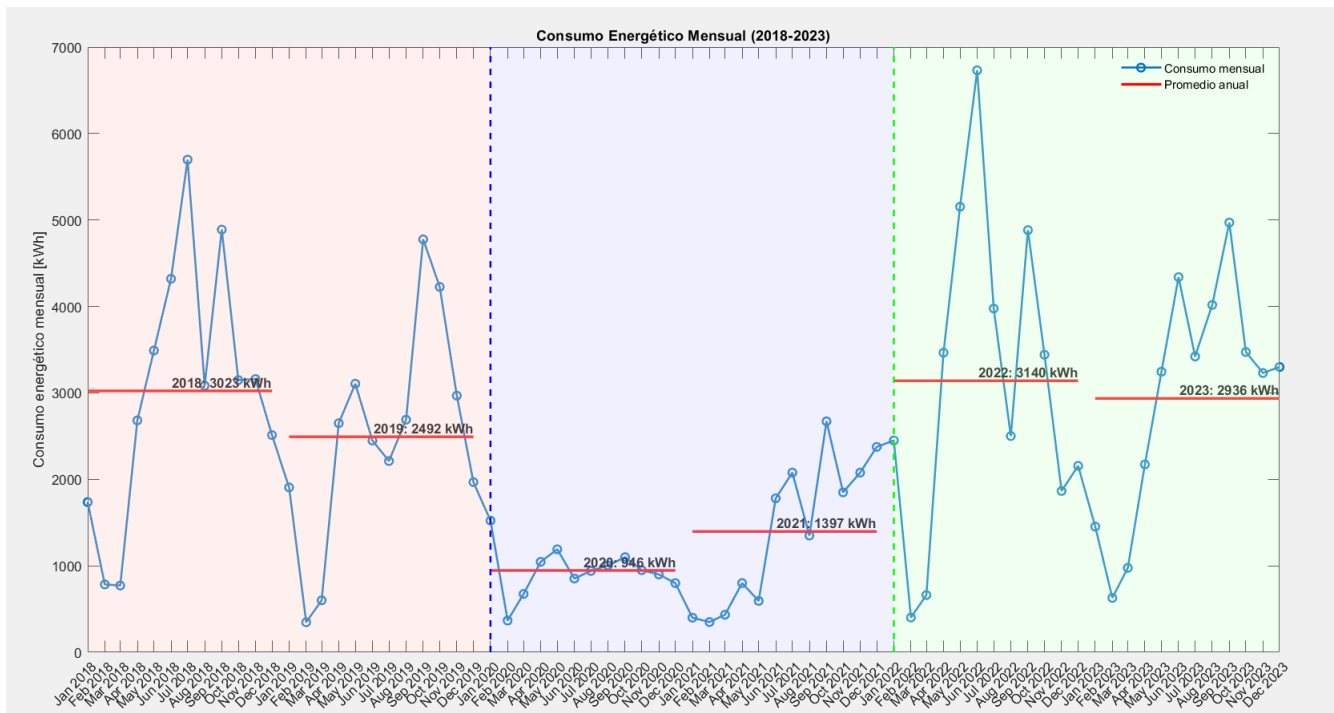


Fig. 4.3 Consumo Energético General (2018-2023) Fuente: Elaboración propia.

De la figura 4.3 es posible visualizar claramente 3 períodos, de los cuáles se puede realizar un análisis de las formas de curva para cada uno de estos períodos.

Pre-pandemia (2018-2019): Durante este período, la escuela operó con normalidad bajo una doble jornada de clases, estableciendo así un perfil de demanda energética que sirve como línea base para los consumos esperados en los años siguientes. El consumo es bajo en los meses de verano debido a las vacaciones, con las luminarias nocturnas de seguridad como principal carga activa. A medida que avanza el año, el consumo aumenta por la baja en las temperaturas y menor iluminación natural, alcanzando su peak en julio. En agosto, el consumo disminuye por las vacaciones de invierno y vuelve a aumentar en septiembre con el retorno a las actividades escolares. Hacia fin de año, la demanda se reduce gradualmente con la llegada del verano y las vacaciones. Este patrón regular proporciona una referencia confiable para identificar los consumos futuro bajo condiciones normales de operación.

Período de pandemia (2020-2021): La pandemia de COVID-19 en 2020 provocó un cierre temporal de las instalaciones y la suspensión de las clases presenciales, lo que generó una reducción significativa en la demanda energética en comparación con los años 2018 y 2019. Las cargas activas durante este período se limitaron principalmente al consumo de luminarias para seguridad nocturna y algunos equipos de mantenimiento esenciales, lo que explica el aplanamiento y disminución de la curva de demanda.

En 2021, se inició un retorno gradual a las clases presenciales con jornadas reducidas y una ocupación parcial de las instalaciones, lo que generó un aumento leve en el consumo energético respecto al año anterior. Sin embargo, la demanda no siguió los patrones normales de los años 2018 y 2019, debido a las restricciones de aforo y la menor utilización de equipos eléctricos. Aunque la forma de la curva del 2021 es similar a la de los años pre-pandemia, su magnitud disminuyó en aproximadamente un 50% por el uso limitado de las instalaciones y de los equipos.

Período Post-pandemia (2022-2023): En 2022, la escuela Colonia Árabe retomó la jornada escolar completa con la vuelta de estudiantes, profesores y funcionarios. Este año se reemplazaron las estufas a leña por aires acondicionados de 2,8 [kW], lo que generó un aumento significativo en la demanda energética. Aunque se realizaron mejoras energéticas, como mejoras en cableado e infraestructura energética e instalación de ventanas termo panel que ayudaron a compensar parte de este consumo, se registró el peak de consumo máximo en mayo de 2022, con 6.731 [kWh], el más alto del período 2018-2023.

En 2023, la demanda energética siguió la línea base de los años 2018 y 2019, con un consumo bajo durante los meses de verano, sin cambios significativos tras la implementación de los sistemas

HVAC. El consumo aumentó en los meses de invierno, posteriormente, tuvo una caída en las vacaciones en julio, teniendo un último repunte en el mes de septiembre. Además, a principios del año 2024 se realizó la instalación de repisas solares y se pintó el cielo de la sala #4.

4.3.2 Consumo Energético de la Sala de Clases Piloto

El análisis del consumo energético de la sala de clases piloto se realizó mediante una combinación de datos recolectados por los sensores eléctricos instalados en el aula y la información proporcionada por funcionarios de la escuela, quienes aportaron detalles sobre la frecuencia de uso de ciertas cargas durante las clases. Cabe destacar que en la sala se encuentra instalado una estación de monitoreo de consumo energético o “submeter”, con capacidad para medir variables eléctricas clave, como corriente y potencia, a través de 6 entradas para sensores. Este dispositivo registra mediciones horarias que son almacenadas en un servidor local y enviadas a la nube, permitiendo su análisis posterior. Adicionalmente, se llevó a cabo una visita a terreno para revisar la infraestructura de la sala e identificar todas las cargas presentes junto con sus potencias nominales.

A continuación, en Tabla 4.1 se resumen las principales cargas presentes en la sala, las horas de uso y su contribución al consumo total diario.

Tabla 4.1 Cargas - Equipos Eléctricos - Sala 4. Fuente: Elaboración propia con datos de [44].

Carga	Cantidad	Potencia Nominal [W]	Horas de uso [h]	Consumo Diario [kWh]	Consumo Mensual [kWh]	Proporción del Consumo Energético [%]
HVAC	1	3.150	7	22,05	485,1	77,76
Iluminación fluorescente	4	72	7	2,016	44,35	7,11
Computador	1	180	5	0,9	19,8	3,17
Proyector	1	200	5	1,0	22	3,53
Pizarra Digital	1	300	5	1,5	33	5,29
Parlantes	1	100	4	0,4	8,8	1,41
Sensores ambientales - energéticos	1	15	24	0,36	10,8	1,73
Total	-	4.017	-	28,226	623,85	100

De acuerdo con Tabla 4.1 se desprende que el HVAC representa la mayor contribución al consumo energético diario, especialmente durante los meses de invierno, con un total de 485,1 [kWh] al mes. Este equipo es fundamental para mantener un ambiente confortable durante las jornadas escolares, pero al mismo tiempo tiene un impacto significativo en el consumo mensual, presentando un consumo energético del 77,76% del total de las cargas de la sala.

La iluminación funciona de manera continua durante toda la jornada escolar y representa una parte importante del consumo constante del aula, correspondiente al 7,11%. Si bien los sensores están funcionando las 24 horas del día, representan solamente un 1,73% del consumo energético de la sala de clases debido a su bajo consumo que presentan cada uno de ellos. Otros equipos, como el proyector, la pizarra digital y los parlantes, se utilizan de forma limitada, principalmente durante clases específicas o actividades docentes.

En la figura 4.4 se muestra un gráfico en dónde se diferencia el consumo energético diario entre un día típico de invierno y un día de verano, con la finalidad de analizar la variabilidad en el consumo.

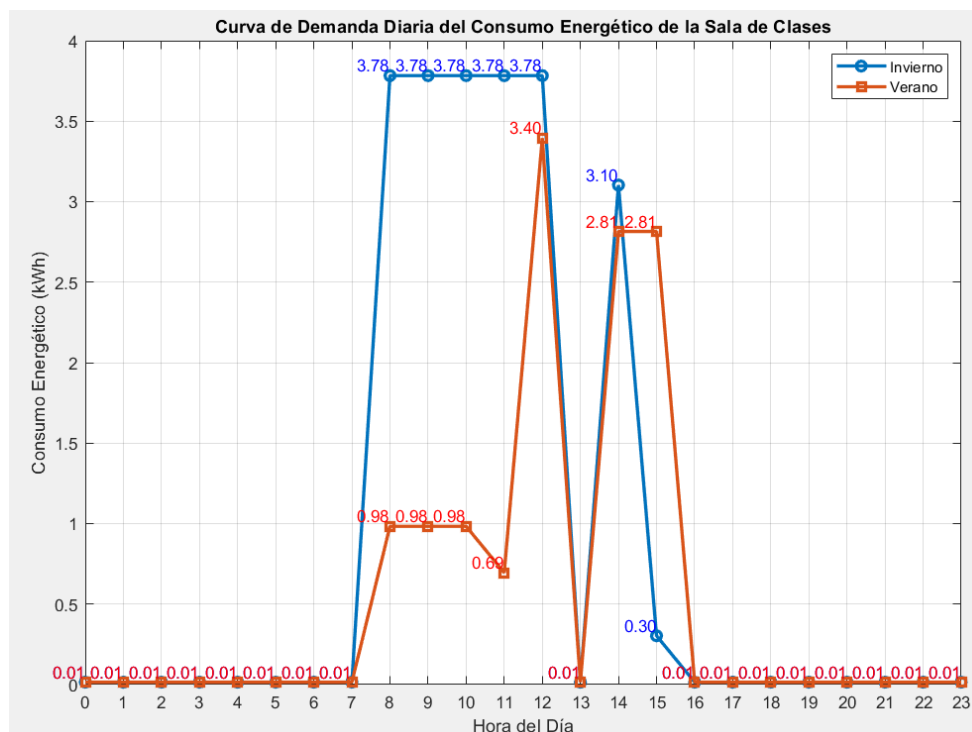


Fig. 4.4 Curva de demanda diaria invierno y verano. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de la figura 4.4 muestra claramente cómo en un día típico de invierno se tiene una mayor demanda energética debido a la necesidad de climatización y mayor iluminación durante los

días más cortos. En contraste, en verano la demanda es menor a un día de invierno, ya que existe mayor iluminación natural, además los peaks de consumo se producen más tarde en el día, esto debido al uso del HVAC en este horario. Esto destaca la variabilidad estacional del consumo y la necesidad de gestionar la demanda en los meses fríos, donde el sistema enfrente mayores exigencias.

4.3.3 Identificación de Cargas Prioritarias

Para garantizar la continuidad del suministro energético en caso de interrupciones eléctricas, se han identificado las cargas prioritarias de la sala de clases piloto. Estas cargas fueron seleccionadas por su impacto directo en las actividades escolares esenciales y en el funcionamiento del aula, con la finalidad de no interrumpir estas actividades durante fallas en el suministro eléctrico. La selección de estas cargas además fue validada mediante una consulta a la directora del establecimiento, quien indicó cuáles son las cargas más relevantes para proseguir con las actividades escolares.

Las cargas prioritarias de la sala de clases piloto son las siguientes:

- Iluminación: La iluminación es fundamental para mantener una buena visibilidad en la sala durante toda la jornada escolar, lo que garantiza el desarrollo de actividades pedagógicas en cualquier momento del día, especialmente durante días con baja iluminación natural.
- Computador: El computador es esencial para las actividades educativas y administrativas de los docentes. Su funcionamiento es crítico para la continuidad del aprendizaje, ya que se utiliza para presentar contenidos y gestionar las clases.
- Proyector: El proyector complementa el uso del computador al permitir la visualización de contenidos para los estudiantes. Es prioritario ya que facilita la enseñanza interactiva y visual, mejorando el proceso educativo.
- Pizarra Digital: La pizarra digital es utilizada en actividades pedagógicas interactivas, contribuyendo a un aprendizaje dinámico y participativo. Su continuidad es crucial para mantener el flujo normal de la clase.
- Sensores Ambientales – Energéticos: Los sensores permiten monitorear variables ambientales como la concentración de CO_2 , temperatura y humedad, además de valores energéticos que se monitorean constantemente. Estos datos son enviados constantemente a un servidor, por lo tanto, que el suministro eléctrico sea constante para esta carga es fundamental para no perder estos datos en un momento dado.

Ahora, en la figura 4.5 se presenta la curva de demanda diaria para días típicos de invierno y

verano, considerando únicamente las cargas prioritarias. Estas curvas ayudan a planificar la capacidad del sistema BESS al identificar las horas críticas en las que las cargas prioritarias requieren respaldo ante una falla en el suministro eléctrico.

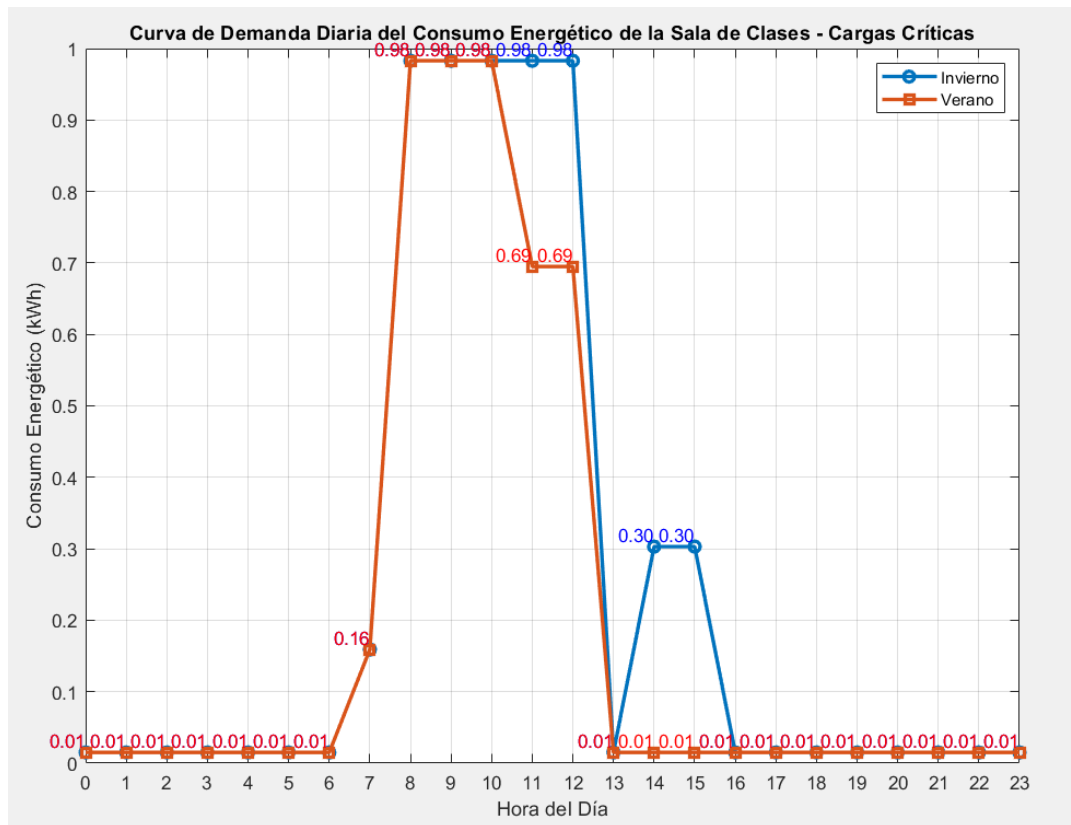


Fig. 4.5 Curvas de demanda cargas críticas. Fuente: Elaboración propia.

Esta curva de demanda diaria revela patrones de consumo energético similares entre invierno y verano, con diferencias marcadas principalmente por el uso de la iluminación. En ambas estaciones, el funcionamiento continuo de dispositivos electrónicos y sensores ambientales mantiene una demanda significativa, esencial para las actividades escolares y el monitoreo del aula. Sin embargo, en invierno, la mayor necesidad de iluminación artificial debido a la menor disponibilidad de luz natural eleva el consumo en comparación con el verano, esto se ve marcado en el horario de la tarde, que marca la diferencia con el consumo diario en verano. Aunque en verano se reduce ligeramente la demanda en ciertos momentos del día, el uso constante de equipos electrónicos mantiene niveles de consumo importantes. Esta variabilidad estacional destaca la importancia de una gestión energética eficiente mediante el sistema BESS, asegurando el respaldo adecuado de las cargas prioritarias para garantizar la continuidad de las actividades escolares ante posibles interrupciones en el suministro.

En la figura 4.6 se presenta el consumo mensual de estas cargas a lo largo del año. Este gráfico

permite visualizar las variaciones estacionales y resalta los momentos de mayor demanda energética. Esta información es clave para el diseño de un sistema de respaldo eficiente, ya que identifica los períodos del año en los que el sistema BESS deberá gestionar una mayor carga.

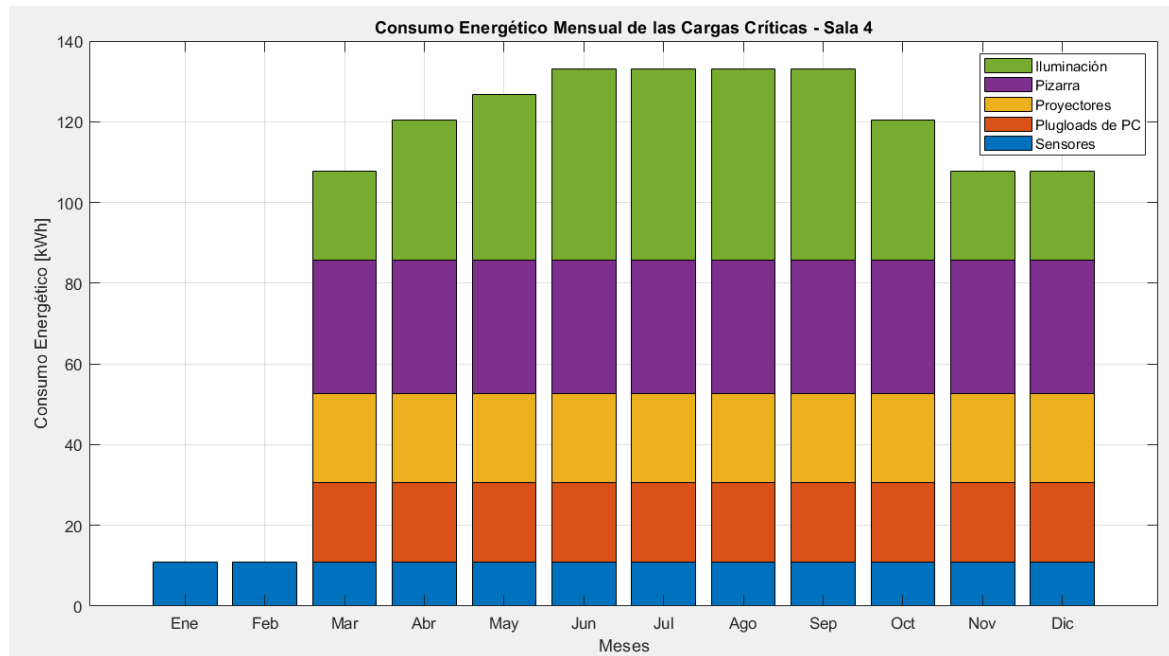


Fig. 4.6 Consumo energético mensual cargas críticas - sala 4. Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.6 refleja cómo la demanda energética mensual varía principalmente en función del uso de la iluminación, ya que el uso de dispositivos electrónicos como computadores, proyectores y sensores se mantiene relativamente constante durante todo el año. Los meses de invierno muestran un ligero aumento en el consumo debido a la menor disponibilidad de luz natural, lo que requiere un mayor uso de la iluminación.

Por otro lado, en los meses de verano y primavera, el consumo disminuye ligeramente al no ser necesario el uso constante de iluminación, aunque las cargas electrónicas continúan operando con regularidad.

La selección de estas cargas garantiza que las actividades esenciales en la sala de clases puedan continuar de forma normal durante cortes eléctricos. Además, esta información es fundamental para diseñar un sistema de respaldo eficiente, permitiendo al sistema BESS operar de manera adecuada. Asegurar el suministro a estas cargas prioritarias evitará interrupciones críticas en las actividades escolares, garantizando que la enseñanza y el monitoreo ambiental continúen sin inconvenientes, incluso en situaciones de emergencia.

4.4. Datos Climáticos y Orientación

La ciudad de Los Ángeles, Chile, presenta un clima mediterráneo, caracterizado por veranos cálidos e inviernos fríos y lluviosos, lo que influye significativamente en el rendimiento del sistema fotovoltaico y el almacenamiento energético [27]. En la figura 4.7 se presenta un gráfico que ilustra los valores mensuales de radiación solar horizontal e inclinada junto con la temperatura promedio a largo del año en esta ciudad.

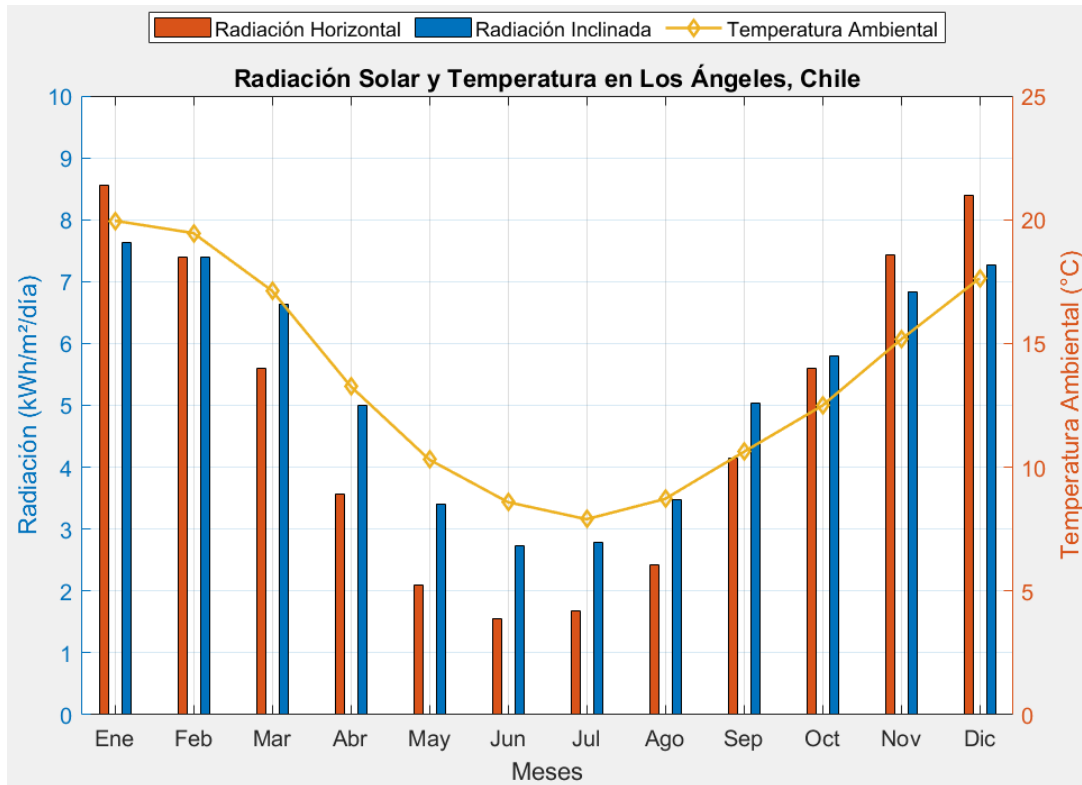


Fig. 4.7 Radiación solar y temperatura en Los Ángeles, Chile. Fuente: Elaboración propia, basado en datos de [22].

En la figura 4.7 se muestra cómo la radiación solar y la temperatura varían a lo largo del año, reflejando los patrones estacionales típicos de la región. Los valores más altos de radiación solar se concentran en los meses de verano (enero y febrero), alcanzando valores de $8,56 [kWh/m^2/día]$ en radiación horizontal y $7,63 [kWh/m^2/día]$ en radiación inclinada. Esto sugiere que existe un gran potencial de generación fotovoltaica en esta temporada, permitiendo la carga eficiente del sistema BESS.

En contraste, durante el invierno (junio y julio), los niveles de radiación disminuyen significativamente, registrando valores mínimos de $1,56 [kWh/m^2/día]$ en radiación horizontal y $2,73 [kWh/m^2/día]$ en radiación inclinada. Estas condiciones exigen una gestión eficiente del

almacenamiento energético para garantizar el suministro a las cargas prioritarias, debido a la baja generación fotovoltaica que se tendrá en este período.

Por otro lado, las temperaturas varían de manera consistente con las estaciones del año. En verano, las temperaturas promedio alcanzan los 19-20 [°C], con máximas de hasta 39 [°C] [23], lo que puede afectar ligeramente la eficiencia de los módulos solares debido al sobrecalentamiento [27]. En invierno, las temperaturas promedio descienden a 7-9 [°C], favoreciendo el rendimiento de los paneles [27], pero limitando la capacidad de descarga de las baterías.

Para maximizar la generación solar, los paneles deben orientarse hacia el norte geográfico (0° N), que es la orientación óptima en el hemisferio sur [26]. El ángulo de inclinación óptimo es cercano a la latitud del lugar [26], para el caso de Los Ángeles, Chile es aproximadamente 37°, proporcionando un rendimiento balanceado durante todo el año.

El análisis de los datos climáticos de la ciudad de Los Ángeles permite identificar los patrones estacionales que influyen en la generación solar y la eficiencia del sistema fotovoltaico. La correcta orientación e inclinación de los paneles garantiza un rendimiento adecuado durante todo el año, mientras que la gestión eficiente del sistema BESS es fundamental para asegurar el suministro energético durante los meses de menor radiación solar.

4.5. Plan regulador de la zona

El plan regulador comunal de Los Ángeles [45] establece las normativas urbanísticas que rigen el uso del suelo, la altura de las edificaciones y otras características constructivas esenciales para el desarrollo de proyectos dentro de la ciudad. Este plan divide la ciudad en distintas zonas con criterios específicos, y la Escuela Colonia Árabe se encuentra ubicada en la zona ZH-4.

En la zona ZH-4 se permite el uso del suelo para fines residenciales y educacionales, mientras que las actividades comerciales y de servicios están sujetas a restricciones específicas. Esto garantiza que las nuevas edificaciones en el área sean coherentes con el entorno educativo y no generen interferencias significativas en las actividades de la escuela.

Respecto a la altura de las edificaciones, el plan regulador establece una altura máxima de 10,5 [m] para construcciones ubicadas frente a vías con un ancho superior a 15 [m], y una altura máxima de 7 [m] para edificaciones frente al resto de las vías. Estas restricciones son fundamentales para proteger la exposición solar de los paneles fotovoltaicos, evitando la generación de sombras que podrían reducir su eficiencia. Estas condiciones se observan en la figura 4.8.

CONDICIONES DE EDIFICACIÓN, SUBDIVISIÓN Y URBANIZACIÓN	
Superficie predial mínima	300 m ² para vivienda. 600 m ² para otros usos.
Coefficiente máximo de ocupación*	0,6 para vivienda. 0,4 para otros usos.
Sistema agrupamiento	Aislado, pareado o continuo. Aislado sobre edificación continua, sólo en Barrio Centro ¹ .
Altura máxima de continuidad ²	10.50 m frente a vías con ancho superior a 15 m; 7.00 m frente al resto de las vías.
Longitud máxima de continuidad ³	60% del deslinde común
Adosamiento	Sólo en uso habitacional.
Profundidad mínima de adosamiento	No se exige ⁴ .
Distancia mínima a medianeros	Según lo estipulado en la O.G.U.C.
Antejardín mínimo	5.00 m frente a vías con un ancho superior a 20 m; 3.00 m resto de las vías. Para Barrio Centro, según lo estipulado en el artículo 19 de la presente ordenanza ⁵ .
Sistema agrupamiento	Aislado, pareado o continuo. Aislado sobre edificación continua, sólo en Barrio Centro ⁶ .
Densidad Máxima*	120 Hab/há para vivienda unifamiliar; 400 Hab/há para edificios colectivos.

Fig. 4.8 Condiciones de edificación zona ZH-4 [45]

Las restricciones de altura en la zona ZH-4 son esenciales para asegurar que las futuras construcciones no obstruyan la radiación solar necesaria para el correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico de la escuela. Para la instalación de sistemas de gestión energética, paneles solares y sistemas de almacenamiento BESS en la zona ZH-4, es necesario obtener los permisos y aprobaciones pertinentes de las autoridades municipales y urbanísticas locales. Además, podría ser requerida una evaluación de impacto ambiental, especialmente si el proyecto excede ciertos umbrales de capacidad energética o se considera que puede generar algún impacto significativo en el entorno.

El marco regulatorio de la zona ZH-4 establece condiciones claras para el desarrollo del proyecto fotovoltaico en la Escuela Colonia Árabe, asegurando que las construcciones futuras no interfieran con la captación de radiación solar y que las instalaciones propuestas cumplan con las normativas de uso de suelo y altura. La correcta planificación y obtención de permisos garantizará la sostenibilidad del proyecto y su alineación con los objetivos urbanísticos y ambientales de la zona.

5. Dimensionamiento del Sistema de Gestión de Energía

El dimensionamiento del sistema de gestión de energía es fundamental para asegurar un uso eficiente y confiable de los recursos energéticos en la Escuela Colonia Árabe. En este capítulo se determinará la capacidad adecuada de los componentes claves del sistema, tales como los paneles solares, el sistema de almacenamiento de energía (BESS), el inversor y regulador de carga. A partir de los datos climáticos y de consumo recolectados, se establecen criterios de cálculo y se seleccionan los componentes necesarios para el sistema, con la finalidad de garantizar la continuidad del suministro eléctrico a las cargas críticas en diversas condiciones de operación.

5.1. Componentes del Sistema de Gestión de Energía

El proceso de dimensionamiento de un sistema de gestión de energía consiste en definir los componentes necesarios para satisfacer de manera adecuada la demanda energética en condiciones normales y de emergencia. Para el caso de la Escuela Colonia Árabe, se han identificado como componentes principales los paneles fotovoltaicos, el sistema de almacenamiento de energía (BESS) y los inversores. Cada uno de estos elementos será crucial para mejorar la continuidad del suministro eléctrico y aprovechar de manera eficiente la energía solar disponible en la zona.

El dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos tiene como finalidad calcular la cantidad de energía eléctrica que pueden producir a partir de la radiación solar captada durante el día, lo que permitirá cubrir la demanda de las cargas prioritarias de la escuela. Por otra parte, el sistema BESS ayuda a garantizar la disponibilidad de energía durante los períodos de baja generación solar o en casos de interrupciones del suministro eléctrico, proporcionando un respaldo confiable para las cargas críticas. Además, la selección adecuada de los inversores es fundamental para convertir la energía generada en corriente continua a corriente alterna, asegurando su utilización efectiva por parte de los dispositivos y sistemas de la escuela.

En este capítulo se detallan los cálculos y criterios de diseño adoptados para cada componente del sistema, considerando tanto las condiciones climáticas de la región como los requerimientos específicos de las cargas críticas de la escuela. Este enfoque integral busca proporcionar una solución que permita un suministro continuo y eficiente, minimizando el impacto de posibles fallas en el sistema energético de la escuela.

5.2. Metodología de Dimensionamiento

La metodología de dimensionamiento del sistema de gestión de energía para la Escuela Colonia Árabe se ha desarrollado siguiendo un enfoque sistemático que integra los datos climáticos, la demanda energética, el espacio disponible en la infraestructura y las características técnicas de los componentes seleccionados. Esta metodología permite asegurar un diseño adecuado que garantice la continuidad del suministro eléctrico a las cargas críticas en diversas condiciones de operación.

5.2.1 Criterios de Diseño

El dimensionamiento del sistema de gestión de energía se basa en los siguientes criterios:

- 1- Demanda Energética: Se consideran tanto los consumos energéticos generales de la escuela como los consumos específicos de la sala de clases piloto. La identificación de las cargas prioritarias y el análisis de su consumo permiten establecer los requisitos energéticos mínimos que deben ser cubiertos con el sistema de gestión.
- 2- Datos Climáticos: La radiación solar y las temperaturas de la zona de Los Ángeles, Chile, se utilizan para evaluar la capacidad de generación fotovoltaica durante el año. Estos datos permiten calcular la energía disponible y ajustar la capacidad del sistema para condiciones adversas o períodos de baja generación solar.
- 3- Restricción de Espacio Disponible: El área destinada para la instalación de los paneles solares y otros componentes está limitada por las características del edificio escolar. Esto incluye el tamaño del techo disponible y las medidas de seguridad necesarias para garantizar la integridad estructural y el acceso seguro. Estas limitaciones influyen directamente en la capacidad máxima instalada y en el diseño del sistema.
- 4- Condiciones de Funcionamiento: Se establecen escenarios de operación para condiciones normales y de emergencia, de manera que el sistema pueda responder adecuadamente ante situaciones de fallas en la red eléctrica o períodos prolongados de baja generación solar.
- 5- Seguridad en la Instalación: Para los paneles solares, se recomienda garantizar que la estructura soporte fenómenos meteorológicos como vientos fuertes y lluvias intensas, y que el área de instalación sea accesible y segura para minimizar riesgos durante el mantenimiento. Las baterías deben ubicarse en espacios ventilados, protegidos contra condiciones extremas y con acceso restringido, incorporando sistemas de protección contra sobrecargas, sobrecalentamiento y fugas. Además, se sugiere seguir la norma NFPA 70E [46] que proporciona lineamientos para prevenir riesgos eléctricos.

5.2.2 *Procedimiento de Cálculo*

El proceso de dimensionamiento de los componentes principales del sistema (paneles fotovoltaicos, sistema de almacenamiento de energía, inversores y reguladores de carga) sigue los siguientes pasos:

- 1- **Determinación de la Demanda Energética:** Se calcula el consumo energético total mensual, tanto de las cargas generales como de las cargas prioritarias, para establecer la demanda energética anual y analizar los patrones de consumo característicos.
- 2- **Análisis de los Datos Climáticos:** Se utiliza la radiación solar global e inclinada, junto con las temperaturas promedio, estos datos pueden ser obtenidos desde [22] y [23], para estimar la energía generada por los paneles solares en diferentes épocas del año. También, se selecciona el ángulo de inclinación de los paneles y su orientación óptima para maximizar la captación de energía solar a lo largo del año.
- 3- **Dimensionamiento de los Paneles Fotovoltaicos:** A partir de los datos de radiación solar y la eficiencia de los módulos, se calcula la cantidad de paneles necesarios para cubrir la demanda energética de las cargas, considerando márgenes de seguridad para asegurar el suministro a las cargas prioritarias.
- 4- **Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento (BESS):** Se determina la capacidad del sistema de almacenamiento para cubrir las cargas críticas en situaciones de baja generación solar o cortes en el suministro eléctrico. Se consideran factores como la profundidad de descarga, la eficiencia del almacenamiento y la autonomía requerida en condiciones de emergencia.
- 5- **Selección de Convertidores y Reguladores:** Se seleccionan los inversores y reguladores necesarios para convertir la energía generada en corriente alterna y gestionar de manera eficiente la carga y descarga de las baterías.
- 6- **Simulaciones del Sistema para Diferentes Escenarios:** Se realizarán simulaciones del sistema de gestión de energía para distintos escenarios de operación. Estos escenarios incluirán: un escenario promedio del año con demanda y generación esperadas, un escenario de menor generación y mayor demanda (peor caso posible), que evaluará la capacidad del sistema para enfrentar condiciones adversas y escenarios específicos, para analizar la flexibilidad y capacidad del sistema.

5.2.3 Criterios para la Selección de Componentes

La selección de los componentes claves del sistema de gestión de energía se basa en criterios técnicos y económicos que aseguran la sostenibilidad y eficiencia del sistema en la Escuela Colonia Árabe. Cada componente ha sido evaluado en términos de rendimiento, costo y capacidad para satisfacer las necesidades energéticas de la escuela en diversos escenarios de operación. Para ello, se han utilizado los siguientes criterios:

- 1- Evaluación Técnica: Se analizarán diversas tecnologías y modelos de paneles fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento (BESS) e inversores en base a su eficiencia, capacidad y confiabilidad. La elección se justificará con una tabla comparativa de tecnologías y/o modelos, considerando aspectos como la eficiencia de conversión, vida útil, capacidad de descarga, entre otros.
- 2- Análisis Económico: Se dará especial énfasis en el análisis del costo inicial y de operación de cada componente del sistema, evaluando tanto el costo inicial de adquisición como los costos asociados al mantenimiento y operación. Además, se calculará el costo por cada [kW] o [kWh] entregado al sistema. El objetivo es seleccionar la opción que ofrezca el mejor equilibrio entre la inversión inicial, el costo por [kW/kWh] generado y la vida útil del componente. Este análisis permitirá identificar qué opción representa la mejor inversión a lo largo del ciclo de vida del sistema, considerando tanto los ahorros en consumo energéticos como el retorno de la inversión.
- 3- Compatibilidad con el Entorno: Los componentes seleccionados deberán adaptarse a las condiciones específicas del entorno académico, considerando no solo la radiación solar y las condiciones climáticas locales, sino también el impacto que puedan tener en la operación diaria de la escuela. Se priorizarán materiales y tecnologías que sean seguras, de fácil mantenimiento y que no interfieran con el funcionamiento normal de las actividades escolares.
- 4- Flexibilidad del Sistema: Aunque no existe certeza sobre futuras expansiones en el sistema de gestión de energía o aumentos en la demanda energética, se evaluará la flexibilidad de los componentes en términos de capacidad de adaptación a posibles cambios. En caso de que el sistema pueda ampliarse en el futuro, es importante que los componentes seleccionados permitan la integración de nuevas tecnologías o un incremento en la capacidad, sin afectar la estabilidad del sistema actual.

5.3. Dimensionamiento de los Paneles Fotovoltaicos

El dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos es esencial para garantizar que el sistema pueda satisfacer la demanda energética de las cargas prioritarias de la sala piloto en la Escuela Colonia Árabe. En este apartado, se detallarán los cálculos y criterios utilizados para determinar la cantidad adecuada de paneles fotovoltaicos, seleccionando la tecnología que mejor se ajuste a las necesidades de la escuela. Se analizarán dos escenarios de consumo energético, un escenario promedio y un escenario correspondiente a los períodos de alta demanda y baja radiación solar.

5.3.1 Cálculo de la Energía Necesaria

Antes de seleccionar la tecnología y la cantidad de paneles fotovoltaicos, es esencial calcular la energía que estos deben generar diariamente para abastecer las cargas prioritarias. Este cálculo se realiza considerando dos escenarios:

1. Escenario promedio: Consumo diario promedio de las cargas críticas de 5,2 [kWh]
2. Peor escenario posible: Consumo diario en situaciones de mayor demanda y menor radiación de 5,8 [kWh], este escenario es fundamental de tomar en consideración ya que asegura que el sistema esté correctamente dimensionado para los meses de mayor demanda y pueda dar abasto a las cargas prioritarias.

Los factores por considerar para realizar este cálculo son los siguientes:

- Consumo Energético Diario: Representa la cantidad de energía que deben cubrir los paneles solares para abastecer las cargas prioritarias de la sala.
- Radiación Solar Disponible: Se utilizará la radiación global inclinada para este cálculo, ya que se considera la orientación e inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos. El valor promedio de radiación global inclinada es de 4,9 [kWh/m²/día], mientras que, en el peor mes, junio, es de 2,73 [kWh/m²/día].
- Espacio Disponible: El espacio disponible en el techo de la escuela define el área máxima para la instalación de los paneles solares. Este factor es esencial para dimensionar adecuadamente el sistema, considerando la distribución de los módulos y las medidas de seguridad requeridas.
- Performance Ratio (PR): Este es un valor estándar para evaluar las pérdidas del sistema, para ambos casos, se adoptará un valor conservador de 0,8 [6].

5.3.2 Selección de la Tecnología del Panel Fotovoltaico

Una vez determinada la energía que deben generar los paneles, es importante seleccionar la

tecnología del panel fotovoltaico que más se adecúe a las necesidades específicas de este proyecto. Para ello, la selección de los paneles fotovoltaicos se ha realizado utilizando un sistema de puntos, que evalúa cuatro criterios clave, ponderando cada uno de acuerdo con su relevancia para el proyecto. La ponderación de cada criterio se justifica en función de su impacto en el diseño del sistema fotovoltaico, y los resultados serán presentados en una tabla comparativa.

1. Eficiencia de Conversión (15%): La eficiencia indica el porcentaje de radiación solar que se convierte en electricidad. Aunque los paneles más eficientes requieren menos espacio para generar la misma cantidad de energía, se ha asignado una ponderación del 15%, ya que las diferencias de eficiencia entre los paneles fotovoltaicos modernos tienden a ser pequeñas [6]. Aun así, este criterio sigue siendo importante para optimizar el rendimiento energético general del sistema.
2. Costo por kW (40%): Este criterio mide el costo por kW entregado por el panel, calculado dividiendo el precio total del panel por su potencia nominal en kW. Se le asigna una alta ponderación del 40% debido a las restricciones presupuestarias del proyecto y la necesidad de optimizar la inversión inicial. Un menor costo por kW implica un uso más eficiente de los recursos económicos, lo que es fundamental para asegurar el retorno de la inversión en el sistema fotovoltaico.
3. Área ocupada por kW (30%): Este criterio evalúa la cantidad de metros cuadrados que se necesitan para generar cada kW de potencia nominal, priorizando los paneles que generan más potencia en un área menor. Dado que el techo de la escuela ofrece un espacio limitado, este criterio recibe una ponderación del 30%. Maximizar la potencia instalada por metro cuadrado es crucial para cubrir la demanda energética sin exceder el espacio disponible.
4. Coeficiente de Temperatura de Potencia (15%): Este coeficiente mide la disminución en la eficiencia de un panel fotovoltaico por cada grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) que la temperatura supera su valor nominal (normalmente 25°C). Los paneles solares tienden a perder eficiencia a medida que su temperatura aumenta, esto posee gran relevancia en regiones de alta irradiancia y temperaturas elevadas. Dado que, en Los Ángeles, Chile, se experimentan veranos cálidos, este criterio ha sido ponderado con un 15%, garantizando que el panel mantenga un rendimiento adecuado en las condiciones climáticas locales.

Cada criterio se califica en una escala de 1 a 5 puntos, donde 1 representa un rendimiento muy bajo y 5 un rendimiento excelente. A continuación, en Tabla 5.1 se identifican los valores de referencia para asignar los puntajes a cada criterio.

Tabla 5.1 Sistema de Puntuación para la Evaluación de Paneles Fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

Criterio	5 puntos	4 puntos	3 puntos	2 puntos	1 puntos
Eficiencia de Conversión	$\geq 21\%$	20%	19%	18%	$< 18\%$
Costo $\left[\frac{\$}{W}\right]$ panel	$\leq \$200$	$\$201 - \225	$\$226 - \250	$\$251 - \275	$> \$275$
Área Ocupada $\left[\frac{m^2}{kW}\right]$ panel	$< 4,5$	$4,5 - 4,65$	$4,66 - 4,8$	$4,81 - 5$	> 5
Coeficiente de Temperatura de Potencia	Entre $-0,25\%/^{\circ}C$ y $-0,30\%/^{\circ}C$	Entre $-0,31\%/^{\circ}C$ y $-0,35\%/^{\circ}C$	Entre $-0,36\%/^{\circ}C$ y $-0,40\%/^{\circ}C$	Entre $-0,41\%/^{\circ}C$ y $-0,45\%/^{\circ}C$	Mayor a $-0,45\%/^{\circ}C$

Para la selección de los paneles fotovoltaicos, se ha optado por analizar paneles con tecnología de silicio monocristalina. Esta elección se fundamenta en que los paneles monocristalinos suelen ofrecer mayores niveles de eficiencia en comparación con los paneles policristalinos [6], lo que permite generar más energía en un espacio reducido, un aspecto clave dado el espacio limitado en el techo de la escuela. Además, los paneles monocristalinos tienen una vida útil más larga y mejor rendimiento bajo condiciones de baja radiación solar [38], lo cual es beneficioso para mantener la estabilidad del suministro eléctrico durante todo el año. Aunque el costo inicial de estos paneles puede ser más elevado, este tipo de tecnología se justifica por su alta eficiencia energética y mayor durabilidad [15], lo que garantiza una generación más estable de energía a lo largo del tiempo. Adicionalmente, los paneles monocristalinos son ampliamente accesibles en el mercado chileno, lo que facilita su adquisición para proyectos de energía renovable.

A continuación, se presentan las características técnicas y económicas de los paneles solares seleccionados, resumidas en Tabla 5.2. Estas características serán evaluadas mediante un sistema de puntuación, en el que se asignarán puntos de acuerdo con los valores obtenidos en cada criterio. Los puntajes se otorgarán en base a los rangos establecidos en Tabla 5.1, donde los paneles con mejores características recibirán la mayor cantidad de puntos. Este sistema de puntuación permite una comparación objetiva entre los diferentes paneles, facilitando la selección del más adecuado para el sistema fotovoltaico de la escuela. En Tabla 5.3 muestra los puntajes asignados a cada panel en función de los criterios previamente definidos.

Tabla 5.2 Características técnicas y económicas de los paneles analizados. Adaptado de [47].

Modelo	Potencia Nominal [W]	Eficiencia [%]	Costo por W	Área por kW [m²]	Coefficiente de Temperatura [%/°C]
Trina Monocristalino – Honey M	375	20,5	\$276	4,88	-0,34
Amerisolar Monocristalino	410	21	\$200	4,76	-0,36
Trina Monocristalino – Vertex+	445	22,30	\$237	4,49	-0,3
Jinko Monocristalino - Tiger Neo 60	475	22,01	\$253	4,55	-0,3
Amerisolar Monocristalino	500	21,06	\$250	4,74	-0,36

Tabla 5.3 Puntaje de los paneles fotovoltaicos en base a los criterios de selección. Fuente: Elaboración propia.

Panel	Eficiencia (15%)	Costo por W (40%)	Área por W (30%)	Coef. Temp (15%)	Total
Trina Solar (375 W)	4	1	2	4	2,2
Amerisolar (410 W)	5	5	3	3	4,1
Trina Solar (445 W)	5	3	5	5	4,2
Jinko Solar (475 W)	5	2	4	5	3,5
Amerisolar (500 W)	5	3	3	3	3,3

De acuerdo con lo ilustrado en Tablas 5.2 y 5.3, se desprende que el panel Trina Solar de 445 [W] es la mejor opción según el sistema de evaluación, obteniendo la puntuación más alta en términos de costo, eficiencia y área ocupada. Este panel será el seleccionado para cubrir las necesidades energéticas de la sala piloto.

5.3.3 *Cálculo de la Cantidad de Paneles Necesarios*

Para cubrir las necesidades energéticas de la sala piloto en diferentes escenarios, se determinó la cantidad de paneles solares necesarios aplicando la fórmula (2.2) presentada en el apartado 2.4.3.

Como resultado, se obtuvo lo siguiente:

- Para el escenario promedio, se requieren 3 paneles de 445 [W].
- Para el escenario de mayor demanda y menor radiación, se requieren 6 paneles de 445 [W].

El desarrollo detallado de los cálculos y valores utilizados se encuentran en el [Anexo A.6](#)

5.3.4 *Verificación del Área Disponible*

Después de determinar el número de paneles necesarios, es fundamental verificar si el área disponible en el techo de la sala piloto es suficiente para su instalación. Este cálculo considera factores de corrección para márgenes de seguridad, sombras y obstáculos que puedan reducir la eficiencia de los paneles solares.

Se estima que el área utilizable en el techo de la sala piloto es de aproximadamente 14,83 [m^2], lo que permite la instalación de un máximo de 7 paneles solares de 445 [Wp] cada uno. Este resultado asegura que el espacio disponible cumple con los requisitos necesarios para cubrir la demanda energética estimada en los escenarios planteados.

El detalle de los cálculos específicos y fórmulas utilizadas se presentan en el [Anexo A.7](#).

5.3.5 *Paneles Solares con o sin Seguimiento*

La elección entre paneles solares con sistema de seguimiento y paneles instalados en una inclinación fija es un aspecto crucial en el diseño del sistema fotovoltaico, ya que esta elección afecta tanto la eficiencia en la captación de energía solar como en los costos de inversión y mantenimiento. A continuación, se justifica la selección de los paneles con o sin seguimiento en base a diversos factores técnicos y económicos.

Los sistemas de seguimiento solar permiten un mayor aprovechamiento de la radiación solar al ajustar la posición de los paneles según el movimiento del sol, lo que puede incrementar la

generación de energía entre un 15% y 30% [48]. Sin embargo, su implementación implica un costo inicial considerablemente más alto, debido a la necesidad de componentes móviles, sensores y un sistema de control, lo que también incrementa los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo [49]. Aunque los sistemas de seguimiento proporcionan una mayor eficiencia, este incremento en la generación de energía no siempre justifica una mayor inversión, especialmente en regiones con alta radiación solar estable, donde los paneles fijos pueden alcanzar un rendimiento adecuado [48].

Debido a la simplicidad de los paneles con inclinación fija, estos son más económicos en términos de instalación y de mantenimiento [48]. Aunque no siempre capturan la radiación solar de manera tan eficiente como los sistemas de seguimiento, en zonas como Los Ángeles, con buena radiación solar anual, los paneles fijos instalados con un ángulo óptimo ofrecen una solución rentable y eficiente [48]. En particular, los estudios han demostrado que, en lugares con buena radiación solar durante la mayor parte del año, como es el caso de este proyecto, los sistemas fijos pueden competir eficientemente ante los sistemas de seguimiento en términos de energía capturada, sin incurrir en los mayores costos de instalación y operación [48][49].

Dado el análisis de los factores mencionados, se ha decidido optar por paneles con inclinación fija para este proyecto. La simplicidad de instalación y mantenimiento, junto con una menor inversión inicial, hace que esta opción sea más adecuada para el contexto de la Escuela Colonia Árabe. Además, el proyecto cuenta con un presupuesto limitado, lo que convierte a los paneles fijos en la opción más viable económicamente. En zonas como Los Ángeles, donde se presentan grandes valores de radiación solar, los sistemas de seguimiento no aportan una ventaja significativa que justifique su elevado costo [48][49].

5.4. Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento (BESS)

El correcto dimensionamiento del sistema de almacenamiento es fundamental para el proyecto, ya que permitirá garantizar el suministro continuo de energía durante períodos sin generación fotovoltaica, como durante la noche o en días nublados, también servirá como respaldo para las cargas críticas de la sala piloto en caso de fallas en el suministro eléctrico. Además, el sistema BESS contribuirá a optimizar la gestión energética, permitiendo aprovechar de manera eficiente la generación de los paneles solares y dar sustento a las cargas prioritarias. En este contexto, el dimensionamiento del sistema de almacenamiento se realiza considerando diferentes tiempos de autonomía que puedan cubrir las necesidades del sistema durante fallas de corta y larga duración.

5.4.1 *Cálculo de la Capacidad del Sistema de Almacenamiento*

Para el cálculo de la capacidad del sistema de almacenamiento se considera la potencia total de las cargas críticas y se establece un tiempo de autonomía que garantice la continuidad del suministro ante fallas. En este proyecto, se ha definido un escenario de autonomía de 6 horas, esta elección se fundamenta en el análisis de la frecuencia y duración de los cortes de suministro eléctrico en la Escuela Colonia Árabe.

Según registros preliminares, se producen entre 3 y 4 cortes al año, con una duración promedio de 4 y 6 horas. Por ello, se ha decidido adoptar un tiempo de autonomía de 6 horas, considerando un escenario conservador que garantice la continuidad del suministro a las cargas críticas durante eventos de interrupción prolongada. Este criterio asegura que el sistema pueda cubrir las necesidades energéticas incluso en las situaciones más exigentes dentro de los patrones históricos de cortes en el área.

El cálculo realizado estima que se requiere una capacidad de almacenamiento de 9,17 [kWh] para satisfacer las necesidades energéticas de respaldo durante el tiempo definido. Los detalles del cálculo y las consideraciones técnicas se encuentran en el [Anexo A.8.](#)

5.4.2 *Selección de las Baterías.*

Una vez calculada la capacidad de almacenamiento requerida, se seleccionarán las baterías que mejor se adapten a las necesidades del proyecto. En este caso, se ha optado por utilizar baterías de litio debido a sus múltiples ventajas en comparación con otras tecnologías de almacenamiento.

Las baterías de litio ofrecen una alta eficiencia en los procesos de carga y descarga, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía almacenada. Su mayor profundidad de descarga (DoD) permite utilizar un porcentaje mayor de su capacidad sin comprometer significativamente su vida útil, lo que resulta fundamental para aplicaciones que requieren una alta disponibilidad de energía. Además, las baterías de litio poseen un ciclo de vida más largo, reduciendo los costos asociados al reemplazo frecuente de baterías, mejorando la eficiencia y sostenibilidad económica del sistema a largo plazo [34] [35].

Debido a que el sistema se ha dimensionado para trabajar a 48 [V], se seleccionarán baterías que permitan alcanzar este voltaje en su configuración final. Esta elección de voltaje se justifica por la eficiencia en la transmisión de energía en sistemas de almacenamiento de mediana capacidad, como el planteado en este proyecto. Al operar a un voltaje más alto, se reduce la corriente necesaria para una misma potencia, lo que disminuye significativamente las pérdidas por efecto Joule en los

conductores. Esto no solo optimiza la eficiencia energética del sistema, sino que también facilita la instalación y el mantenimiento al reducir la demanda sobre los componentes eléctricos [35].

En Tabla 5.4 se presenta una comparativa que evalúa opciones de baterías disponibles en el mercado, evaluando aspectos claves como la capacidad, el voltaje, el costo por batería, el costo total para cubrir el escenario de autonomía y el espacio requerido. Esta comparativa servirá de base para seleccionar la batería más adecuada para el proyecto.

Tabla 5.4 Características técnicas de las baterías. Fuente: Elaboración propia adaptado de [47].

Criterio	Batería 1: Ritar 12,8 [V] - 100 [Ah]	Batería 2: Ritar 25,6 [V] - 100 [Ah]	Batería 3: Taiyo 48 [V] – 5,12 [kWh]
Capacidad [kWh]	1,28	2,56	5,12
Voltaje Nominal [V]	12,8	25,6	48
Costo por Batería	\$399.600	\$780.300	\$1.181.800
Costo Total para 6 [h] de autonomía	\$3.196.800 (8 baterías)	\$3.121.200 (4 baterías)	\$2.363.600 (2 baterías)
Espacio Requerido Total [m^3]	0,096	0,108	0,062
Vida Útil	>10 años >3.500 ciclos	>10 años >3.500 ciclos	>15 años >6.000 ciclos

Para realizar la selección de las baterías que mejor se adapten a las necesidades del proyecto, se utilizó un sistema de puntuación que evalúa las opciones disponibles en base a criterios clave: capacidad de almacenamiento, costo total, espacio requerido y vida útil. Cada criterio fue ponderado según su relevancia para el diseño del sistema:

- 1- Capacidad [kWh] (35%): La capacidad define cuánta energía puede almacenar la batería, asegurando la autonomía necesaria para mantener las cargas críticas durante cortes o baja generación. Es un criterio esencial para garantizar el correcto dimensionamiento del sistema.
- 2- Costo total (40%): Este criterio evalúa el costo total requerido para cumplir con la autonomía, priorizando opciones económicas que garanticen la viabilidad del proyecto sin comprometer su funcionalidad.
- 3- Espacio requerido (10%): Considera el volumen que ocupa cada batería, fundamental en

proyectos con limitaciones espaciales como el del recinto educacional, donde se necesitan soluciones compactas y seguras.

- 4- Vida útil y ciclos de carga/descarga (15%): Evalúa la durabilidad y el rendimiento a largo plazo, seleccionando baterías con mayor vida útil y número de ciclos para reducir costos de reemplazo y garantizar una operación confiable.

Las baterías fueron evaluadas y clasificadas en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un rendimiento bajo y 5 un rendimiento excelente en cada criterio. El puntaje ponderado total se calculó para determinar la mejor opción. A continuación, en Tabla 5.5 se presentan los rangos establecidos para cada uno de los criterios.

Tabla 5.5 Sistema de puntuación para elección de baterías. Fuente: Elaboración propia.

Criterio	1 - Bajo	3 - Medio	5 - Alto
Capacidad [kWh]	< 2,0	2,0 – 3,5	> 3,5
Costo Total	> \$3.200.000	\$2.500.000 - \$3.200.000	< \$2.500.000
Espacio Total [m^3]	> 0,1	0,1 – 0,07	< 0,07
Vida útil [años] – ciclos	< 10 < 3.500	10 – 15 3.500 – 5.000	> 15 > 5.000

Ahora, en Tabla 5.6 se presentan los puntajes obtenidos por cada batería tras aplicar el sistema de evaluación.

Tabla 5.6 Puntajes obtenidos de cada batería. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Batería 1: Riutar 12,8 [V]	Batería 2: Riutar 25,6 [V]	Batería 3: Taiyo 48 [V]
Capacidad (35%)	1	3	5
Costo Total (40%)	3	3	5
Espacio Total (10%)	3	1	5
Vida útil - ciclos (15%)	3	3	5
Puntaje Total	2,3	2,8	5

De acuerdo con los puntajes obtenidos en Tabla 5.6, la Batería 3: Taiyo 48 [V] – 5,12 [kWh] es la mejor opción para este proyecto. Esta batería cumple con los requisitos de capacidad, permite reducir el número total de unidades necesarias para cubrir el escenario de autonomía, tiene un costo

total comparativamente menor con las demás opciones. Además, su vida útil es superior a 15 años y sus más de 6.000 ciclos garantizan una inversión duradera y eficiente, optimizando el espacio y minimizando el mantenimiento y reemplazo a largo plazo.

En este sentido, el sistema de puntuación implementado no solo proporciona una evaluación objetiva de las opciones disponibles, sino que también asegura que la selección final priorice las necesidades del proyecto, equilibrando las limitaciones presupuestarias y de espacio con los requisitos técnicos y de autonomía.

5.4.3 *Conexión y Configuración del Sistema.*

Dado que la batería seleccionada opera a 48 [V] y ya cumple con el voltaje del sistema dimensionado, no es necesario realizar una conexión en serie. Sin embargo, para alcanzar la capacidad de almacenamiento requerida, se configurarán las baterías en paralelo.

Para el escenario de autonomía de 6 horas (9,17 [kWh]), se requerirán 2 unidades de esta batería. Esta configuración permite aumentar la capacidad de almacenamiento sin modificar el voltaje del sistema, manteniendo la operación en 48 [V].

Cada batería Taiyo de 48 [V] está equipada con sistemas de protección avanzados, como monitoreo de temperatura, protección contra cortocircuitos y sobrecargas, lo cual asegura un funcionamiento seguro y prolonga la vida útil del sistema. Además, la conexión en paralelo facilita el mantenimiento, ya que cada batería funciona de manera independiente, permitiendo reemplazos o desconexiones sin afectar el resto del sistema. Además, esta configuración permite una futura expansión de la capacidad de almacenamiento, agregando baterías en paralelo sin modificar el voltaje del sistema. Este diseño optimiza la flexibilidad y la eficiencia operativa del sistema, adaptándose a posibles necesidades de mantenimiento o ampliación en el futuro.

5.5. **Dimensionamiento del Inversor y Regulador de Carga**

5.5.1 *Cálculo de la Capacidad de Potencia Requerida por el Inversor*

Para este sistema de gestión de energía, la potencia peak de las cargas críticas es de 1,1 [kW], aplicando un margen adecuado de seguridad del 25% [24], se asegura que el inversor pueda manejar incrementos eventuales en la carga, la potencia total requerida se calcula de la siguiente manera con la ecuación (5.4).

$$P_{inv} = \frac{P_{cargas} * margen}{\eta_{inv}} \quad (5.4)$$

donde,

P_{inv} : Potencia del inversor [kW] ,

P_{cargas} : Potencia de las cargas críticas [kW],

$margen$: Margen de seguridad ante sobrecargas, y

η_{inv} : Eficiencia del inversor [%].

Considerando una eficiencia del 93% del inversor, la potencia nominal necesaria del inversor es la siguiente:

$$P_{inv} = \frac{1,1 * 1,25}{0,93} = 1,48 [kW]$$

Por lo tanto, se requiere un inversor con una potencia de al menos 1,5 [kW] para cubrir la demanda de las cargas críticas con un margen de seguridad adecuado [24].

5.5.2 Cálculo de la Corriente del Regulador de Carga

Para dimensionar correctamente el regulador de carga, es necesario calcular la corriente máxima que el sistema puede generar en el peor escenario. Este escenario considera el uso de 6 paneles solares de 500 [W] cada uno, los cuales presentan las siguientes especificaciones técnicas:

- Voltaje de Máxima Potencia (V_{mp}): 44,3 [V]
- Corriente de Máxima Potencia (I_{mp}): 10,05 [A]

Dado que los paneles están conectados en serie, el voltaje total de entrada al regulador MPPT será la suma de los voltajes de cada panel, mientras que la corriente se mantendrá constante en 13,03 [A]. Por lo tanto, la entrada de potencia en el MPPT será de:

- Potencia total = 6 paneles * 445 [W] = 2.670 [W]
- Voltaje de entrada = 6 * 44,3 [V] = 265,8 [V]

El regulador MPPT ajustará este voltaje de entrada elevado al voltaje de carga de las baterías, que es de 48 [V], y aumentará la corriente de salida para mantener la potencia constante (considerando una eficiencia mínima del regulador MPPT). De esta manera, la corriente de salida del MPPT necesaria para cargar las baterías a 48 [V] se calcula con ayuda de la ecuación (2.4), además de agregar un margen de seguridad adicional del 20% para asegurar el buen funcionamiento del regulador de carga ante posibles variaciones en la generación y condiciones de operación [24].

$$I_{regulador} = \frac{P_{total\ paneles}}{V_{baterías}} * 1,2 = \frac{2.670 [W]}{48 [V]} * 1,2 = 66,75 [A]$$

Por ende, el regulador de carga del sistema de gestión de energía deberá ser capaz de manejar una corriente total de 66,75 [A] para asegurar el buen funcionamiento del sistema.

5.5.3 Justificación del uso de un Inversor con Regulador MPPT

La selección de un inversor con tecnología MPPT se justifica principalmente por su capacidad para maximizar la captación de energía solar, especialmente cuando se usa en combinación paneles fijos inclinados. La tecnología MPPT permite que el sistema ajuste automáticamente su punto de operación al punto de máxima potencia de los paneles solares, optimizando así la cantidad de energía capturada independientemente de las variaciones en irradiación y temperatura. Esto resulta esencial para sistemas con paneles en posiciones fijas, donde las condiciones de irradiación pueden variar a lo largo del día [6].

Un estudio reciente destaca que el uso de inversores con MPPT puede incrementar significativamente la eficiencia en sistemas fotovoltaicos, logrando hasta un 30% más de energía en comparación con otros métodos de regulación menos avanzados [6]. Este aumento en la eficiencia hace que los inversores con MPPT sean particularmente recomendables en instalaciones donde maximizar la energía generada sea fundamental, como en el presente proyecto.

5.5.4 Selección del Inversor – Regulador de Carga

La selección del inversor – cargador para este proyecto se basa en la compatibilidad con las características técnicas del sistema y en la capacidad de maximizar la eficiencia energética. En este caso, se ha optado por un inversor con capacidad de 5 [kW], que cumple ampliamente con la demanda máxima de las cargas críticas. Este margen adicional garantiza que el sistema pueda adaptarse a posibles expansiones o incrementos en la demanda energética sin comprometer su rendimiento.

Dado que el sistema opera con baterías de 48 [V], es fundamental que el inversor sea compatible con este voltaje nominal para asegurar una integración óptima. Además, se ha elegido un inversor con un regulador de carga MPPT integrado, lo cual reduce el número de componentes requeridos y facilita la instalación y el mantenimiento del sistema. Esta configuración compacta también optimiza el espacio y simplifica la operatividad del sistema, dado que evita la necesidad de instalar componentes adicionales para el control de la carga de las baterías.

Para garantizar un adecuado aprovechamiento de la energía solar, el regulador de carga MPPT integrado debe soportar la corriente máxima generada por los paneles en el peor escenario, con 6 paneles de 445 [W] conectados en serie - paralelo, cuya configuración asegura que se mantenga el

voltaje adecuado para el sistema de 48 [V]. De acuerdo con las especificaciones técnicas, el regulador de carga del inversor seleccionado puede manejar la corriente de entrada requerida, ajustándose a las características de los paneles y del sistema de almacenamiento.

En resumen, este inversor – cargador de 5 [kW] con tecnología MPPT se adapta a los requerimientos técnicos y operativos del proyecto, maximizando la eficiencia del sistema de generación y almacenamiento, y cumpliendo con las especificaciones de voltaje, potencia y corriente necesarios para un funcionamiento seguro y eficiente en la Escuela Colonia Árabe. En la figura 5.1 se presentan las características técnicas de este inversor y regulador de carga.



Salida del inversor	
Potencia nominal	5000VA / 5000W
Funcionamiento en paralelo	SI, máx. 6 unidades
Regulación de voltaje (Modo de batería)	230VCA $\pm$ 5% @ 50/60Hz
Potencia de pico	10000W
Eficiencia	93%
Forma de onda	Senoidal pura
Tiempo de transferencia	10ms ~ 20ms
Cargador solar	
Tipo	MPPT
Potencia máxima de panel	6000W
Rango de voltaje de MPPT	120VCC ~ 430VCC
Voltaje de entrada máximo (VCC)	450VCC
Cantidad de MPPT / conexiones p/MPPT	1/1
Corriente de carga máxima - cargador solar	100A

Fig. 5.1 Características técnicas inversor y cargador de baterías Growatt 5000 [W] 48 [Vcc]. [47]

Luego, en Tabla 5.7 se presenta un resumen de los componentes principales del sistema de gestión energética propuesto, para proporcionar una visión integral de los elementos seleccionados para asegurar la eficiencia y continuidad del suministro energético.

Tabla 5.7 Componentes del Sistema de Gestión de Energía. Fuente: Elaboración propia.

Componente/ Modelo	Características Clave	Cantidad	Escenario Off- Grid	Escenario On-Grid	Función Principal
Panel Trina Solar	P_{mp} : 445 [W], V_{mp} : 44,3 [V], I_{mp} : 10,05 [A]	3 para escenario promedio – 6 para escenario crítico	Sí	Sí	Generación de energía fotovoltaica
Batería de Litio - Taiyo	48 [V], 100 [Ah], 5,12 [kWh]	2	Opcional	Sí	Almacenamiento de energía para respaldo
Inversor y Cargador de Baterías Growatt	5 [kW], 48 [Vcc]	1	Sí	Sí	Conversión de energía de CC a CA y optimización de energía solar
Sistema de Gestión Energética	Plataforma en Power BI	N/A	Sí	Sí	Monitoreo, visualización y análisis de rendimiento

El capítulo 5 presentó un detallado proceso de dimensionamiento del sistema de gestión de energía para la Escuela Colonia Árabe, definiendo y seleccionando sus componentes clave. Estas elecciones garantizan que el sistema cubra las demandas de las cargas críticas con eficiencia y confiabilidad bajo diversas condiciones de operación.

La incorporación de tecnología MPPT y baterías de litio refuerza la eficiencia y permite futuras expansiones del sistema. Asimismo, se diseñó una configuración que admite modos on-grid y off-grid, mejorando la resiliencia energética de la escuela.

Este dimensionamiento constituye la base para los análisis y simulaciones del próximo capítulo, así como para la plataforma de gestión energética que facilitará el monitoreo y optimización del sistema a lo largo del tiempo.

6. Simulaciones y Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan las simulaciones del sistema de gestión energética diseñado para la Escuela Colonia Árabe, evaluando su capacidad para satisfacer la demanda de la sala de clases bajo diversos escenarios de radiación y consumo energético. Estas simulaciones permitirán validar el desempeño del sistema en condiciones de operación óptimas y críticas, considerando un sistema híbrido, que combina paneles solares conectados a la red eléctrica con un sistema de almacenamiento en baterías.

Utilizando el software especializado SAM, se modelaron los principales componentes del sistema: los paneles solares, el sistema de almacenamiento y el inversor – regulador MPPT. Los resultados obtenidos serán fundamentales para diseñar una plataforma de gestión energética, que facilitará el monitoreo continuo del sistema y optimizará la toma de decisiones operativas y estratégicas.

6.1. Introducción al Software de Simulación

Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó el software System Advisor Model (SAM) [50], una herramienta desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos. SAM es reconocido por su precisión y versatilidad para modelar sistemas de energía renovable y evaluar su rendimiento bajo distintas condiciones de operación. Este software permite a los usuarios anticipar el comportamiento de sistemas energéticos a través de un modelado detallado que incluye tanto la generación de energía como el consumo de los componentes [50], lo que resulta esencial para optimizar el diseño y funcionamiento del sistema de gestión energética de la Escuela Colonia Árabe.

El uso de SAM en este proyecto se basa en sus funcionalidades avanzadas, que permiten la configuración detallada de cada componente del sistema, incluyendo paneles solares, sistemas de almacenamiento y reguladores MPPT. La herramienta utiliza datos climáticos específicos, como la radiación solar y la temperatura de la zona, ajustando los cálculos para simular condiciones reales de operación. Esta característica es especialmente útil en el contexto de los sistemas fotovoltaicos, ya que permite prever la generación de energía bajo diferentes escenarios y planificar el respaldo adecuado para cubrir la demanda de las cargas críticas durante todo el año.

SAM ofrece la posibilidad de evaluar sistemas híbridos, con una conexión a la red que permita exportar el excedente de generación y maximizar los beneficios económicos del sistema. Este enfoque

asegura un balance óptimo entre la generación de energía local y el respaldo energético que proporcionan las baterías.

Esta capacidad de análisis integral facilita una comprensión profunda del comportamiento del sistema en diferentes escenarios, permitiendo ajustar el diseño para maximizar la eficiencia y la confiabilidad. La elección de SAM en este proyecto se fundamenta, en gran medida, en esta versatilidad, que lo convierte en una herramienta integral para el diseño y evaluación de sistemas energéticos.

Los datos obtenidos a través de SAM también se emplearán para desarrollar una plataforma de gestión energética que facilite el monitoreo y optimización del sistema en tiempo real. Esta plataforma, basada en datos simulados generados por el software, permitirá a los operadores tomar decisiones informadas sobre la operación y el mantenimiento del sistema, asegurando así un desempeño eficiente y una alta disponibilidad del suministro energético en la sala piloto.

6.2. Escenarios de Simulación

El objetivo de los escenarios de simulación es analizar cómo el sistema de gestión energética diseñado para la Escuela Colonia Árabe responde bajo diversas condiciones de demanda y generación de energía. A través de estos escenarios, se evaluará la capacidad del sistema para satisfacer la demanda de las cargas críticas de la sala piloto en situaciones tanto normales como extremas, considerando variaciones en la irradiación solar y el consumo de energía.

Para este análisis, se definieron escenarios híbridos que consideran tanto la conexión del sistema a la red eléctrica como el respaldo energético proporcionado por las baterías. Estas configuraciones son cruciales para evaluar la flexibilidad del sistema y su capacidad de adaptarse a condiciones variables. Los principales factores considerados son la irradiación solar, datos climáticos de la zona y los patrones de consumo de las cargas.

6.2.1 Escenarios Híbridos

El sistema híbrido opera con paneles solares conectados a la red eléctrica junto con un sistema de almacenamiento mediante baterías. Esta configuración permite exportar el excedente de generación a la red, optimizando la rentabilidad del sistema. Los escenarios se dividen en:

- Escenario híbrido promedio: Considera condiciones de irradiación solar promedio y un consumo regular de energía de las cargas críticas durante los meses con actividades normales de clases. La simulación evalúa la capacidad del sistema para cubrir la demanda de las cargas

críticas y exportar excedentes de generación.

- Escenario híbrido crítico: Considera condiciones de irradiación solar baja y un consumo elevado de energía, como, por ejemplo, el consumo en los meses de invierno. Este escenario evalúa la resiliencia del sistema para abastecer las cargas críticas y determinar la autonomía de las baterías.

Estas simulaciones aportarán una comprensión profunda del desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación, permitiendo evaluar su eficiencia, resiliencia y capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda y la generación de energía. Los resultados obtenidos servirán como base para realizar ajustes precisos en el diseño del sistema, mejorando su capacidad para mantener el suministro energético en la escuela y asegurar la continuidad de las operaciones en escenarios normales y críticos.

6.3. Resultados y Análisis de las Simulaciones

6.3.1 Escenario Promedio

En este escenario se analiza el desempeño del sistema híbrido bajo condiciones promedio de irradiación solar y demanda energética. La configuración cuenta con paneles solares conectados a la red eléctrica y baterías con 6 horas de autonomía, evaluando su capacidad para cubrir la demanda de las cargas críticas y garantizar la continuidad del suministro eléctrico. Los resultados se presentan a través de gráficos que describen la generación mensual, el comportamiento del almacenamiento, el flujo de energía, y el desempeño del sistema ante fallas en el suministro.

En la figura 6.1 se compara la generación mensual de energía del sistema con la demanda de las cargas críticas a lo largo del año.

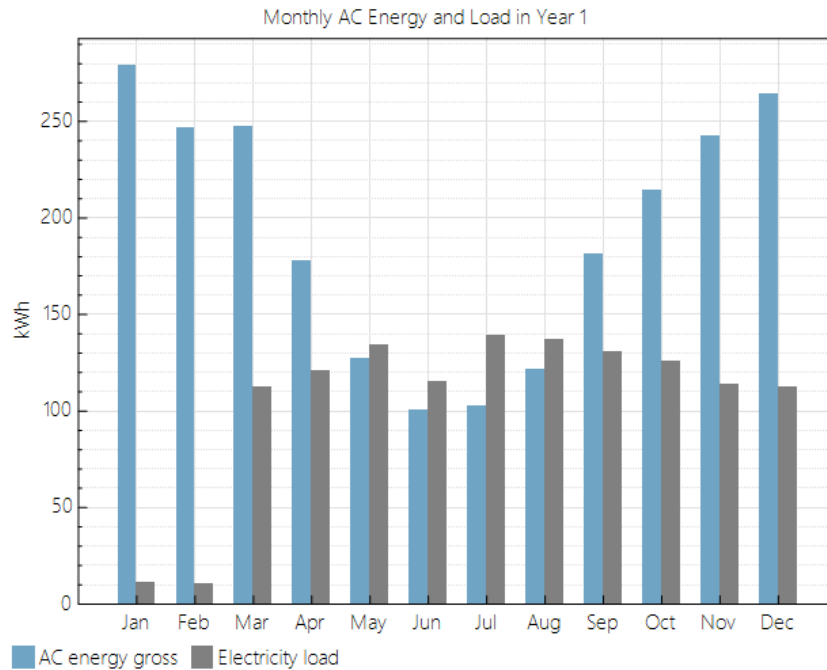


Fig. 6.1 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

De la figura 6.1 se observa que, durante los meses de verano, la generación excede significativamente la demanda crítica, lo que indica una alta disponibilidad de energía renovable en esta temporada, esto se debe a la mayor irradiación solar que es característica de estos meses.

En contraste, en los meses de invierno, la generación de energía es menor debido a la reducción en la irradiación solar. En estos meses, la generación alcanza entre el 70% y el 90% de la demanda mensual de las cargas críticas, lo que genera un déficit que debe ser suplido por las baterías y la red eléctrica.

Los resultados resaltan la estacionalidad del sistema, que depende de la irradiación solar disponible, y la importancia de contar con almacenamiento y respaldo para garantizar la continuidad del suministro en los meses de invierno y ante fallas en el suministro eléctrico.

El estado de carga de las baterías (SoC) a lo largo del año se analiza en la figura 6.2, destacando cómo se gestiona la energía almacenada frente a las condiciones de generación y demanda, cabe destacar que, para este caso, las baterías se cargan desde el sistema y de la red externa, además de que las baterías solamente se descargan cuando la demanda de las cargas excede a la generación del sistema.

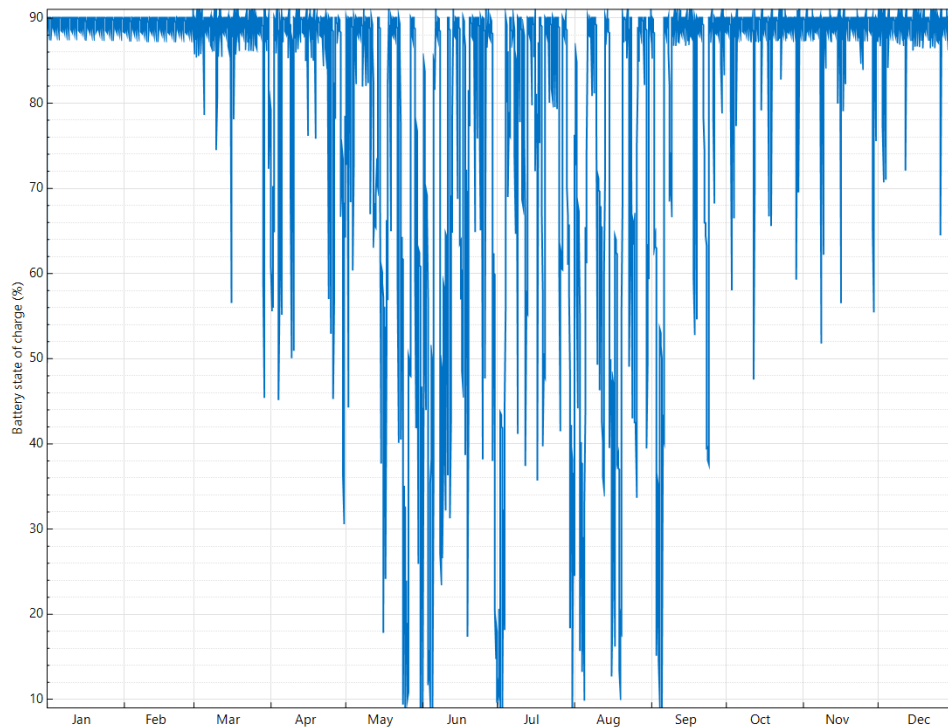


Fig. 6.2 Estado de carga de las baterías (SoC %) – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

La figura 6.2 muestra que el SoC de las baterías varía significativamente durante el año, manteniéndose generalmente en rangos operativos entre el 40% y el 90% en la mayor parte del tiempo.

Sin embargo, en ciertos períodos críticos, como en meses de invierno, el SoC desciende hasta su límite inferior, cercano al 10%, indicando que las baterías se han descargado completamente para suplir las cargas críticas. Este comportamiento ocurre debido a que, durante los meses de baja irradiación solar, las baterías deben suplir el déficit energético que el sistema fotovoltaico no logra generar, además, en los períodos de fallas simuladas, las baterías asumieron la carga total de la demanda, lo que llevó a su descarga máxima en varias ocasiones.

En contraste, durante los meses de mayor generación solar, el SoC permanece en niveles cercanos al 90%, ya que la abundante irradiación permite mantener las baterías cargadas, asegurando su disponibilidad para futuros períodos de alta demanda o emergencia.

En la figura 6.3 se visualiza el aporte energético directo de las baterías hacia las cargas críticas durante el año.

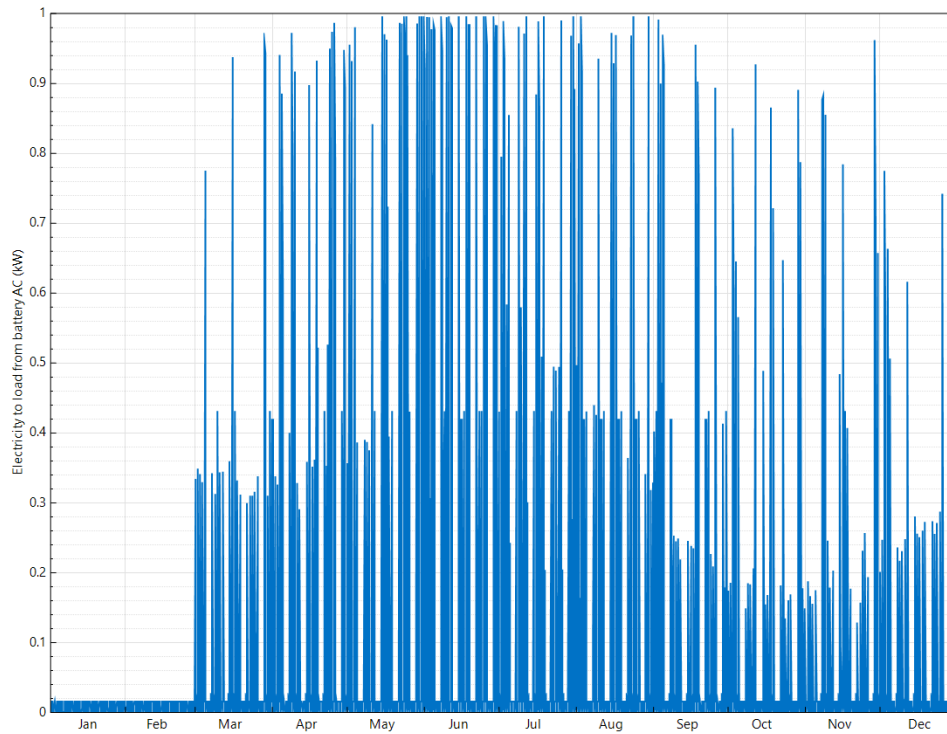


Fig. 6.3 Flujo de energía desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

De la figura 6.3 se aprecia que, durante los meses de invierno, el flujo energético de las baterías hacia las cargas aumenta en comparación con los demás meses, lo que refleja su rol esencial en cubrir los déficits de generación solar. Además, este flujo de energía asegura la continuidad del suministro eléctrico en períodos donde ocurren fallas en el suministro y la generación solar es insuficiente para mantener la demanda de las cargas críticas en estos períodos.

En los meses de mayor generación solar, el flujo energético de las baterías es menor, ya que los paneles solares son capaces de atender directamente la demanda de las cargas, sin embargo, en días puntuales donde la generación no es suficiente debido a bajas en la irradiación solar, las baterías sirven como respaldo para cubrir la demanda energética, lo que a su vez también permite al sistema minimizar la energía requerida desde la red eléctrica, asegurando mayor autonomía operativa y resiliencia.

En la figura 6.4 se refleja la interacción del sistema con la red eléctrica. Los valores positivos muestran los excedentes que son exportados a la red, mientras que los valores negativos corresponden a la energía que es tomada de la red.

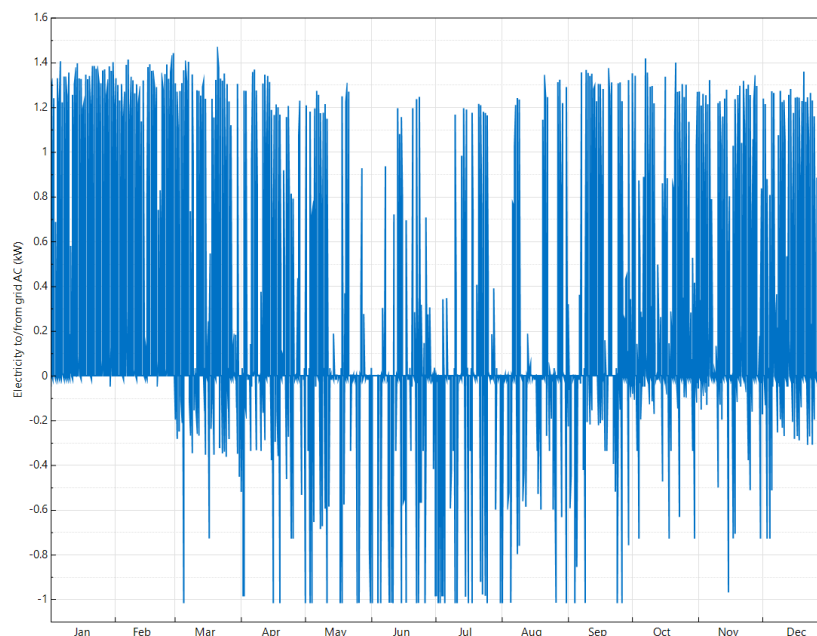


Fig. 6.4 Energía transferida hacia y desde la red eléctrica (kW) – Caso 1. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

De acuerdo con la figura 6.4, en los meses de verano, el sistema exporta una cantidad significativa de energía excedente, lo que maximiza el aprovechamiento de la generación solar. Mientras tanto, en invierno, el sistema depende más de la red para suplir la demanda energética, aunque las baterías contribuyen a reducir esta dependencia.

Este flujo evidencia el comportamiento estacional del sistema y su capacidad para proporcionar autonomía de la red durante cortes eléctricos, gracias al respaldo de las baterías. Además, los excedentes generados en verano compensan, en parte, los costos asociados a la energía comprada en invierno. Esto subraya la importancia económica de exportar los excedentes en los meses de alta generación solar gracias al net billing [51], mejorando el retorno económico del sistema.

6.3.2 Escenario Crítico

En este escenario se examina el comportamiento del sistema en condiciones críticas, caracterizadas por una menor disponibilidad de irradiación solar y un peak de consumo diario de las cargas críticas. Se evalúa cómo el sistema enfrenta estas condiciones para mantener la demanda de las cargas críticas, con especial énfasis en los meses de invierno, viendo como interactúa el sistema con la red eléctrica y el rol que ejercen las baterías. La configuración se mantiene similar al escenario promedio, con 6 horas de autonomía de las baterías.

En la figura 6.5 se muestra la generación mensual de energía del sistema comparada con la demanda de las cargas críticas durante el año, cuando el sistema tiene más paneles solares disponibles.

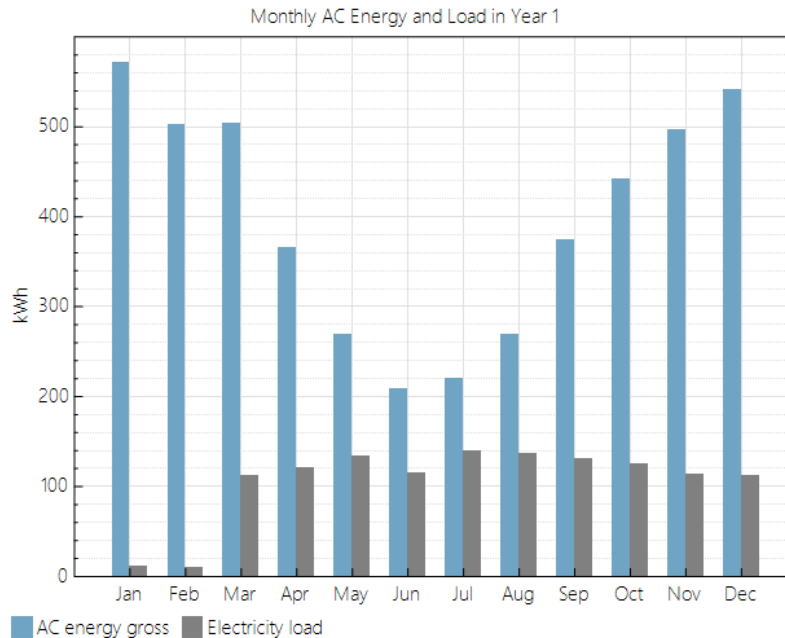


Fig. 6.5 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

En la figura 6.5 se observa que, incluso en condiciones críticas, la energía generada por el sistema supera consistentemente la demanda de las cargas críticas en todos los meses del año. Durante los meses de mayor irradiación solar, como enero, febrero y diciembre, los excedentes generados son significativamente altos, mientras que, en los meses de menor irradiación, la generación supera en aproximadamente un 50% - 60% la demanda crítica.

La sobrecapacidad del sistema asegura la resiliencia ante posibles fallas en el suministro eléctrico y garantiza una alta disponibilidad de energía renovable durante todo el año. Este desempeño no solo permite cubrir la demanda de las cargas críticas, sino también exportar excedentes significativos de energía a la red eléctrica en gran parte del año, maximizando los beneficios económicos gracias al net billing [51]. En particular, la venta de excedentes generados durante los meses de alta irradiación refuerza el retorno económico del sistema, contribuyendo a mejorar su rentabilidad general incluso bajo condiciones críticas de operación.

No obstante, el excedente generado indica que el sistema está sobredimensionado para las condiciones críticas evaluadas. Esto sugiere que una optimización del diseño podría considerar una reducción de la capacidad instalada de generación, un ajuste en la autonomía de las baterías o, alternativamente, la incorporación de nuevas cargas críticas que maximicen el uso de la energía generada. Estas medidas permitirían ajustar la capacidad del sistema a las necesidades reales, mejorando la eficiencia de la inversión inicial y el aprovechamiento energético sin comprometer la

resiliencia ante escenarios futuros.

Luego, en la figura 6.6 se muestra el comportamiento del estado de carga de las baterías a lo largo del año en el escenario crítico. Este análisis destaca las variaciones en la gestión del almacenamiento de energía en función de la generación fotovoltaica y la demanda del sistema.

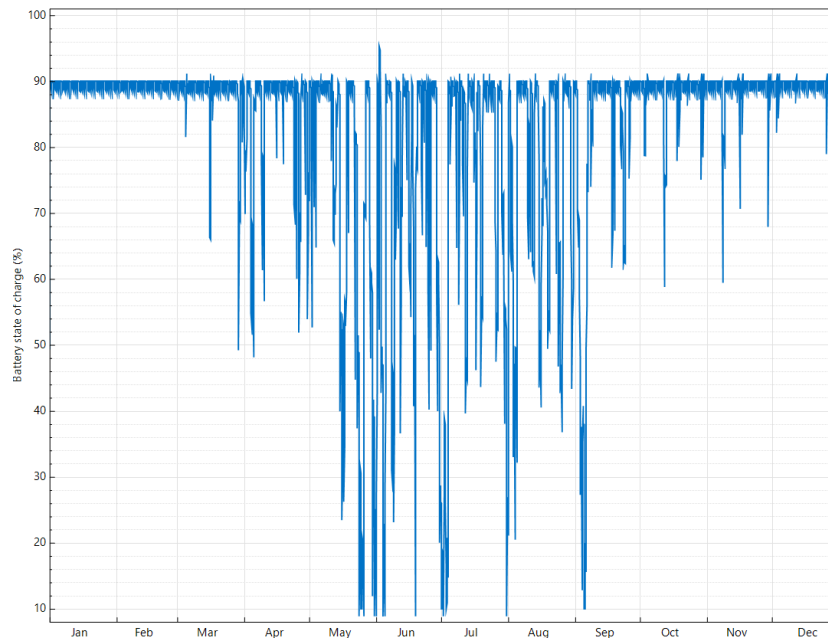


Fig. 6.6 Estado de carga de las baterías (SoC %) – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

Durante los meses de invierno, el SoC presenta caídas significativas, alcanzando niveles cercanos al 10%. Esto se debe a la baja radiación solar en estos meses, que limita la generación del sistema fotovoltaico, obligando a las baterías a descargar su energía para cubrir la demanda de las cargas críticas.

A pesar de que el sistema está sobredimensionado, en invierno las baterías desempeñan un papel fundamental en la gestión eficiente de la energía, aportando a la cobertura de las cargas críticas y actuando como respaldo ante posibles fallas en el suministro eléctrico, este comportamiento garantiza la continuidad del suministro en condiciones de baja generación solar.

En contraste, durante la gran parte del año, el SOC se mantiene mayormente por encima del 60% - 70%, gracias a la alta generación solar, lo que permite mantener las baterías cargadas y disponibles para suplir las cargas críticas. Esto evidencia el rol de las baterías no solo como almacenamiento, sino también como un componente clave para la resiliencia y eficiencia del sistema.

La figura 6.7 ilustra el flujo de energía desde las baterías hacia las cargas críticas a lo largo del año en el escenario crítico.

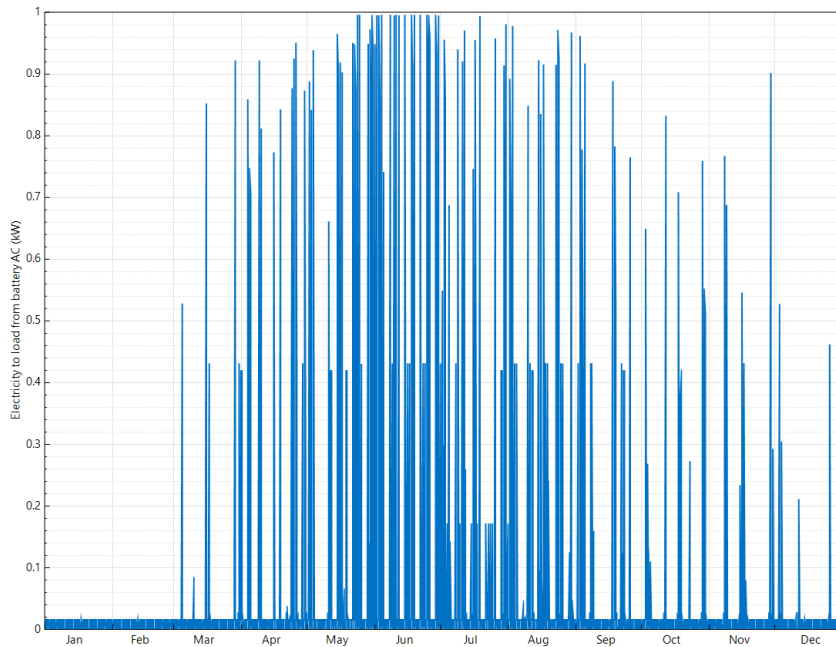


Fig. 6.7 Flujo energético desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

De la figura 6.7 se desprende que, durante los meses de invierno, en particular de mayo a agosto, el aporte de las baterías es considerablemente mayor. Este comportamiento está directamente relacionado con la baja radiación solar en estos meses, que limita la generación fotovoltaica, obligando a las baterías a asumir un papel predominante para cubrir la demanda de las cargas críticas.

En estos períodos, las baterías actúan como la principal fuente de respaldo energético, asegurando la continuidad del suministro en condiciones adversas y reforzando la resiliencia del sistema. Este flujo de energía evidencia la capacidad del sistema para garantizar la autonomía energética en escenarios críticos.

En contraste, durante los meses de verano, el flujo energético desde las baterías hacia las cargas es mucho menor. Esto se debe a la alta generación solar, que permite cubrir directamente la demanda de las cargas críticas sin necesidad de recurrir al almacenamiento en baterías. Este comportamiento confirma que, en los meses de alta irradiación, el sistema puede operar de manera más eficiente, maximizando el uso directo de la energía generada por los paneles solares.

Este análisis refuerza la importancia de las baterías como un componente estratégico del sistema, especialmente en los meses de menor generación solar, contribuyendo a la estabilidad y continuidad del suministro energético en las condiciones más críticas.

Ahora bien, la figura 6.8 refleja los flujos de energía entre el sistema y la red eléctrica durante el año en el escenario crítico. Los valores positivos indican los excedentes de energía exportados a la

red, mientras que los valores negativos corresponden a la energía importada desde la red.

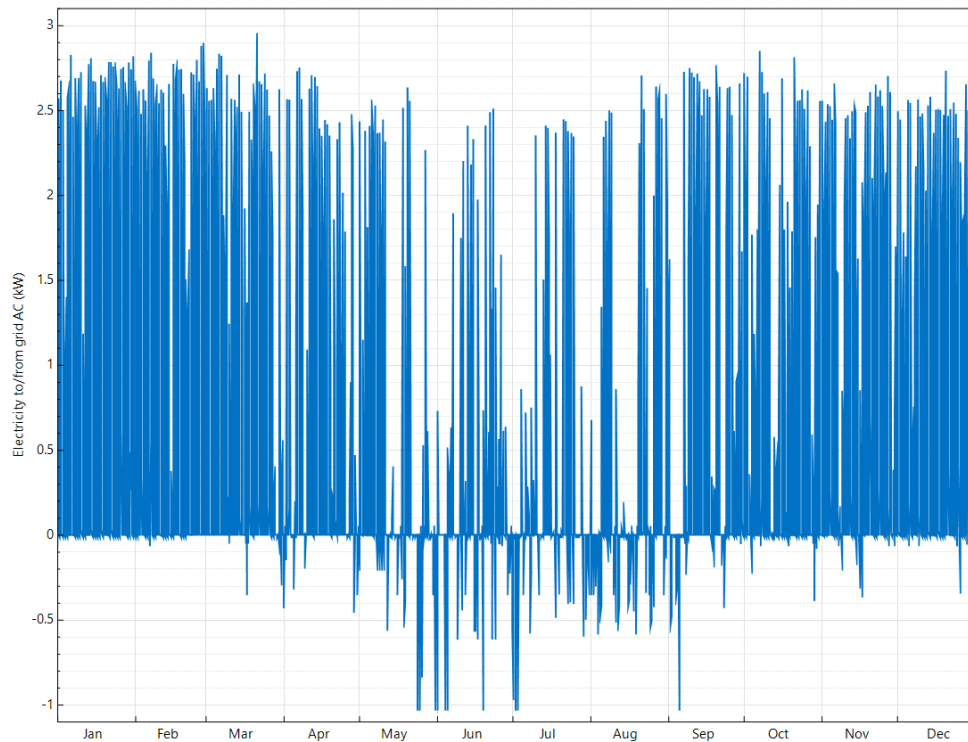


Fig. 6.8 Flujo energético entre el sistema y la red eléctrica – Caso 2. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

En este escenario, los altos excedentes exportados son una consecuencia directa de la mayor capacidad instalada del sistema fotovoltaico. Durante los meses de alta irradiación solar, principalmente entre octubre y marzo, el sistema genera una cantidad significativa de energía que supera ampliamente la demanda de las cargas críticas, lo que resulta en una exportación constante y considerable hacia la red eléctrica. Este comportamiento resalta el sobredimensionamiento del sistema, que, si bien asegura la disponibilidad de energía, también genera excedentes significativos que contribuyen al retorno económico mediante el net billing [51].

En contraste, la reducción en la energía importada desde la red, en comparación con el escenario promedio, demuestra la capacidad del sistema para satisfacer la mayoría de la demanda de las cargas críticas de manera autónoma, incluso en meses de menor generación solar. Durante los meses de invierno, aunque la generación solar es limitada, las baterías y la capacidad instalada de los paneles permiten cubrir gran parte de la demanda sin necesidad de depender significativamente de la red eléctrica. Este aporte reducido de la red refuerza la autonomía energética del sistema en condiciones críticas.

En resumen, la figura 6.8 evidencia la alta capacidad del sistema para generar y exportar

excedentes de energía, maximizando el aprovechamiento de la energía renovable, al tiempo que minimiza la dependencia de la red eléctrica en escenarios críticos. Estos resultados sugieren que, aunque el sistema está sobredimensionado, asegura resiliencia y genera beneficios económicos adicionales gracias a los excedentes exportados.

6.3.3 Análisis Comparativo de Escenarios

En Tabla 6.1 se presentan los indicadores clave de rendimiento del sistema en dos escenarios, permitiendo identificar diferencias, fortalezas y oportunidades en su desempeño. Este análisis evalúa la efectividad del sistema para garantizar el suministro energético y determinar la configuración más eficiente.

Tabla 6.1 Indicadores claves del sistema. Elaboración propia basado en resultados de [50]

Indicador	Escenario Promedio	Escenario Crítico
Electricidad Generada	2.310 [kWh]	4.765 [kWh]
Consumo total cargas críticas	1.290,7 [kWh]	1.290,7 [kWh]
Perfomance Ratio	0,78	0,81
Energía importada desde la red	277,7 [kWh]	140,36 [kWh]
Energía exportada a la red	1.301,6 [kWh]	3.612,8 [kWh]
Eficiencia de las baterías	91,34 [%]	91,50 [%]
Energía cargada en baterías desde el sistema fotovoltaico	372,9 [kWh]	337,01 [kWh]
Energía cargada en baterías desde la red	109,05 [kWh]	59,56 [kWh]
Porcentaje de carga de las baterías desde el sistema fotovoltaico	76,1 [%]	84,7 [%]
Energía descargada de las baterías	437,16 [kWh]	359,71 [kWh]

Los resultados observados en Tabla 6.1 muestran que, bajo el escenario promedio, el sistema muestra una capacidad adecuada para cubrir la demanda de las cargas críticas en la mayoría del año. Sin embargo, en los meses de invierno, la generación de energía no alcanza para satisfacer completamente la demanda crítica debido a la menor irradiación solar, lo que obliga a depender de la red eléctrica y de las baterías para suplir los déficits. En este caso, la energía importada desde la red (277,77 [kWh]) es clave para mantener la operación del sistema. A pesar de esta limitación, las baterías permiten dar continuidad al suministro durante las fallas del suministro simuladas, asegurando que las cargas críticas no se vean afectadas. Además, se exportan 1.301,6 [kWh] de excedentes a la red, lo que contribuye a la rentabilidad del sistema gracias al net billing [51].

En el escenario crítico, el sistema está sobredimensionado, con una generación de 4.765 [kWh] que supera ampliamente la demanda crítica de 1.290,7 [kWh]. Esta sobrecapacidad permite exportar 3.612,78 [kWh] de energía a la red, lo que maximiza los ingresos económicos por los excedentes, pero también sugiere un potencial ajuste en el diseño para reducir los costos iniciales asociados con esta configuración. Por otro lado, la dependencia de la red eléctrica es menor (140,36 [kWh]), lo que refleja la capacidad del sistema para operar de manera autónoma, incluso en condiciones críticas. Las baterías también juegan un papel clave, con un 84,7% de su carga proveniente de los paneles solares, reflejando el alto aprovechamiento de la generación renovable.

En ambos escenarios, las baterías muestran una alta eficiencia (91,34% en el escenario promedio y 91,50% en el escenario crítico) y son capaces de suplir completamente la demanda de las cargas críticas en las fallas simuladas. En el escenario promedio, las baterías son fundamentales para cubrir los déficits de generación en los meses de baja irradiación, mientras que, en el escenario crítico, contribuyen a la resiliencia del sistema al maximizar el uso de la energía renovable generada.

6.3.4 Nueva Configuración Recomendada

Tras evaluar los escenarios promedio y crítico, se desarrolló una configuración intermedia con cuatro paneles solares y sin cambios en el sistema de almacenamiento. Este diseño combina las ventajas de ambos casos previamente evaluados, optimizando la relación entre generación de energía, uso eficiente de las baterías y dependencia reducida de la red eléctrica. La configuración intermedia asegura un equilibrio técnico y operativo, garantizando la cobertura y la continuidad del suministro eléctrico a la demanda crítica incluso en los meses de baja irradiación solar, mientras que evita el sobredimensionamiento observado en el escenario crítico.

Los principales resultados de esta configuración se resumen a continuación:

- Energía generada anualmente: 3.130 [kWh]
- Energía exportada a la red: 2.047 [kWh]
- Energía importada desde la red: 207 [kWh]
- Eficiencia de las baterías: 91,42 [%]
- Porcentaje de carga de baterías desde el sistema: 79,3 [%]

Estos valores reflejan un sistema capaz de satisfacer las demandas críticas con menor dependencia de la red eléctrica en meses de baja irradiación, evitando el sobredimensionamiento característico del escenario crítico.

Para ilustrar el comportamiento de esta configuración, se generaron gráficos que analizan aspectos claves del sistema. Estas representaciones gráficas se encuentran detalladas en el [Anexo B](#) complementando la discusión presentada en esta sección. A continuación, se describen los hallazgos más relevantes:

- Generación mensual de energía vs demanda [kWh]: En meses de alta irradiación solar, la generación excede la demanda crítica, permitiendo exportar energía a la red. En meses de baja irradiación, el sistema ajusta la generación para cubrir las cargas críticas, complementándose con la energía almacenada en las baterías y un aporte mínimo de la red eléctrica. (Ver [figura B.1](#))
- Estado de carga de las baterías (SOC %): Las baterías operan dentro de rangos eficientes la mayor parte del tiempo, con descensos en el SOC en meses críticos que reflejan su uso intensivo para respaldar las cargas críticas. En períodos de alta generación, mantienen niveles óptimos de carga, asegurando su disponibilidad. (Ver [figura B.2](#))
- Flujo energético entre el sistema y la red eléctrica: El sistema minimiza la dependencia de la red, importando únicamente 207 [kWh] anuales, mientras que exporta 2.047 [kWh], maximizando el aprovechamiento económico de los excedentes. (Ver [figura B.3](#))
- Flujo energético desde las baterías hacia las cargas críticas: Las baterías cumplen un rol fundamental en garantizar la continuidad del suministro, especialmente durante meses de baja generación solar o ante fallas simuladas. Este flujo asegura la autonomía del sistema en momentos críticos. (Ver [figura B.4](#))

Los patrones observados reflejan la robustez del diseño para responder ante escenarios normales y críticos. Los gráficos completos que sustentan este análisis se encuentran en el [Anexo B](#).

En conclusión, la implementación de un sistema híbrido de paneles solares y baterías ofrece beneficios significativos en términos de autonomía energética, continuidad del suministro eléctrico y

resiliencia ante fallas. Además, maximiza la utilización de recursos renovables, disminuyendo la dependencia de la red eléctrica y contribuyendo a un sistema más sostenible. Este análisis demuestra que una configuración óptima no solo puede garantizar la continuidad del suministro a las cargas críticas, sino también mejorar la rentabilidad económica del sistema a través de la exportación de excedentes. En el capítulo 7 se profundizará en la viabilidad económica, reforzando los hallazgos de esta sección.

6.4. Plataforma de Gestión Energética

La implementación del sistema de gestión energética propuesto en este proyecto se lleva a cabo mediante una plataforma digital de visualización y monitoreo desarrollada en Power Bi. Esta herramienta consolida los resultados técnicos más relevantes obtenidos a partir de las simulaciones en el software SAM, ofreciendo un entorno dinámico para analizar el desempeño del sistema y sus componentes principales.

La plataforma está diseñada para representar gráficamente las variables clave relacionadas con la operación del sistema, englobando aspectos técnicos como el rendimiento de los paneles solares, el comportamiento del sistema de almacenamiento y la interacción con la red eléctrica. Con esto, se busca apoyar al operador en la gestión eficiente del sistema, asegurando la continuidad del suministro eléctrico y permitiendo evaluar su comportamiento técnico bajo diferentes escenarios.

Dentro de los principales objetivos de esta plataforma se encuentran:

1. Implementar el sistema propuesto: Materializar la propuesta mediante una herramienta digital que permita visualizar y analizar los resultados técnicos clave del sistema de gestión energética.
2. Monitorear el desempeño técnico: Representar de forma gráfica e interactiva las variables operativas más importantes del sistema, permitiendo evaluar su rendimiento y comportamiento en diferentes condiciones.
3. Facilitar la toma de decisiones técnicas: Proveer información accesible y organizada para gestionar de manera eficiente la operación del sistema energético.
4. Análisis del sistema: Analizar el comportamiento técnico del sistema de gestión de energía propuesto en un horizonte de 25 años.

6.4.1 Diseño Conceptual de la Plataforma

La plataforma de gestión energética fue diseñada como una herramienta digital basada en

Power Bi, orientada a visualizar y analizar las variables técnicas más relevantes del sistema propuesto. Los datos simulados en el software SAM se organizaron en plantillas Excel, seleccionando las métricas clave como la generación de energía, el estado de carga de las baterías, la energía exportada a la red, la energía aportada por las baterías a las cargas, etc.

El diseño prioriza la claridad y accesibilidad, permitiendo evaluar el desempeño del sistema propuesto bajo diferentes escenarios. Su estructura está enfocada en:

1. Representación Integral: Visualizar las principales variables técnicas del sistema.
2. Facilidad de Uso: Garantizar gráficos comprensibles y dinámicos.
3. Flexibilidad: Permitir la adaptación de los gráficos y visualizaciones a diferentes escenarios y requisitos específicos, proporcionando una herramienta versátil para la toma de decisiones bajo diversas condiciones operativas.

Ahora, en la figura 6.9 se presenta el diagrama conceptual de la plataforma de gestión energética, que ilustra el trabajo desde la simulación en SAM hasta la evaluación final de desempeño.

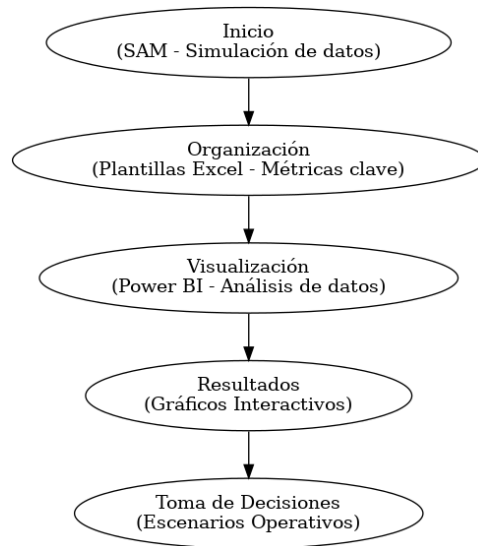


Fig. 6.9 Diagrama Plataforma de Gestión Energética. Fuente: Elaboración propia

6.4.2 Preparación e Integración de los Datos

Para implementar la plataforma de gestión energética, se organizó y estructuró la información obtenida del software SAM. Los resultados simulados, correspondientes a un horizonte de evaluación de 25 años, se clasificaron en plantillas Excel para el sistema de gestión propuesto, las cuales aseguran la uniformidad de los datos, facilitando su uso en Power Bi.

Posteriormente, los datos fueron integrados a Power Bi, donde se crearon modelos de datos que conectaron las variables más relevantes, aquello permitió establecer relaciones entre tablas y

gráficos, necesarias para la representación dinámica de los resultados técnicos.

En el entorno de Power Bi, se desarrollaron representaciones gráficas interactivas que permiten analizar el desempeño técnico del sistema de manera clara y accesible. Estas visualizaciones están diseñadas para facilitar el entendimiento de las variables clave y evaluar su comportamiento a lo largo del horizonte de evaluación. Además, se incorporaron herramientas de filtrado que permiten explorar datos correspondientes a distintas fechas de operación y escenarios, adaptándose a las necesidades específicas del análisis técnico.

6.4.3 Interpretación de los Datos Visualizados

La plataforma de gestión energética en Power Bi permite interpretar los resultados técnicos del sistema propuesto de forma clara y accesible. A través de gráficos y paneles interactivos, se destacan las principales métricas operativas, brindando una herramienta clave para comprender el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios.

Las visualizaciones muestran tendencias relevantes, como el comportamiento anual del estado de carga de las baterías o los niveles de energía exportada a la red. Por ejemplo, al analizar el estado de carga, se pueden identificar períodos críticos en los que las baterías operan cerca de su límite inferior, lo cual pueden guiar decisiones sobre ajustes en la operación o la configuración del sistema. Asimismo, los datos sobre la exportación de energía permiten evaluar la contribución del sistema al esquema de net billing, optimizando su uso en función de la demanda y generación disponible.

Un aspecto esencial de la plataforma es su capacidad para filtrar y segmentar datos por período, lo que facilita el análisis detallado de momentos específicos de operación. Esto es particularmente útil para entender el impacto de eventos estacionales o fallas simuladas en el rendimiento del sistema, brindando información clave para una gestión preventiva y reactiva.

En conjunto, la interpretación de los datos visualizados permite a los operadores identificar patrones, evaluar el desempeño de los componentes principales, y tomar decisiones fundamentadas que aseguren la eficiencia y continuidad del sistema energético.

6.4.4 Limitaciones y Carga de Datos Reales

La plataforma desarrollada en este proyecto utiliza datos simulados generados por el software SAM, que representan el desempeño técnico del sistema durante un horizonte de 25 años. Esto permite analizar tendencias y resultados clave bajo condiciones controladas. Sin embargo, una implementación física requeriría el uso de datos en tiempo real provenientes de dispositivos instalados

en el sistema, como inversores, baterías y sensores de red eléctrica.

Esta transición hacia datos reales implicaría la incorporación de sistemas de adquisición y carga automatizada, empleando protocolos de comunicación estándar como Modbus o MQTT. Además, sería esencial validar y tratar estos datos para garantizar que sean precisos y compatibles con las métricas representadas en la plataforma.

La capacidad de manejar datos en tiempo real no solo resolvería esta limitación, sino que también aumentaría la utilidad de la herramienta en un entorno físico, permitiendo al operador tomar decisiones basadas en información actualizada y optimizar la operación del sistema energético.

6.4.5 Presentación y Disponibilidad de la Plataforma

La plataforma de gestión energética desarrollada en Power Bi representa una herramienta accesible y visualmente intuitiva para el análisis técnico del sistema propuesto. A continuación, se presentan en las figuras 6.10, 6.11 y 6.12 tres de los paneles más relevantes de visualización, que demuestran la capacidad de la plataforma para analizar las métricas clave del sistema. Estos paneles han sido seleccionados por su representatividad y porque brindan una visión general de los aspectos más importantes del sistema energético.

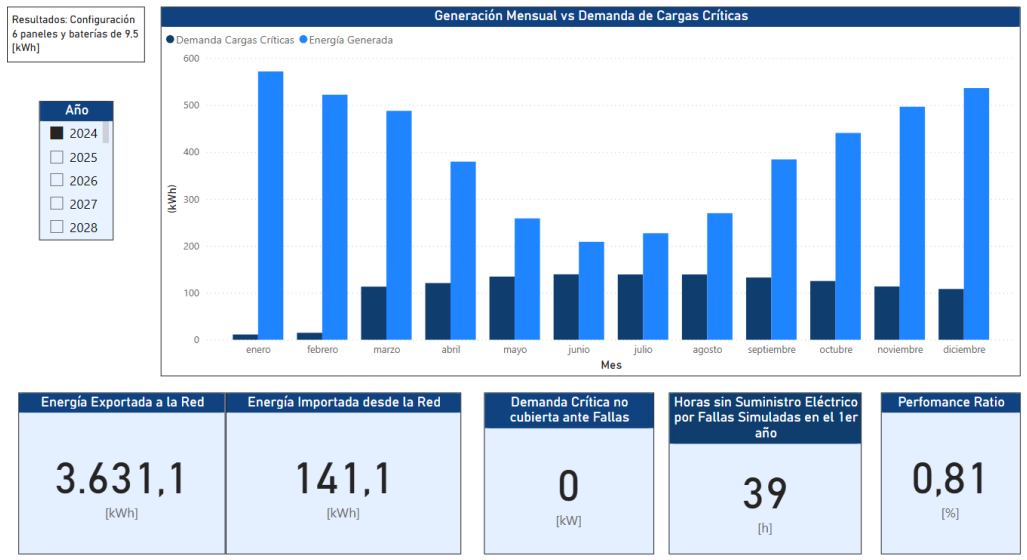
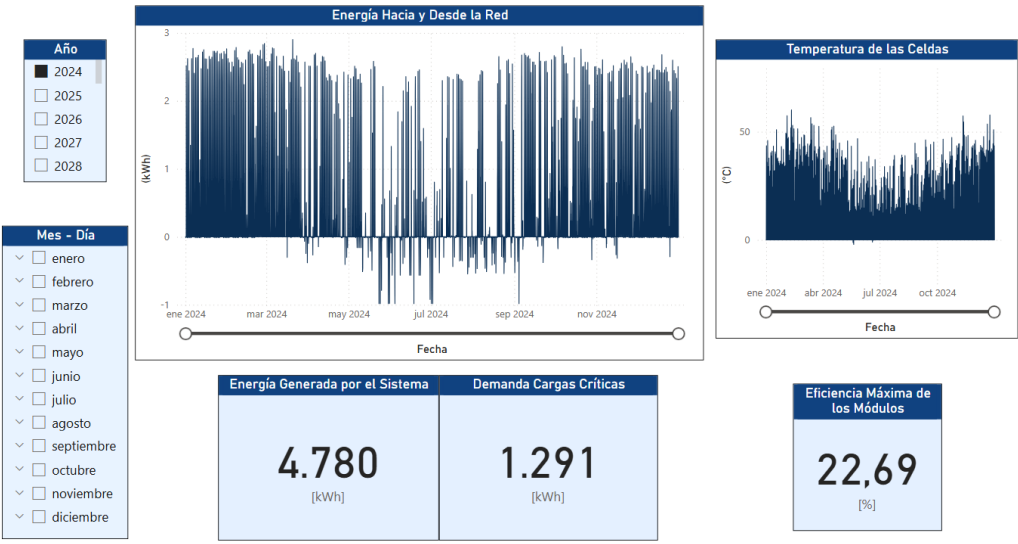


Fig. 6.10 Panel 1 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia

En la figura 6.10 se presenta el panel que permite visualizar la relación entre la energía generada por el sistema y la demanda de las cargas críticas durante cada mes. Además, incluye indicadores clave como la energía exportada e importada a la red, la demanda no cubierta en caso de fallas, las horas sin suministro eléctrico de la red externa a causa de fallas simuladas y el índice de

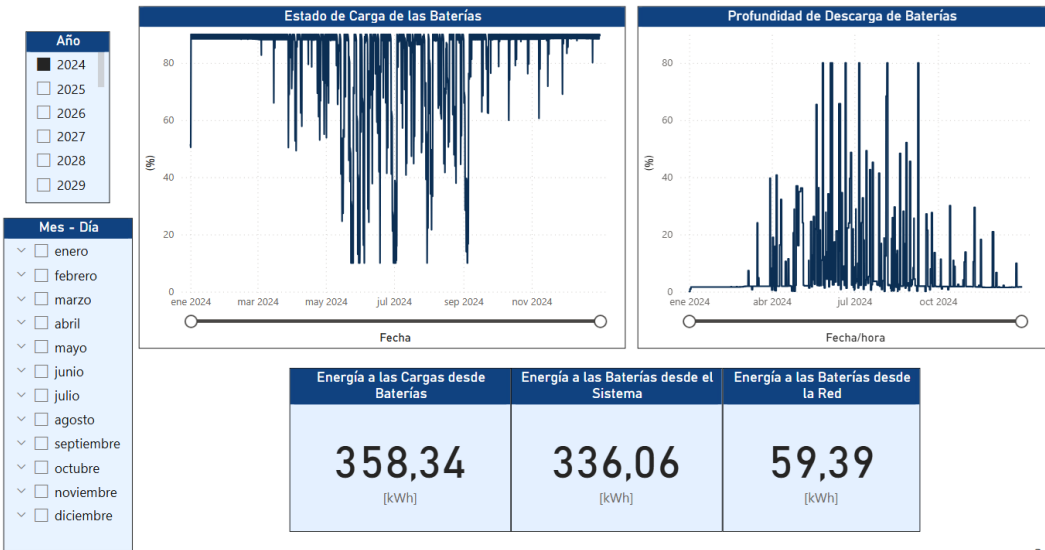
rendimiento del sistema (del inglés *Perfomance Ratio*). Esto permite evaluar el equilibrio energético y la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.



2

Fig. 6.11 Panel 2 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia

En la figura 6.11 se visualiza el panel que proporciona una visión detallada de las tendencias de energía exportada e importada a la red, así como la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. Esto permite identificar patrones en la interacción entre el sistema y la red eléctrica, lo que resulta calve para optimizar la operación y maximizar el uso de los recursos disponibles.



3

Fig. 6.12 Panel 3 plataforma de gestión. Fuente: Elaboración propia

En la figura 6.12 se ilustra el panel que analiza el comportamiento de las baterías, presentando el estado de carga y la profundidad de descarga a lo largo del tiempo. Además, incluye indicadores

clave como la energía aportada a las cargas desde las baterías, y la energía a las baterías desde el sistema, lo que permite evaluar la capacidad del almacenamiento energético y su contribución a la confiabilidad del sistema en general.

Aunque la plataforma incluye dos paneles adicionales orientados específicos, como las condiciones ambientales (temperatura ambiente e irradiancia global) y los indicadores detallados de las baterías (eficiencia, ciclos de carga, corriente, etc.), se ha decidido destacar estos tres paneles para demostrar de manera representativa la funcionalidad general de la plataforma.

Además, la interfaz de Power Bi ofrece herramientas de filtrado dinámico que permiten analizar los datos en detalle, como la selección de períodos específicos o el comportamiento bajo configuraciones particulares. Esto facilita un análisis flexible y personalizado según las necesidades del operador.

La plataforma puede ser accesible de dos maneras principales, a través de Power Bi Service, donde el archivo se encuentra alojado para su consulta remota mediante un enlace compartido, lo que permite interactuar con la información desde cualquier dispositivo conectado a internet, la otra forma de acceso a la plataforma es a través de un archivo de Power Bi Desktop que puede ser descargado y abierto en la aplicación correspondiente, brindando la misma funcionalidad interactiva.

En este informe, se incluye el enlace al archivo alojado en Power Bi Service en la sección de referencias (ver referencia [\[52\]](#)), asegurando la facilidad de acceso para quienes desee explorar la plataforma en detalle.

En resumen, esta plataforma de gestión energética desarrollada en Power Bi constituye la implementación práctica del sistema propuesto, consolidando los datos simulados en una herramienta accesible y funcional. A través de paneles visuales dinámicos, permite a los operadores monitorear las métricas clave del sistema, facilitando la toma de decisiones informadas y mejorando la eficiencia operativa.

Si bien la plataforma actualmente utiliza datos simulados para un horizonte de 25 años, su diseño es adaptable a la integración de datos en tiempo real en una futura implementación física. Este aspecto refuerza su potencial como herramienta de análisis continuo y optimización del sistema.

En conclusión, esta plataforma no solo representa una solución innovadora para la visualización y monitoreo del sistema, sino que también abre la puerta a su evolución hacia entornos operativos más complejos, destacándose como un componente esencial en la gestión energética.

7. Análisis Económico y Ambiental

El análisis económico y ambiental del sistema de gestión energética propuesto es fundamental para evaluar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. Este capítulo tiene como objetivo analizar los costos asociados con la implementación y operación del sistema, así como los beneficios económicos y ambientales que aporta su adopción. Además, se examina cómo este proyecto contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar los objetivos de sostenibilidad de la escuela y su comunidad.

La evaluación económica incluye el desglose de costos iniciales, operativos y de mantenimiento, además de cálculos como el retorno de inversión (ROI), valor actual neto (VAN) y los ahorros proyectados gracias a la venta de excedentes energéticos mediante el net billing. Por su parte, el análisis ambiental estima las emisiones evitadas a través del uso de energías renovables y discute los impactos ambientales de los componentes del sistema, como los paneles solares y baterías.

Este capítulo responde preguntas clave, como: ¿Es económicamente viable este proyecto?, ¿Cuánto tiempo tomará recuperar la inversión inicial?, ¿Qué impacto tiene en la reducción de emisiones de carbono? Estas respuestas no solo justifican la implementación del sistema desde una perspectiva financiera, sino que también destacan su papel en la transición hacia un futuro más sostenible.

7.1. Evaluación Económica

La evaluación económica del proyecto busca analizar la viabilidad financiera de implementar el sistema de gestión energética en la escuela, considerando tanto los costos asociados como los beneficios obtenidos a lo largo de su vida útil. A través de esta evaluación, se pretende determinar si la inversión inicial, sumada a los costos operativos, se justifica en términos de los ahorros generados por la disminución en el consumo eléctrico y los ingresos por la venta de excedentes mediante el sistema de net billing.

En esta sección se desglosan los costos iniciales, los costos operativos, y los beneficios económicos del sistema, para luego realizar un análisis comparativo de las tres configuraciones simuladas (3, 4 y 6 paneles solares). A través de indicadores financieros como el ROI, VAN y TIR, se determina la configuración más eficiente desde una perspectiva económica.

7.1.1 Costos Iniciales

La evaluación de los costos iniciales es fundamental para analizar la viabilidad económica del proyecto de gestión energética. Estos costos incluyen todos los elementos necesarios para la implementación del sistema, desde los componentes principales hasta la instalación y trámites asociados.

Dentro de los costos iniciales, se incluyen los paneles solares, las baterías de almacenamiento y el inversor – regulador como los componentes eléctricos principales. Entre los costos adicionales, destacan la mano de obra especializada, el medidor bidireccional para ver los excedentes de la generación, los permisos y trámites administrativos, y la infraestructura adicional, como cableado, sistemas de seguridad y adecuaciones físicas.

A continuación, en Tabla 7.1 se presenta un desglose detallado de los costos estimados obtenidos de cotizaciones recientes y referencias del mercado para cada configuración del sistema de gestión de energía propuesto (3, 4 y 6 paneles solares). Este desglose incluye todos los rubros mencionados.

Tabla 7.1 Costos iniciales de cada configuración. Adaptado de [47][53][54][55]

Componente	Costo Unitario	Configuración 1 (3 paneles)	Configuración 2 (4 paneles)	Configuración 3 (6 paneles)
Paneles Solares	\$105.500	\$316.500	\$422.200	\$633.000
Baterías	\$1.181.800	\$2.363.600	\$2.363.600	\$2.363.600
Inversor - Cargador	\$761.600	\$761.600	\$761.600	\$761.600
Cableado	\$1.500/metro	\$75.000	\$82.500	\$97.500
Estructura y Soportes	\$36.000/panel	\$108.000	\$144.000	\$216.000
Fusibles y Protecciones	-	\$41.200	\$41.200	\$41.200
Mano de obra	\$17.500/hora	\$420.000	\$455.000	\$525.000
Medidor Bidireccional	\$43.900	\$43.900	\$43.900	\$43.900
Permisos y Trámites	-	\$576.000	\$576.000	\$576.000
Costo Total	-	\$4.705.800	\$4.890.000	\$5.257.800

Los costos varían entre configuraciones principalmente debido a la cantidad de paneles solares, lo que impacta directamente en el costo de los soportes y estructuras necesarias, así como en el cableado. Además, el incremento en el tiempo de instalación también influye en la mano de obra, dado

que sistemas con más paneles requieren mayor trabajo. Sin embargo, otros componentes como el inversor, las baterías y el medidor bidireccional mantienen un costo constante, ya que son comunes a todas las configuraciones analizadas.

7.1.2 Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento (O & M) son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de gestión energética durante todo el horizonte de evaluación de 25 años. Para este análisis, se considerará un costo anual equivalente al 1% de la inversión inicial para cada configuración, de acuerdo con estándares nacionales reportados para sistemas fotovoltaicos [55]. Este enfoque permite estimar de manera uniforme los costos asociados al mantenimiento del sistema, independientemente de la capacidad instalada o el tamaño del sistema.

Entre las tareas de mantenimiento y los reemplazos de componentes más relevantes, se incluyen las siguientes:

1. Paneles solares: Tienen una vida útil de aproximadamente 25 años, con una degradación anual en su capacidad de generación cercana al 0,5% [27]. Requieren limpiezas periódicas, generalmente semestrales, y revisiones estructurales anuales para garantizar su estabilidad y eficiencia.
2. Baterías: Con una vida útil promedio de 10 a 12 años [37], dependiendo de los ciclos de carga y descarga, se considerará un reemplazo único en el horizonte de evaluación. Esto se debe a que las baterías desempeñarán un rol activo en la gestión energética del sistema, estando sujetas a un mayor número de ciclos de carga y descarga, lo que reducirá su vida útil en comparación con baterías usadas exclusivamente para respaldo. No obstante, se limitará a un solo reemplazo debido a los altos costos asociados a este componente.
3. Inversor – cargador: Este componente posee una vida útil promedio de 10 años [56], lo que implica que deberá ser reemplazada al menos una vez en los 25 años de evaluación.
4. Otros costos de mantenimiento: Incluyen inspecciones periódicas del sistema eléctrico, ajustes menores en las estructuras y soportes, así como la reposición de fusibles y protecciones en caso de fallas.

Los costos de mantenimiento calculados bajo este enfoque se reflejan directamente en los flujos de caja de cada configuración, garantizando que el análisis económico sea consistente y basado en proyecciones confiables. Además, los costos asociados al reemplazo de baterías e inversores se mantienen constantes para todas las configuraciones, dado que dependen únicamente de los ciclos de

vida útil de los componentes.

De esta forma, los costos totales de operación y mantenimiento estarán estrechamente relacionados con la inversión inicial de cada configuración, simplificando el análisis comparativo.

7.1.3 Flujo de Caja e Ingresos Proyectados

El flujo de caja proyectado es una herramienta esencial para evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto, ya que permite visualizar los ingresos y egresos asociados al proyecto a lo largo del horizonte de evaluación de 25 años. Este análisis considera los costos iniciales de inversión, los costos de operación y mantenimiento, y también los ingresos generados por la venta de excedentes energéticos mediante el esquema de net billing [51].

Uno de los ingresos del proyecto proviene de la venta de los excedentes de energía generada por el sistema. Según las normativas vigentes en Chile, la venta de energía excedentaria se realiza mediante precios estabilizados, fijados por la Comisión Nacional de Energía (CNE) [57]. Para la ciudad de Los Ángeles, el nudo más cercano es Charrúa, y el precio utilizado corresponde al promedio de los seis bloques horarios definidos para dicho nodo. Este cálculo arroja un valor promedio de \$57,27 por cada kWh vendido, considerando los precios estabilizados publicados por la CNE [57].

La energía generada por el sistema que es consumida directamente por la instalación genera ahorros debido a la reducción significativa en los pagos de las facturas eléctricas, aunque no representa un ingreso directo, se considera como un ingreso en el flujo de caja, ya que reduce los costos operativos de la instalación.

Adicionalmente, el análisis considera una tasa promedio del Índice de Precios al Consumidor (IPC) de un 4,6%, basado en datos históricos de los últimos 10 años publicados por el Banco Central de Chile [58], para reflejar de manera conservadora el impacto de la inflación en los precios generales durante el horizonte de evaluación. Además, para el primer año, se incorporó un alza excepcional del 26% en los costos de electricidad, en línea con los ajustes tarifarios proyectados por la Comisión Nacional de Energía [57][59]. Esto asegura que los ingresos y ahorros proyectados y los costos considerados en el flujo de caja reflejen con precisión las condiciones económicas actuales y futuras.

Los flujos de caja completos, que detallan los ingresos, egresos y costos de reemplazo de cada configuración, se presentan en el [Anexo C](#) del informe. A partir de ellos, se calcularon los indicadores económicos claves que permiten evaluar la rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión inicial. A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas y su interpretación en el contexto del proyecto:

1. Valor Actual Neto (VAN): Representa el valor actual de los flujos netos de efectivo del proyecto, descontados a una tasa que refleja el costo de oportunidad del capital, para este proyecto, se considera una tasa de descuento del 10% [56], valor conservador para proyectos de este tipo [60]. Un VAN positivo indica que el proyecto genera valor económico, mientras que un VAN negativo señala que los ingresos no son suficientes para cubrir los costos y la inversión inicial. La ecuación (7.1) indica cómo se calcula el VAN:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \left(\frac{\text{Flujo Neto Anual}_t}{(1+r)^t} \right) - \text{Inversión Inicial} \quad (7.1)$$

donde,

$\text{Flujo Neto Anual}_t$: Flujo neto de efectivo generado o perdido en el año t ,

n : Horizonte de evaluación del proyecto,

r : Tasa de descuento, y

t : Año específico dentro del horizonte de evaluación, variando de 1 hasta n .

2. Tasa Interna de Retorno (TIR): La TIR es la tasa de descuento que iguala los ingresos y egresos del proyecto en valor presente, o, en otros términos, la tasa que iguala a 0 el valor del VAN. Si la TIR supera la tasa de descuento considerada, el proyecto se considera viable.
3. Payback: Este indicador mide el número de años necesarios para recuperar la inversión inicial, considerando los flujos netos acumulados. Se calcula como el primer año en el que el flujo acumulado deja de ser negativo.
4. Retorno sobre la Inversión (ROI): El ROI mide el porcentaje de retorno obtenido sobre la inversión inicial. Un ROI positivo indica rentabilidad, mientras que un ROI negativo refleja pérdidas. La ecuación (7.2) refleja el cálculo del ROI:

$$ROI = \frac{\text{Ingresos Totales} - \text{Inversión Inicial}}{\text{Inversión Inicial}} * 100 \quad (7.2)$$

Ahora, en Tabla 7.2, se presentan los resultados del VAN, TIR, payback y ROI para las tres configuraciones analizadas, proporcionando una visión general de la viabilidad económica del sistema:

Tabla 7.2 Indicadores económicos para cada configuración. Fuente: Elaboración propia

Indicador	Configuración 1 (3 paneles)	Configuración 2 (4 paneles)	Configuración 3 (6 paneles)
VAN	\$-2.844.006	\$-2.483.522	\$-1.689.827
TIR	2%	3%	6%
Payback (años)	22	20	17
ROI	-65,74%	-34,18%	27,30%

De acuerdo con Tabla 7.2, se observa que todas las configuraciones presentan un VAN negativo, indicando que los ingresos proyectados no son suficientes para recuperar la inversión inicial ni los costos de almacenamiento y reemplazo en el horizonte de evaluación.

La configuración 3 muestra el menor VAN negativo de \$-1.689.827, lo que indica que, aunque sigue siendo una inversión poco rentable económicamente, es la configuración más cercana para cubrir los costos. Esto contrasta con la configuración 1, que presenta el mayor VAN negativo correspondiente a -\$2.844.006, reflejando un desempeño económico considerablemente menos favorable.

Considerando el valor del TIR, todas las configuraciones obtienen valores positivos. La configuración 3 presenta la mayor TIR, de 6%, seguida por la configuración 2 con 3% y finalmente la configuración 1 con un 2%. Estos valores señalan que, aunque las configuraciones tienen un retorno porcentual positivo, ninguno supera la tasa de descuento utilizada en el análisis.

Respecto al Payback, todas las configuraciones logran recuperar la inversión dentro del horizonte de 25 años. La configuración 3 se destaca con el menor período de recuperación, de 17 años, seguida por la configuración 2 con 20 años y finalmente la configuración 1 con 22 años.

En resumen, la configuración de 6 paneles se posiciona como la opción más favorable desde un punto de vista económico. Aunque ninguna configuración resulta completamente viable en términos de VAN, la configuración de 6 paneles genera mayores ingresos a través del esquema del net billing, lo que mejora sustancialmente indicadores como el TIR y el ROI. Además, las diferencias en la inversión inicial entre las tres configuraciones son mínimas, lo que refuerza la ventaja de priorizar una opción que maximice los beneficios económicos a largo plazo. Técnicamente esta configuración también garantiza la cobertura total de la demanda crítica, fortaleciendo su posición como la más robusta para cumplir los objetivos del proyecto.

7.2. Análisis Ambiental

El análisis ambiental de este sistema de gestión energética busca entender el impacto positivo que puede tener la instalación de paneles solares, especialmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en la promoción del uso de energías renovables. Este apartado pone en evidencia cómo proyectos de este tipo pueden contribuir a un futuro más limpio y sostenible, al disminuir la dependencia de fuentes de energía convencionales.

Además, se destacan los beneficios ambientales en términos de emisiones evitadas y ahorro energético, justificando la relevancia de iniciativas de este tipo en el contexto actual de crisis climática y transición hacia una matriz energética más renovable y responsable.

7.2.1 Emisiones Evitadas

El análisis ambiental se centra en la configuración recomendada de 4 paneles solares, seleccionada por ser la que mejor equilibra las necesidades energéticas y los beneficios técnicos. Evaluar esta configuración permite representar los impactos ambientales de manera realista sin extender innecesariamente el análisis de las demás configuraciones estudiadas.

Para cuantificar las emisiones evitadas, se utilizó el factor de emisión promedio del sistema eléctrico chileno, estimado en $0,2421 \left[\frac{kgCO_2e}{kWh} \right]$ [61]. A lo largo del horizonte de evaluación de 25 años, el sistema proyecta generar un total de 73,44 [MWh], lo que evitará la emisión de 17,78 toneladas CO_2 a la atmósfera. Este impacto equivale aproximadamente a plantar 267 árboles o a eliminar las emisiones anuales de 3,9 vehículos convencionales [62].

Los resultados anuales detallados se presentan en la [figura C.4](#), del [Anexo C](#), que muestra la generación de energía por año y las emisiones evitadas en función del factor de emisión.

Este análisis considera únicamente las emisiones evitadas por la generación de energía renovable, sin incluir las emisiones asociadas a la fabricación, transporte e instalación de los paneles solares, lo que podría ser objeto de estudios futuros.

Con este enfoque, el sistema de gestión energético no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también refuerza el compromiso de adoptar tecnologías sostenibles que benefician tanto al medio ambiente como a las comunidades donde se implementen. Un aumento en la adopción de tecnologías como esta, sumado a políticas gubernamentales de incentivos, podría amplificar los beneficios y acelerar la transición hacia una matriz energética más limpia.

7.2.2 *Impacto Ambiental de los Componentes Principales*

El sistema de gestión energética propuesto utiliza paneles solares, baterías y un inversor – regulador, cuyos impactos ambientales son relevantes desde su fabricación hasta su disposición final.

Los paneles solares tienen una vida útil estimada de 25 años [56], y aunque su fabricación genera emisiones significativas por el uso de materiales como silicio y aluminio, se compensa con la energía limpia generada, evitando 0,241 kg de CO_2 por kWh producido [61]. Al final de su vida útil, es posible recuperar hasta el 90% de sus materiales mediante procesos de reciclaje avanzados, aunque aún existen desafíos relacionados con el manejo de residuos específicos [63].

Las baterías de litio son fundamentales para garantizar la continuidad del suministro energético del sistema, pero su fabricación tiene un impacto ambiental considerable, derivado de la extracción de litio, cobalto y níquel [64], metales esenciales para su producción. Al término de su vida útil, que se estima entre 10 y 12 años [37], el manejo de las baterías representa un desafío ambiental y de seguridad. Aunque se han desarrollado tecnologías capaces de reciclar hasta el 80% de los metales valiosos que contienen, su implementación aún es limitada, especialmente en regiones donde el acceso a instalaciones adecuadas para el reciclaje es restringido. Además, el almacenamiento inadecuado o la disposición incorrecta de estas baterías puede generar riesgos significativos, como fugas de materiales tóxicos o incendios, lo que resalta la necesidad de gestionar de manera responsable su reciclaje y disposición final [64].

Los inversores poseen un bajo impacto ambiental directo durante su operación, sin embargo, su fabricación y disposición final presentan retos significativos debido a la inclusión de metales preciosos. Estos materiales, aunque altamente reciclables, enfrentan dificultades en su recuperación debido al diseño de los equipos [65], lo que limita su reciclaje eficiente. Actualmente, solo un pequeño porcentaje de inversores es reciclado correctamente, lo que subraya la importancia de desarrollar tecnologías y políticas enfocadas en su recuperación sostenible [65].

A pesar de los desafíos asociados con la fabricación y disposición de los componentes del sistema, sus beneficios en términos de sostenibilidad superan con creces estos impactos. Esto refuerza la importancia de adoptar tecnologías como la fotovoltaica, cuyas ventajas ambientales y sociales son significativamente superiores a las de las fuentes de energía convencionales, como se analiza en la siguiente subsección.

7.2.3 *Comparativa y Contribución Ambiental*

La implementación de un sistema de gestión energética basado en generación fotovoltaica representa una alternativa significativamente más sostenible en comparación con las fuentes convencionales de energía, como el carbón, diésel y gas natural. Las centrales térmicas, durante su operación, emiten cantidades significativas de gases contaminantes, como CO_2 y partículas, que contribuyen al cambio climático y afectan la calidad del aire. En contraste, los sistemas fotovoltaicos presentan la mayoría de sus impactos ambientales durante las etapas de fabricación e instalación, siendo considerablemente menores en su fase operativa [66].

Estudios recientes indican que el uso de paneles solares puede reducir hasta un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con fuentes fósiles durante su vida útil [66]. Este impacto positivo se traduce en una contribución directa hacia una matriz energética más limpia y sostenible, alineándose no solo con los compromisos globales de reducción de emisiones, sino también con los objetivos establecidos en la Política Energética Nacional 2050, que busca que al menos el 70% de la matriz energética chilena provenga de fuentes renovables para dicho año [67].

El sistema propuesto también refuerza varios Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS), en especial aquellos relacionados con energía limpia, consumo responsable y acción climática, como, por ejemplo, el ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”, al fomentar el uso de fuentes renovables, el proyecto promueve un acceso sostenible y eficiente a la electricidad, garantizando continuidad en el suministro eléctrico del centro educacional [68]. También el ODS 13 “Acción por el clima”, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el sistema contribuye activamente a la lucha contra el cambio climático y refuerza los compromisos globales en esta materia, por último, el ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, al promover entornos más resilientes y sostenibles para la comunidad local [68].

Esta alineación con los ODS subraya no solo los beneficios directos del proyecto para el centro educativo, sino también su impacto positivo en la comunidad y en el entorno global. El sistema propuesto no solo mejora la continuidad del suministro eléctrico, sino que también actúa como un ejemplo práctico de transición hacia un modelo energético más sostenible y responsable.

7.2.4 *Beneficios Sociales Indirectos*

El sistema de gestión de energía propuesto no solo aporta beneficios ambientales, sino también entrega un impacto social significativo al garantizar la continuidad del suministro eléctrico en la Escuela Colonia Árabe. Esto evita interrupciones en las actividades escolares, mejorando el entorno

educativo para estudiantes y docentes. Las fallas eléctricas suelen interrumpir el uso de equipos electrónicos, la climatización de aulas y una iluminación adecuada, elementos clave para asegurar un proceso educativo eficiente y de calidad. Además, en años anteriores, la escuela experimentó la pérdida de equipos electrónicos esenciales, como computadoras e impresoras, debido a fallas eléctricas, lo que generó un impacto adicional en la planificación académica y operativa.

Al evitar estas interrupciones, el sistema reduce también la necesidad de recuperar horas lectivas perdidas, lo que genera una carga adicional para estudiante y docentes. Estas pérdidas pueden afectar la planificación académica y el desarrollo de contenidos, complicando la gestión de recursos educativos. Aunque este beneficio no se refleja directamente en indicadores financieros, representa un ahorro indirecto al disminuir las consecuencias de las interrupciones en términos de tiempo y recursos, reforzando el valor integral del proyecto.

Además, este beneficio trasciende el ámbito técnico al alinearse con objetivos globales y locales de sostenibilidad, ya que proyectos como este promueven entornos más resilientes y equitativos, destacando el compromiso de la escuela con la innovación y la sostenibilidad.

En conclusión, el análisis económico y ambiental realizado en este capítulo demuestra que, aunque ninguna configuración es completamente viable desde una perspectiva económica, el sistema de gestión de energía propuesto genera beneficios significativos en términos técnicos y ambientales. La configuración de 6 paneles destaca por maximizar la exportación de excedentes y presentar los mejores indicadores económicos dentro del contexto evaluado, mientras que la configuración de 4 paneles ofrece un equilibrio entre las demandas críticas de las cargas y la generación óptima de energía.

Desde el punto de vista ambiental, el sistema contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de tecnologías sostenibles, alineándose con los compromisos nacionales y globales. Además, los beneficios sociales indirectos, como la continuidad de las actividades escolares, refuerzan el valor integral del proyecto, más allá de los indicadores financieros.

Estos hallazgos establecen una base sólida para las conclusiones del proyecto, que se explorarán en el siguiente capítulo, incluyendo recomendaciones y perspectivas futuras para la implementación de sistemas similares en contextos similares a este.

8. Conclusiones

8.1. Sumario General

En esta memoria de título se desarrolló un sistema de gestión energética enfocado en mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un establecimiento educacional. El proyecto abordó diversas etapas que incluyen desde la definición del problema hasta la evaluación técnica, económica y ambiental del sistema propuesto.

Primero, se identificaron las problemáticas existentes en la continuidad del suministro eléctrico y las necesidades específicas del establecimiento. A partir de esto, se definieron los objetivos y criterios técnicos que guiarían el desarrollo del sistema, estableciendo un marco teórico sobre tecnologías de generación fotovoltaica, sistemas de almacenamiento de energía y sus integraciones.

Posteriormente, se realizó el dimensionamiento de los componentes principales del sistema, seleccionando paneles solares, el sistema de almacenamiento y un inversor adecuado para cumplir con la demanda de las cargas críticas identificadas. Este dimensionamiento se complementó con simulaciones detalladas mediante el software SAM, el cual permitió analizar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones operativas y escenarios de uso.

Adicionalmente, se diseñó una plataforma de gestión energética utilizando la herramienta Power Bi, integrando los datos obtenidos de las simulaciones del sistema. Esta plataforma ofrece visualizaciones dinámicas e interactivas que facilitan el monitoreo del sistema y el análisis de variables clave como generación, almacenamiento y uso de energía.

Finalmente, se elaboró un análisis económico y ambiental del sistema, considerando los aspectos clave de su implementación y uso a largo plazo. Este análisis permitió evaluar la factibilidad del proyecto desde diferentes perspectivas, proporcionando una visión integral del impacto y las implicaciones del sistema propuesto en un contexto educativo.

8.2. Conclusiones

El desarrollo de esta memoria de título permitió diseñar y evaluar un sistema de gestión energética enfocado en mejorar la continuidad del suministro eléctrico en un establecimiento educacional, asegurando el abastecimiento de las cargas críticas en situaciones de fallas de la red. Este objetivo se logró a través de un diseño integrado que combina paneles fotovoltaicos y un sistema de almacenamiento en baterías, maximizando el aprovechamiento de recursos renovables y garantizando un suministro ininterrumpido.

La configuración seleccionada de 6 paneles fotovoltaicos con baterías fue la más adecuada entre las alternativas evaluadas, destacando por su desempeño técnico. Este diseño permitió cubrir el 100% de la demanda de las cargas críticas, ofrecer estabilidad operativa y actuar como respaldo en escenarios de fallas en la red. Además, se mejoró la eficiencia en la utilización de la energía generada localmente, contribuyendo a la eficiencia energética de la sala de clases analizada.

Sin embargo, el análisis económico del sistema demostró que, bajo las condiciones actuales, la configuración propuesta no es financieramente viable. Este resultado subraya la importancia de explorar alternativas que reduzcan los costos iniciales y operativos, así como opciones de financiamiento externo que hagan posible su implementación. También sería relevante analizar configuraciones más simples, como sistemas sin almacenamiento, para evaluar su viabilidad económica en futuros proyectos.

En conclusión, el sistema propuesto cumple con los objetivos técnicos establecidos, demostrando el potencial de las energías renovables para mejorar la gestión energética en entornos educativos. No obstante, su implementación práctica depende de superar desafíos económicos y explorar soluciones alternativas que viabilicen su aplicación. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos que optimicen la integración de sistemas sostenibles y resilientes en el ámbito educativo.

8.3. Trabajos Futuros

Con base en los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de investigación y desarrollo para futuros trabajos.

1. Implementar un piloto del sistema propuesto para validar los resultados simulados y analizar su desempeño técnico y económico bajo condiciones operativas reales.
2. Investigar configuraciones más simples, como sistemas on grid sin almacenamiento, para determinar su viabilidad técnica y económica, priorizando opciones de menor costo inicial.
3. Evaluar la integración de nuevas cargas críticas al sistema, como sistemas de calefacción o aire acondicionado para mejorar el confort térmico en las salas y abordar deficiencias constructivas, con la finalidad de analizar su impacto en la viabilidad técnica y económica.
4. Profundizar en el análisis del manejo de baterías al final de su vida útil y explorar alternativas sostenibles para los componentes del sistema.
5. Integrar datos en tiempo real en la plataforma de gestión energética para mejorar la toma de decisiones operativas y evaluar su escalabilidad en diferentes contextos.

Referencias

- [1] P. Viveros, F. Wulff, F. Kristjanpoller, C. Nikulin, and T. Grubessich, “*Sizing of a Standalone PV System with Battery Storage for a Dairy: A Case Study from Chile*,” *Complexity*, vol. 2020. 2020. doi: 10.1155/2020/5792782.
- [2] Deshmukh, S. Limkar, R. Nagthane, V. N. Pande and A. V. Tare, "Design of Grid-Connected Solar PV System Integrated with Battery Energy Storage System," *2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, Ravet IN, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ASIANCON58793.2023.10269854.
- [3] H. Wang, Y. Shao and L. Zhou, "Reliability Analysis of Battery Energy Storage Systems: An Overview," *2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, Shanghai, China, 2022, pp. 2036-2040, doi: 10.1109/ICPSAsia55496.2022.9949910.
- [4] A. B. El-Fawair, K. M. Al-Aubidy, and M. A. Al-Khawaldeh, “*Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources and Energy Storage System*,” in *2023 20th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 801–806. doi: 10.1109/SSD58187.2023.10411198.
- [5] P. Moura, A. Correia, J. Delgado, P. Fonseca and A. d. Almeida, "University Campus Microgrid for Supporting Sustainable Energy Systems Operation," *2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICPS48389.2020.9176755.
- [6] R. Fuentes, D. Rojas, M. Rivera, J. Riveros, J. Muñoz and P. Wheeler, "Technologies and MPPT algorithms for solar energy applications," *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Valparaíso, Chile, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/CHILECON54041.2021.9702987.
- [7] I. Izquierdo, M. Pacheco, L. González, y E. Zalamea, "Simulación fotovoltaica considerando parámetros de integración en edificaciones", *Ingenius*, no. 21, pp. 21-31, 2019. DOI: 10.17163/ings.n21.2019.02.
- [8] B. Chreim, M. Esseghir, and L. Merghem-Boulahia, “Recent sizing, placement, and management techniques for individual and shared battery energy storage systems in residential areas: A review,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 250–260, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.11.053.
- [9] H. Z. Odero, C. W. Wekesa, and G. K. Irungu, “Comprehensive Review of Energy Storage Technologies: Types, Applications, Optimal Sizing and Siting in Power Systems,” in *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905263.
- [10] F. M. Guangul and G. T. Chala, "Solar Energy as Renewable Energy Source: SWOT Analysis," *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, Muscat, Oman, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICBDSC.2019.8645580.
- [11] N. A. Baghta, K. P. Aprilianti, D. R. Aryani, F. H. Jufri, and A. R. Utomo, “Optimization of Battery Energy Storage System (BESS) sizing for solar power plant at remote area,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi:

10.1088/1755-1315/599/1/012030.

- [12] N. Graham, E. Malagón, L. Viscidi, and A. Yépez, "State of Charge: Energy Storage in Latin America and the Caribbean". Inter-American Development Bank, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18235/0003246>.
- [13] Ministerio de Energía de Chile, *Proyección de Generación Distribuida: Net Billing y PMGD en Chile*, Santiago, Chile: Ministerio de Energía, 2021. [En línea]. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/e2biz-2021_proyeccion_de_generacion_distribuida.pdf
- [14] Tritec-Intervento, "Tipos de paneles fotovoltaicos," [En línea]. Disponible: <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>.
- [15] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (version 52)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 26, no. 7, pp. 427–436, Jul. 2018, doi: 10.1002/pip.3040.
- [16] Helius, "Sistema on-grid vs off-grid: ¿Cuál es la diferencia?," [En línea]. Disponible: <https://www.helius.cl/paneles-fotovoltaicos/sistema-on-grid-vs-off-grid/>.
- [17] Solcor Chile, "¿Qué es un sistema solar on-grid y off-grid?," [En línea]. Disponible: <https://solcorchile.com/on-grid-off-grid/>.
- [18] Enerlife, "On-Grid - Enerlife," [En línea]. Disponible: <https://enerlife.cl/on-grid/>
- [19] Ilumin Online, "Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red (Autónomo/Off-Grid)," [En línea]. Disponible: <https://ilumin.online/sistema-fotovoltaico-aislado-de-la-red-autonomo-off-grid/>
- [20] Hi Power Blog, "¿Qué es y cómo funciona un sistema híbrido de energía solar?," [En línea]. Disponible: <https://blog.hipowercr.com/que-es-y-como-functiona-un-sistema-hibrido-de-energia-solar>.
- [21] F. Islam, R. Ahshan and A. K. M. M. Haque, "Designing an On-grid Rooftop Photovoltaic System for Powering a University Campus: A Case Study of Begum Rokeya University," 2023 6th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/EICT61409.2023.10427853.
- [22] Ministerio de Energía de Chile, "Exploración Solar," Plataforma de Energía Solar, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- [23] NASA, "POWER Data Access Viewer," NASA Langley Research Center (LaRC), 2023. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/index.html>.
- [24] J. A. Alonso Lorenzo, "Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas," SunFields Europe, Santiago de Compostela, España, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-sistema-fotovoltaico-aislado/>.
- [25] Ministerio de Energía de Chile, "Guía de evaluación para la instalación de paneles fotovoltaicos," 2019. [En línea]. Disponible: <https://energia.gob.cl/documentos/guia-de-evaluacion-para-la-instalacion-de-paneles-fotovoltaicos>.
- [26] G. S. Alzahrani, F. S. Alzahrani, and A. M. Nahhas, "Specific Factors Effecting the PV Solar Cell's Efficiency in Saudi Arabia," *Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 6–11, 2020, doi: 10.12691/rse-8-1-2.
- [27] M. Pavlík and D. Mamchur, "Modelling Photovoltaic Cells under Variable Conditions of

- Temperature and Solar Insolation Intensity*," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402476.
- [28] T. K. Sari, S. Abduh, D. N. N. Putri, C. G. Irianto and M. Widjaya, "*Engineering Study of Rooftop Photovoltaic "Study Case in Elementary School, Jakarta"*," 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Denpasar Bali, Indonesia, 2023, pp. 86-91, doi: 10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257563.
 - [29] D. Sosa-Ibarra and R. García-Alvarado, "Architectural Shape and Photovoltaic Integration in Educational Buildings in Concepcion, Chile," *AUS*, no. 24, pp. 67–75, 2018, doi: 10.4206/aus.2018.n24-10.
 - [30] Coordinador Eléctrico Nacional, "Reporte Energético agosto 2024," Coordinador Eléctrico Nacional, Chile, Reporte, Ago. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.coordinador.cl>
 - [31] A. K. Chen, Y. N. Velaga and P. K. P. Sen, "Future Electric Power Grid and Battery Storage," *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662126.
 - [32] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami and T. S. Ustun, "Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4555-4585, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888497.
 - [33] Z. Hameed, S. Hashemi and C. Træholt, "Site Selection Criteria for Battery Energy Storage in Power Systems," *2020 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, London, ON, Canada, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/CCECE47787.2020.9255678.
 - [34] K. Mongird, V. Fotedar, V. Viswanathan, V. Koritarov, P. Balducci, B. Hadjerioua, and J. Alam, *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report*, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), U.S. Department of Energy, July 2019.
 - [35] M. Z. A. Bhatti, A. Siddique, W. Aslam, and S. Atiq, "Design and Analysis of a Hybrid Stand-Alone Microgrid," *Energies*, vol. 17, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17010200.
 - [36] SFE-Solar, "Tipos de baterías de litio para placas solares," [En línea]. Disponible: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-baterias-de-litio-para-placas-solares/>.
 - [37] N. A. Baghta, K. P. Aprilianti, D. R. Aryani, F. H. Jufri, and A. R. Utomo, "Optimization of Battery Energy Storage System (BESS) sizing for solar power plant at remote area," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 599, 2020, Art. no. 012030. doi: [10.1088/1755-1315/599/1/012030](https://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012030).
 - [38] A. B. El-Fawair, K. M. Al-Aubidy, and M. A. Al-Khawaldeh, "Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources and Energy Storage System," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 1558-1566, Apr. 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i2.pp1558-1566.
 - [39] A. Martínez Arias, Ph.D., "Classrooms Retrofit: Evaluating the potential of transitioning existing schools towards healthy and high-performance environments as urgent response to a changing climate," Proyecto FONDECYT N° 11240683, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Chile.
 - [40] A. Martínez, V. González, I. Soto, y M. I. Rivera, "Retrofitting classrooms: Diagnostic and improvement for lighting and energy efficiency in Chilean public schools," *Proc. 37th PLEA*

- Conf., (Re)thinking Resilience*, Wroclaw, Poland, 26-28 June, 2024, pp. 1134-1139. doi: [10.37190/PLEA_2024](https://doi.org/10.37190/PLEA_2024).
- [41] A. Martínez, I. Soto, P. Bustos, y M. I. Rivera, "Diagnostics of lighting conditions in existing public schools in Central-Southern Chile: Measurements and predictions for retrofit," presentado en *XXVII SIGraDi Conf. Accelerated Landscapes*, Punta del Este, Uruguay, 29 Nov.-01 Dic., 2023, Centro Universitario Regional Este (CURE), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU), Universidad de la República (UDELAR). doi: 10.5151/sigradi2023-282. Disponible en: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/diagnostics-of-existing-lighting-conditions-in-existing-public-schools-in-central-southern-chile-measurements-and-predictions-for-retrofit-39419>.
 - [42] A. Martínez, M. I. Rivera, y P. Arriagada, "Informing Early-Stage Building Energy Retrofit for Prototypical Public Schools in Chile," presentado en la *Conferencia de la Architectural Research Centers Consortium (ARCC) y European Association for Architectural Education (EAAE) 2022, Resilient City: Physical, Social, and Economic Perspectives*, Florida International University, Miami, USA, 2-5 marzo, 2022. Disponible en: <https://www.arcc-arch.org/2022-authors-of-papers-posters/>.
 - [43] Ministerio de Educación de Chile, "Ficha Mineduc," [En línea]. Disponible: <https://mi.mineduc.cl/mime-web/mvc/mime/ficha>
 - [44] R. Vallejos Pérez, "Proyecto Escuela Colonia Árabe", mensaje de correo electrónico, 19 de agosto de 2024.
 - [45] Municipalidad de Los Ángeles, "*Plan Regulador Comunal de Los Ángeles*," 2015.
 - [46] National Fire Protection Association, *NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace*, 2015. [En línea]. Disponible: <https://safety.engr.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/707/2017/03/36.-2015-NFPA-70E-Copy.pdf>.
 - [47] "Paneles solares," *Enertik*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://enertik.com/cl/categoria/fotovoltaica/paneles-solares/>.
 - [48] J. Ghosh y P. Das, "*Automatic Solar Tracking System*," RCC Institute of Information Technology, Kolkata, India, May 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.rcciit.org>
 - [49] A. Awasthi, A.K. Shukla, M.M. S.R., et al., "Review on sun tracking technology in solar PV system," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 392-405, 2020, doi: [10.1016/j.egyr.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004).
 - [50] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "System Advisor Model (SAM), [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/about-sam.html>.
 - [51] República de Chile, "Ley 20.571: Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales", Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Santiago, Chile, 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1038211>
 - [52] Plataforma de Gestión Energética, Power BI Service. [En línea]. Disponible: <https://app.powerbi.com/groups/me/reports/465c7c20-37a1-4889-80b1-b5e9aa1f5ad0/ef9fa4ad6d0009d0d750?experience=power-bi>
 - [53] Compañía General de Electricidad (CGE), "Tarifas para Conexión de Equipamiento de Generación Residencial," noviembre 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2024/11/Tarifas-para-Conexion-de-Equipamiento-de-Generacion-Residencial-CGE-Noviembre-2024.pdf>

- [54] Ministerio de Energía, "Ficha técnica IDP FV 2020," Gobierno de Chile, 2020. [En línea]. Disponible: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/factsheet_idp_fv_2020.pdf
- [55] Comisión Nacional de Energía, "Resolución Exenta N°201: Aprueba informe técnico de costos de tecnologías de generación, 2023," Ministerio de Energía, Chile, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2023/05/Rex-N201-aprueba-IT-costos-tecnologia-gx-2023-002.pdf>
- [56] A. Torres, M. Albornoz, A. Cuevas, J. Rohten, V. Esparza, N. Risso, and J. Muñoz, "Photovoltaic Technical and Economical Study for Medium and Large Agroindustry," in *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, DOI: 10.1109/ICAACCA51523.2021.9465193, 2021.
- [57] Ministerio de Energía, "Determinación de precios estabilizados - Informe Técnico Definitivo", Comisión Nacional de Energía, Noviembre 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/11/ITD-Precio-Estabilizado-Nov2024.pdf>
- [58] Banco Central de Chile, "Página oficial del Banco Central de Chile," [En línea]. Disponible en: <https://www.bcentral.cl/web/banco-central>
- [59] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), "Boletín IPC - Octubre 2024," [En línea]. Disponible en: https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/índice-de-precios-al-consumidor/boletines/español/2024/boletin-ipc-octubre-2024.pdf?sfvrsn=24c6c942_8.
- [60] Ministerio de Energía, Chile. "Presentación: Tasa de Descuento y AEIR," [En línea]. Disponible: https://energia.gob.cl/sites/default/files/presentacion_tasa_descuento_y_aeir.pdf
- [61] Ministerio del Medio Ambiente, "HuellaChile: Factores de emisión nivel básico," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/06/HuellaChile-Factores-de-emision-nivel-basico.pdf>
- [62] U.S. Environmental Protection Agency, "Greenhouse Gas Equivalencies Calculator," [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- [63] Cintac, "La industria del reciclaje de módulos solares y perspectivas en Chile en el contexto de la nueva ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP)," [En línea]. Disponible: <https://www.cintac.cl/blogs/la-industria-del-reciclaje-de-modulos-solares-y-perspectivas-en-chile-en-el-contexto-de-la-nueva-ley-de-responsabilidad-extendida-del-productor-rep/>
- [64] V. López Hernández, I. Hilbert, L. Gascón Castillero, A. Manhart, D. García, B. Nkongdem, R. Dumitrescu, C. G. Sucre, and C. Ferreira Herrera, "Reciclaje y reúso de baterías de litio en América Latina y el Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales," Banco Interamericano de Desarrollo, División de Energía, Nota Técnica No. IDB-TN-02893, Feb. 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.iadb.org>
- [65] SolarCTRL, "Dispose & Recycle Solar Inverters," [En línea]. Disponible: <https://www.solarctrl.com/blog/dispose-recycle-inverter/#:~:text=Recycling%20solar%20inverters%20also%20presents,red%20the%20overall%20production%20costs>
- [66] International Energy Agency, *Solar PV – Tracking Clean Energy Progress*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- [67] Ministerio de Energía de Chile, *Energía 2050: Política Energética de Chile*, Santiago, Chile, 2015. Disponible en: <https://energia.gob.cl>.

- [68] United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [En línea]. Disponible: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- [69] M. Pavlík, M. Kolcun, S. Bucko and V. Kohan, "*Analysis and Evaluation of Photovoltaic Cell Defects and Their Impact on Electricity Generation*," 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814105.

Anexo A. Sistemas Fotovoltaicos y de Almacenamiento

A.1 Principio de Funcionamiento de las Celdas Solares

Las celdas solares o fotovoltaicas funcionan bajo el principio del efecto fotoeléctrico, un proceso en el que la energía de los fotones solares se convierte directamente en electricidad. Este fenómeno ocurre cuando los fotones inciden en un material semiconductor, como el silicio, excitando los electrones y creando un flujo de corriente.

El modelo más común para representar el comportamiento eléctrico de una celda solar es el modelo circuital de un diodo, que incluye una fuente de corriente, un diodo, una resistencia en serie y otra en paralelo. Este modelo permite simular la curva característica de corriente-voltaje (I-V) de la celda solar, la cual es fundamental para entender el rendimiento que presenta bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

Las celdas solares generan una corriente que depende directamente de la cantidad de luz que incide sobre ellas. La relación entre la corriente generada y el voltaje aplicado se describe matemáticamente mediante la ecuación (A.1), ajustada por los parámetros específicos de la celda. Gráficamente, esta relación se representa en las curvas I-V, que muestran cómo varía la corriente con el voltaje a diferentes niveles de irradiancia [6, 12].

$$I = I_{PV} - I_{sat} \left(e^{\frac{V + I_{PV}R_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{A.1})$$

donde,

- I : Corriente generada por la celda [A],
- V : Voltaje de la celda [V],
- R_p : Resistencia en paralelo del circuito [Ω],
- R_s : Resistencia en serie del circuito equivalente [Ω],
- I_{sat} : Corriente de saturación que circula por el diodo [A],
- I_{PV} : Corriente proveniente del efecto fotoeléctrico [A], y
- V_t : Voltaje térmico del diodo D [V].

En las figuras A.1 y A.2 se ilustran tanto el modelo circuital de una celda solar como las curvas I-V típicas que ilustran el comportamiento de la celda bajo diferentes condiciones de operación.

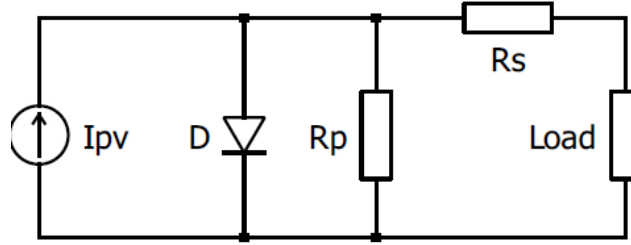


Fig. A.1 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica conectado a carga genérica [6]

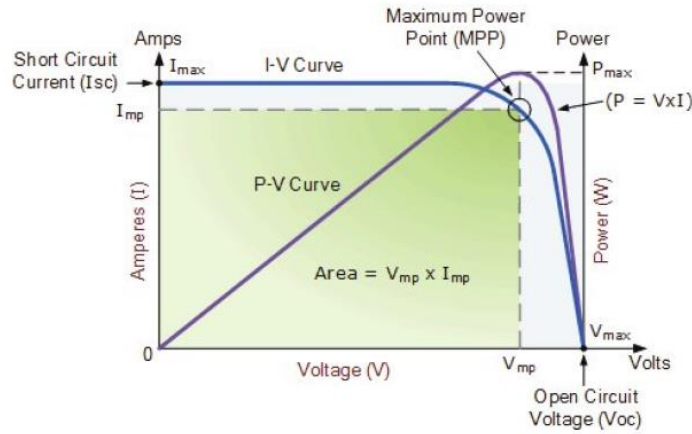


Fig. A.2 Curva característica I-V de celda solar [27]

A.2 Dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos

A.2.1 Cálculo del Número de Paneles Fotovoltaicos

Se deben considerar ajustes por factores de pérdida, este factor de rendimiento (PR) oscila entre valores de 0,75 y 0,9 [6], para ajustar pérdidas que incluyen pérdidas térmicas, ya que la eficiencia de los paneles disminuye con la temperatura, pérdidas por cableado, y pérdidas por sombreado parcial.

También es importante agregar un factor de sobredimensionamiento a la energía total requerida por las cargas, como método de protección para asegurar la totalidad del suministro entregado por el sistema fotovoltaico hacia la demanda.

Como ejemplo de cálculo, para un consumo diario de 9 [kWh], una irradiancia mínima de 0,9 [kWh/m²/día], paneles de potencia nominal de 300 [W], con una eficiencia de 18% y 4 HPS.

$$N_T = \frac{9 \text{ kWh}}{(0,3 \text{ kW} * 4 \text{ HSP} * 0,8)} = 9,375 \text{ paneles}$$

Redondeando, se necesitarían aproximadamente 10 paneles para suplir la demanda energética.

A.3 Factores que afectan la eficiencia de los módulos fotovoltaicos

A.3.1 Intensidad de la Radiación Solar

La radiación solar es uno de los factores más importantes que determinan la eficiencia de los paneles solares, ya que define directamente la cantidad de energía eléctrica que pueden generar. Esta radiación varía según la latitud, la estación del año, la hora del día y las condiciones meteorológicas, como nubosidad y contaminación atmosférica [26].

En la figura A.3 se grafica como afecta la radiación solar a la curva I-V y a la generación de corriente en las celdas solares, disminuyendo la eficiencia total del sistema.

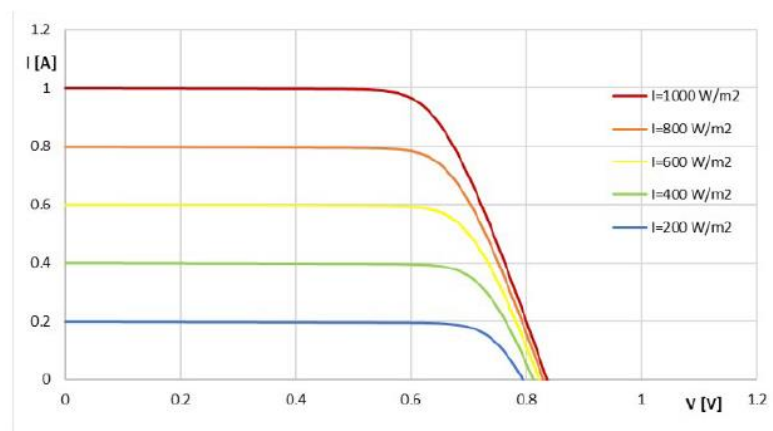


Fig. A.3 Curva I-V característica para diferentes valores de radiación solar [27]

Existen diferentes tipos de radiación solar que afectan la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, los cuáles son:

A. Radiación Directa (*Direct Normal Irradiance, DNI*)

Es la radiación solar que llega directamente desde el sol sin haber sido dispersada por la atmósfera. Es la más intensa y la que proporciona la mayor cantidad de energía a los paneles solares, es especialmente relevante en días claros y soleados, y su captación se maximiza con sistemas de seguimiento solar que mantienen los paneles perpendiculares al sol.

B. Radiación Difusa (*Direct Horizontal Irradiance, DHI*)

Es la radiación solar que ha sido dispersada por moléculas, partículas en la atmósfera y nubes, llegando a la superficie terrestre desde todas las direcciones del cielo. Esta radiación es predominante en días nublados y, por ende, no depende de la orientación del panel solar. Los paneles fotovoltaicos pueden aprovechar esta radiación para generar energía eléctrica, aunque con menor eficiencia que la

radiación directa.

C. *Radiación Reflejada o Albedo*

Es la radiación que se refleja en el suelo o en otras superficies cercanas antes de llegar a los paneles solares. Su contribución depende del tipo de superficie y su reflectividad. Las superficies blancas o cubiertas de nieve pueden reflejar una cantidad significativa de radiación, aumentando la energía captada por los paneles.

D. *Radiación Global (Global Horizontal Irradiance, GHI)*

Es la suma de la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal, es una medida clave en la evaluación del rendimiento de los paneles solares, ya que proporciona una visión completa de la energía solar disponible en un lugar determinado.

Estos tipos de radiación interactúan de manera compleja con los paneles solares, y su captación eficiente depende de la orientación, inclinación y tecnología del sistema fotovoltaico instalado, es por ello, que, para maximizar la eficiencia de los paneles solares, es crucial posicionarlos en ángulos óptimos y asegurarse de que estén orientados hacia el norte en el hemisferio sur. Además, el uso de sistemas de seguimiento solar puede aumentar la captación de radiación directa, ajustando la orientación de los paneles a lo largo del día para mantener un ángulo óptimo respecto al sol.

A.3.2 *Temperatura de los Paneles*

El aumento de la temperatura en los paneles solares afecta directamente su eficiencia, disminuyendo la tensión de circuito abierto y, en consecuencia, la capacidad de conversión de energía [27]. Por cada grado Celsius por encima de la temperatura nominal estándar de 25°C, los paneles pueden perder hasta un 0,5% de eficiencia [27].

Estrategias específicas para mitigar este efecto incluyen la instalación de los paneles con suficiente separación en el techo para permitir la ventilación y disipación del calor, así como la elección de paneles con coeficientes de temperatura más bajos, diseñados específicamente para climas cálidos.

A continuación, se presentan las figuras A.4 y A.5 que ilustran gráficamente el impacto de la temperatura en la eficiencia de los paneles, las cuáles permiten visualizar de manera clara la relación entre el aumento de temperatura y la disminución en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

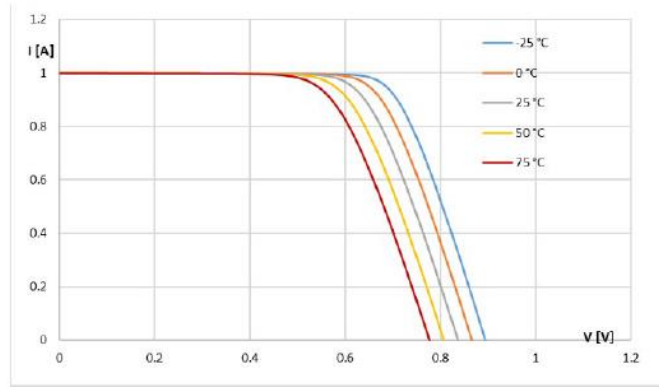


Fig. A.4 Curva I-V característica a diferentes temperaturas de operación [27]

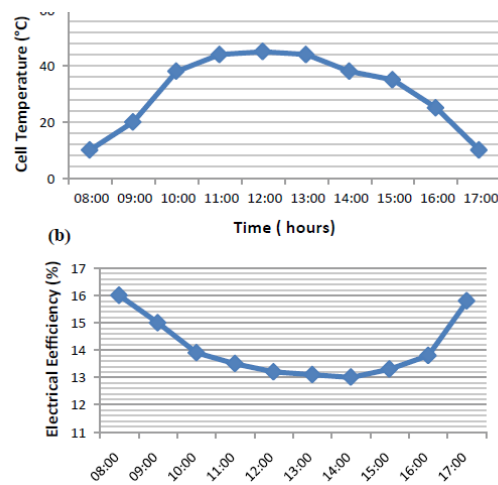


Fig. A.5 Eficiencia de una celda solar en verano a diferentes temperaturas de operación [26]

A.3.3 Suciedad y Sombra (Soiling)

La acumulación de polvo, arena, hojas y otros residuos en la superficie de los paneles reduce la cantidad de luz solar que llega a las celdas fotovoltaicas, disminuyendo significativamente su rendimiento [26]. Además, las sombras, incluso parciales, pueden causar puntos calientes que dañan permanentemente el módulo solar.

A.3.4 Degradación de los Módulos

Con el tiempo, los paneles solares sufren una degradación gradual debido a factores como la radiación ultravioleta, los cambios extremos de temperatura y el estrés mecánico por el viento y granizo [27]. Se estima que la tasa de degradación de los módulos silicio cristalino varía entre un 0,5% y 1% anual, con una pérdida acumulada de hasta 20% de su eficiencia después de 25 años de operación [27].

A.3.5 Resistencias Parásitas

Las resistencias parásitas, tanto en serie (R_s) como en paralelo (R_{sh}), afectan la eficiencia de los paneles solares al generar pérdidas de potencia. La resistencia en serie está asociada con el material semiconductor y los contactos eléctricos, mientras que la resistencia en paralelo está vinculada a fugas de corriente dentro de las celdas solares [27].

Una alta resistencia en serie reduce la salida de corriente y, por ende, la potencia generada, mientras que una baja resistencia en paralelo aumenta las pérdidas eléctricas, disminuyendo la eficiencia general del panel solar [69].

La representación gráfica de este fenómeno se presenta en la figura A.6.

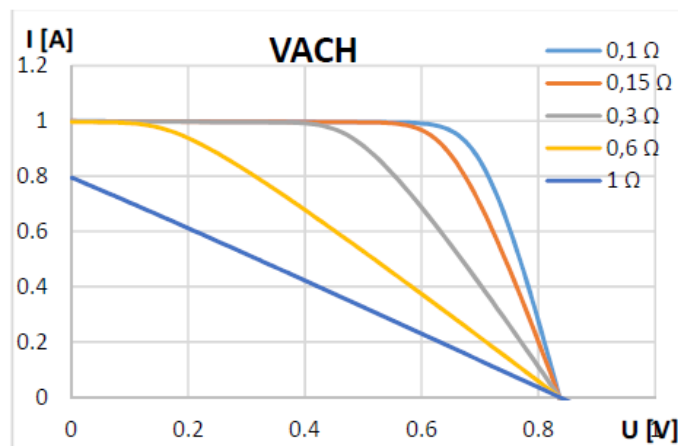


Fig. A.6 Característica I-V de la celda solar - Cambio en la resistencia serie R_s [69]

A.3.6 Factor de llenado (Fill Factor)

El factor de llenado (FF) es un indicador clave de la calidad de las celdas solares, definido como la relación entre la potencia máxima real que puede producir la celda y el producto de su tensión de circuito abierto (U_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}) [27]. Un mayor FF indica celdas de mejor calidad, con menores pérdidas internas y mayor capacidad de conversión de luz solar en electricidad.

La mejora del FF depende de la calidad de los materiales, las técnicas de fabricación y el recubrimiento de las celdas, lo que contribuye a un rendimiento más eficiente y estable del panel solar [69]. La ecuación (A.2) asociada al factor de llenado se presenta a continuación.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} * U_{OC}} \quad (A.2)$$

donde,

FF : Factor de llenado (Fill Factor),

P_{MPP} : Potencia máxima de salida del panel [kW],

I_{SC} : Corriente de cortocircuito del panel [A], y

U_{OC} : Voltaje de circuito abierto del panel [V].

Abordar todos estos factores que afectan a la eficiencia de los paneles fotovoltaicos mediante la correcta instalación, mantenimiento y selección de materiales puede maximizar la generación de energía eléctrica y prolongar la vida útil del sistema, asegurando un rendimiento eficiente y una mayor sostenibilidad en la producción de energía solar

A.4 Algoritmos MPPT

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es fundamental en los sistemas fotovoltaicos, ya que permite maximizar la eficiencia en la conversión de la energía solar en la electricidad. Los paneles solares poseen una curva característica de corriente-voltaje que varía según diversos factores, como la irradiancia solar, la temperatura y características de la propia celda solar. El punto de máxima potencia (MPP) es el punto en esta curva I-V donde se genera la mayor cantidad de energía eléctrica, por tanto, mantener los paneles operando en este punto MPP es fundamental para maximizar la generación de energía y minimizar las pérdidas en los paneles [6, 12].

Los algoritmos MPPT ajustan dinámicamente el punto de operación de los paneles solares para asegurar que el sistema fotovoltaico opere en el MPP, independientemente de las condiciones ambientales variables en dónde estén funcionando los paneles.

Existen diversas estrategias y algoritmos para el seguimiento del MPP, que varían en complejidad y eficiencia. Para proporcionar una visión general de los distintos métodos existentes en la actualidad de algoritmos MPPT, se presenta en Tabla A.1 un resumen de los algoritmos más comunes de seguimiento del punto de máxima potencia, añadiendo también las desventajas y ventajas de estos métodos.

Tabla A.1 Algoritmos de MPPT [6]

Grupo de Algoritmos	Ejemplos	Ventajas	Desventajas
Clásicos	Perturbar y Observar (P&O), Conductancia Incremental, Hill Climbing (HC)	Simplicidad, bajo costo computacional	Oscilaciones del punto MPP en condiciones cambiantes, menos precisos
Inteligentes	Lógica Difusa (FLC), Red Neuronal Artificial (ANN), Machine Learning (ML)	Alta adaptabilidad, precisión en condiciones variables	Requieren mayor procesamiento, complejidad de implementación
Optimización	Particle Swarm (PSO), Algoritmos Genéticos (GA), Colonia de Hormigas (ACO)	Eficaces en condiciones de sombreado parcial, alcanzan el punto MPP global	Mayor necesidad de sensores y recursos computacionales
Híbridos	Fuzzy Particle Swarm (FPSO), Adaptative Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS), PSO-PO	Balance de eficiencia y robustez, minimizan desventajas	Alta complejidad, mayor costo y diseño detallado requerido

Actualmente, la mayoría de los inversores y reguladores de carga modernos integran algoritmos MPPT, lo que simplifica la implementación y garantiza que los sistemas fotovoltaicos operen continuamente en su punto óptimo MPP. Esto no solo maximiza la eficiencia energética, sino que también mejora la viabilidad económica del sistema al reducir la necesidad de intervenciones manuales y optimizar la captación de energía bajo distintas condiciones ambientales [6].

A.5 Sistemas de Almacenamiento

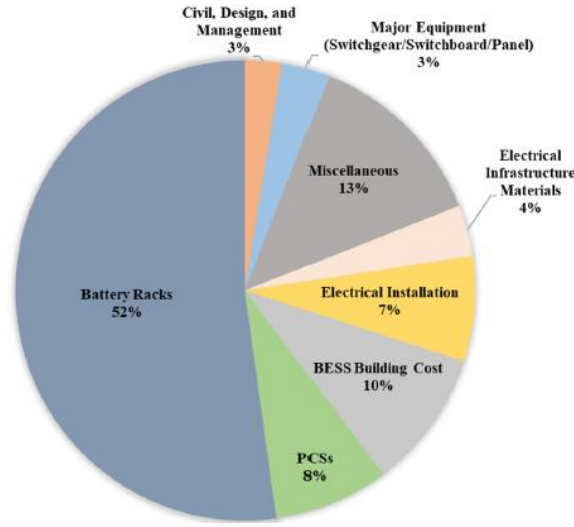


Fig. A.7 Desglose de los costos de instalación de BESS [33]

A.6 Cálculo de la cantidad de paneles necesarios

Para el escenario promedio se reemplazan los valores requeridos en la fórmula (2.2):

$$N_T = \frac{5,2 \text{ kWh}}{0,445 \text{ kW} * 4,9 \text{ h} * 0,8} = 2,98 \approx 3 \text{ paneles}$$

Por lo tanto, para el escenario promedio será necesario disponer de 3 paneles de 445 [Wp] para poder cubrir las necesidades energéticas de las cargas críticas de la sala piloto de la escuela.

Para el peor escenario posible de mayor demanda y menor radiación, se reemplazan los valores requeridos en la fórmula (2.2):

$$N_T = \frac{5,8 \text{ kWh}}{0,445 \text{ kW} * 2,73 \text{ h} * 0,8} = 5,97 \approx 6 \text{ paneles}$$

Por lo tanto, para el peor escenario posible será necesario disponer de 6 paneles de 445 [Wp] para poder cubrir las necesidades energéticas de las cargas críticas de la sala piloto de la escuela.

A.7 Verificación del Área Disponible del Techo

Después de calcular el número de paneles necesarios, es importante verificar si el área disponible en el techo es suficiente para instalar los paneles requeridos. El área que ocupa cada panel es un factor determinante para definir el número máximo de paneles que se pueden instalar.

La cantidad de área necesaria para instalar los paneles se calcula utilizando la fórmula (A.3)

$$\text{Área total necesaria} = N_T * \text{Área del Panel} \quad (\text{A.3})$$

donde,

N_T : Número de paneles calculado para cada escenario, y

Área del panel : Área ocupada por un solo panel, en metros cuadrados [m^2].

Debido a que no toda el área del techo es utilizable para la instalación de los paneles, es necesario considerar márgenes de seguridad, sombras y obstáculos como conductos de ventilación. Para tener en cuenta estas restricciones, se utiliza el factor de corrección por perímetro de la ecuación (2.5) y el factor de corrección por sombras, que para este caso se considerará un valor conservador de 0,8 [25].

Para calcular el factor de corrección por perímetro (F_{libre}), utilizamos el valor del área del techo de la sala de clases piloto evaluada, el cual tiene un área total de 83,7 [m^2], debido a que el techo de la escuela está dividido a la mitad, solamente se toma en consideración la mitad del techo orientada hacia el norte, por lo tanto, el área total utilizable es de 41,85 [m^2], con un largo de 9 [m] y ancho de 4,65 [m], por ende, reemplazando en la ecuación (2.5) se obtiene lo siguiente:

$$F_{libre} = \frac{(9 - 2) * (4,65 - 2)}{9 * 4,65} = 0,443$$

Por lo tanto, el factor de corrección por perímetro para este caso es de 0,443.

Por ende, la fórmula para calcular el área disponible ajustada viene dada por la ecuación (A.4):

$$\text{Área disponible} = \text{Área techo} * F_{libre} * F_{sombras} \quad (\text{A.4})$$

Reemplazando en la ecuación (A.4) los datos obtenidos anteriormente, obtenemos el valor del área disponible en el techo de la escuela para instalar los paneles fotovoltaicos.

$$\text{Área disponible} = 41,85 \, m^2 * 0,443 * 0,8 = 14,83 \, [m^2]$$

Una vez calculada el área necesaria y el área disponible en el techo, se procede a comparar ambas. La fórmula final para verificar si es posible instalar la cantidad de paneles calculados se presenta en la ecuación (A.5):

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{\text{Área disponible}}{\text{Área del panel}} \quad (\text{A.5})$$

donde,

$N_{m\acute{a}x}$: Número máximo de paneles que se pueden instalar, y
 $\acute{A}rea\ disponible$: rea efectiva en el techo disponible [m^2].

El rea del panel Trina Solar de 445 [Wp] escogido para este análisis es de 1,998 [m^2], por lo tanto, con el valor del área disponible en el techo de la escuela calculamos la cantidad máxima de paneles que se podrían instalar.

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{14,83[m^2]}{1,998[m^2]} = 7,42 \approx 7\ paneles$$

Por ende, la cantidad máxima de paneles que se pueden instalar en el techo de la sala piloto es de 7 paneles, lo que cumple con la cantidad necesaria de paneles necesarios para cubrir la demanda energética de las cargas críticas para ambos escenarios planteados.

A.8 Cálculo de Capacidad del Sistema de Almacenamiento

La fórmula (2.3) es utilizada para calcular la capacidad de almacenamiento requerida.

$$C_{bat} = \frac{P_t * t}{DoD * \eta_{bat}} \quad (2.3)$$

donde,

C_{bat} : Capacidad de las baterías [kWh],
 t : Tiempo de autonomía esperado [h],
 P_t : Potencia total requerida por las cargas [kW] (1,2 [kW]),
 DoD : Profundidad de descargas de las baterías (80%), y
 η_{bat} : Eficiencia de las baterías (90%).

En este cálculo, se utilizará un valor del 80% para la profundidad de descarga (DoD) y una eficiencia del 90% para las baterías, basándose en las características típicas de las baterías de litio. Como se menciona en el capítulo 3 de este presente informe, estos valores son estándar para este tipo de tecnología, permitiendo una descarga profunda sin comprometer significativamente la vida útil de la batería y manteniendo una alta eficiencia en los ciclos de carga y descarga.

Para tener una autonomía de 6 [h], se tiene:

$$C_{bat,6h} = \frac{1,1\ kW * 6\ h}{0,8 * 0,9} = 9,17[kWh]$$

Este cálculo muestra que, para cubrir los requerimientos de respaldo de las cargas críticas de la sala piloto, se necesitarían baterías con una capacidad de 9,17 [kWh] para obtener una autonomía

de 6 [h]. Estos valores servirán de base para la selección de baterías en la siguiente sección.

A.9 Consideraciones para la Implementación de BESS en Sistemas PV

Para una integración exitosa de BESS con sistemas fotovoltaicos, se deben considerar diversos aspectos técnicos y operativos:

A. Integración con Sistemas de Gestión de Energía (EMS)

Los EMS son críticos para la operación eficiente de los BESS, ya que permiten una gestión automatizada de los ciclos de carga y descarga, optimizando el uso de la energía solar y asegurando que las baterías operen dentro de los límites seguros. Además, los EMS pueden integrarse con otros recursos energéticos y coordinar la interacción con la red eléctrica, mejorando la flexibilidad y eficiencia del sistema [32].

B. Optimización de la Carga y Descarga para Maximizar la Vida útil de las Baterías

Es fundamental configurar los BESS para operar dentro de rangos óptimos de carga y descarga, conocidos como SoC y DoD, con el fin de maximizar la vida útil de las baterías y mejorar la eficiencia operativa. Estrategias como la limitación de la profundidad de descarga y la optimización de los ciclos de carga pueden prevenir la degradación acelerada de las baterías [35], asegurando un rendimiento estable a lo largo del tiempo.

C. Consideraciones de Seguridad, Confiabilidad y Normativas Ambientales

Al implementar BESS en sistemas fotovoltaicos, es fundamental considerar tanto la seguridad del sistema como el cumplimiento de normativas de calidad, seguridad y sostenibilidad. La selección de tecnologías de baterías debe enfocarse en opciones con alta confiabilidad y seguridad operativa, capaces de resistir condiciones extremas y equipadas con sistemas de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, para minimizar riesgos operacionales y asegurar un funcionamiento seguro y eficiente en diversas condiciones [34]. Además, es esencial evaluar el impacto ambiental de las baterías, priorizando aquellas con menor huella de carbono y que ofrezcan mejores prácticas de reciclaje al final de su vida útil [35]. Esto no solo garantiza la conformidad con las normativas vigentes, sino que también contribuye a la sostenibilidad general del proyecto, alineándose con las metas ambientales y operacionales del sistema de gestión de energía.

Anexo B. Gráficos Configuración 4 Paneles

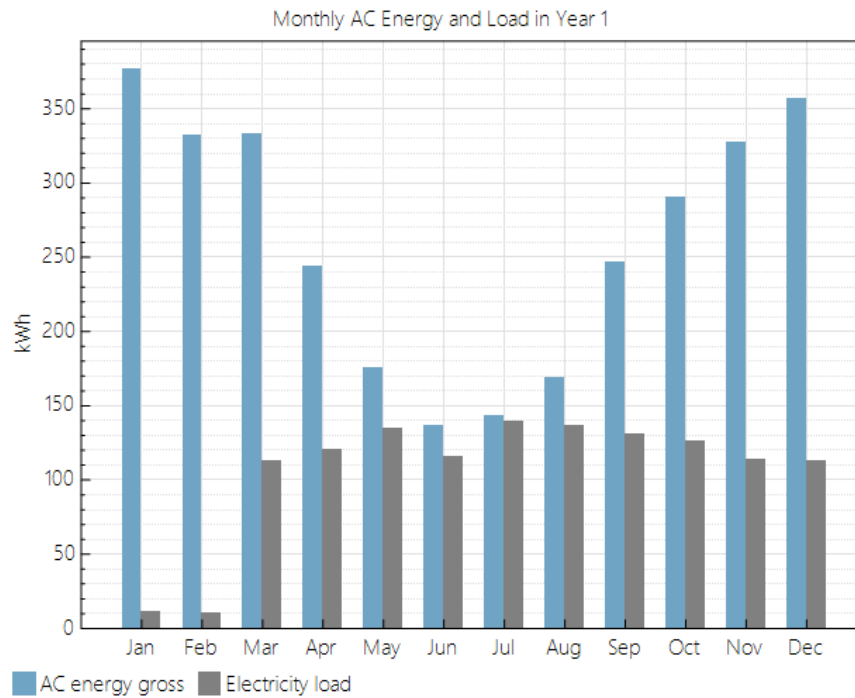


Fig. B.1 Generación mensual de energía vs demanda [kWh] – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

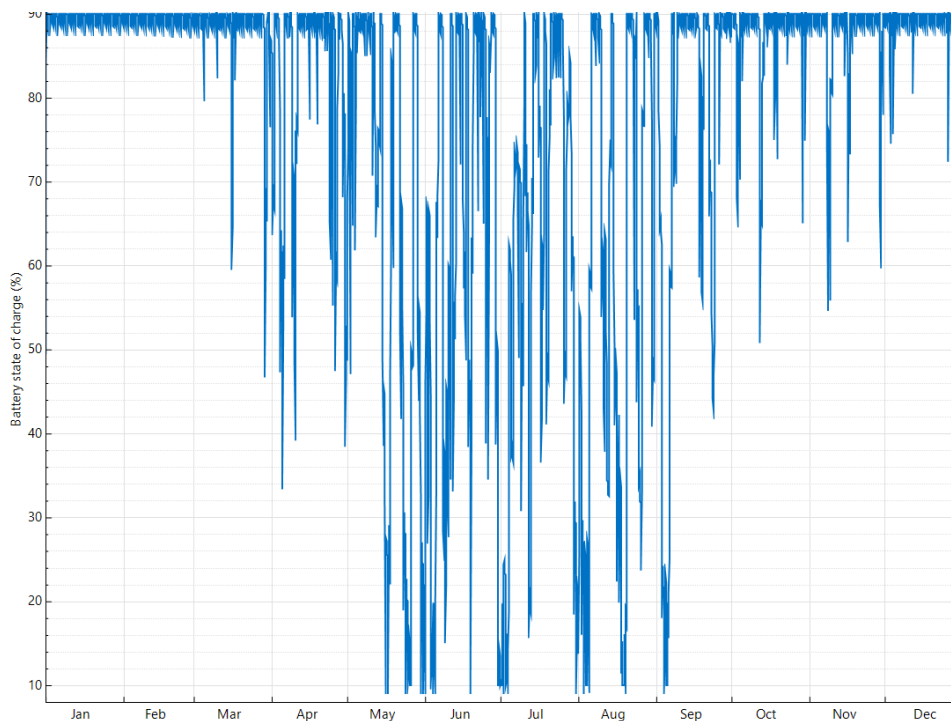


Fig. B.2 Estado de carga de las baterías (SOC %) – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

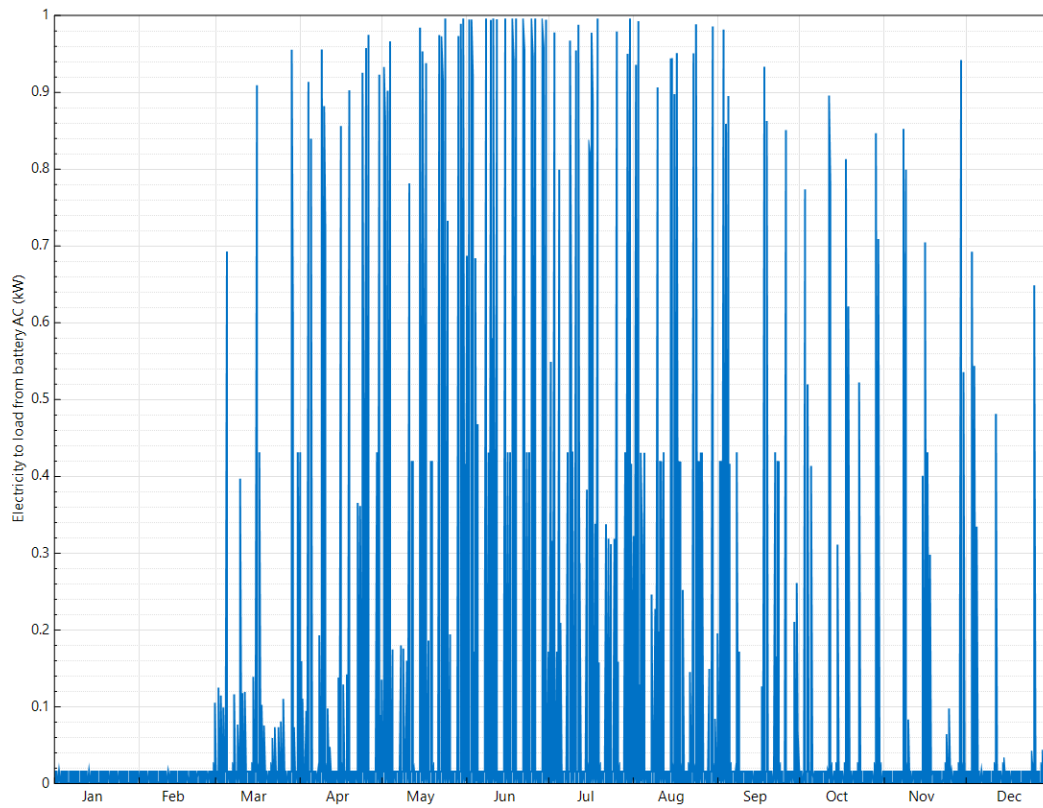


Fig. B.3 Flujo energético desde las baterías hacia las cargas críticas – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

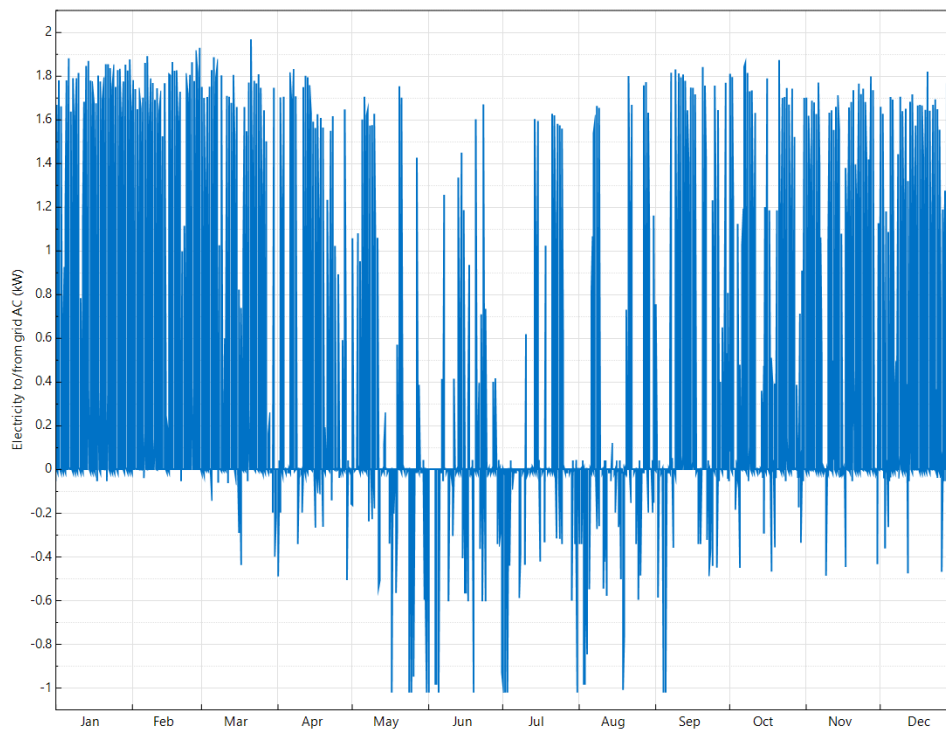


Fig. B.4 Flujo energético entre el sistema y la red eléctrica – Caso 3. Elaboración propia utilizando el software SAM [50]

Anexo C. Análisis Económico y Ambiental

Año	Inversión Inicial	Ingresos Por Excedentes	Ahorros en Boletas	Mantenimiento	Reemplazo de componentes	Flujo Neto Anual	Flujo Acumulado
0	\$ 4.705.800	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -4.705.800	\$ -4.705.800
1	\$ -	\$ 79.908	\$ 241.987	\$ 47.058	\$ -	\$ 274.837	\$ -4.430.963
2	\$ -	\$ 83.258	\$ 248.036	\$ 49.223	\$ -	\$ 282.072	\$ -4.148.891
3	\$ -	\$ 86.371	\$ 254.237	\$ 51.487	\$ -	\$ 289.121	\$ -3.859.770
4	\$ -	\$ 89.634	\$ 260.594	\$ 53.855	\$ -	\$ 296.372	\$ -3.563.398
5	\$ -	\$ 93.110	\$ 267.109	\$ 56.333	\$ -	\$ 303.886	\$ -3.259.512
6	\$ -	\$ 96.559	\$ 273.786	\$ 58.924	\$ -	\$ 311.422	\$ -2.948.090
7	\$ -	\$ 100.171	\$ 280.631	\$ 61.634	\$ -	\$ 319.168	\$ -2.628.922
8	\$ -	\$ 103.984	\$ 287.647	\$ 64.470	\$ -	\$ 327.161	\$ -2.301.761
9	\$ -	\$ 107.942	\$ 294.837	\$ 67.435	\$ -	\$ 335.344	\$ -1.966.417
10	\$ -	\$ 112.022	\$ 302.208	\$ 70.537	\$ 3.047.046	\$ -2.703.353	\$ -4.669.770
11	\$ -	\$ 116.199	\$ 309.764	\$ 73.782	\$ -	\$ 352.181	\$ -4.317.588
12	\$ -	\$ 120.530	\$ 317.508	\$ 77.176	\$ -	\$ 360.862	\$ -3.956.727
13	\$ -	\$ 125.072	\$ 325.445	\$ 80.726	\$ -	\$ 369.792	\$ -3.586.935
14	\$ -	\$ 129.727	\$ 333.581	\$ 84.439	\$ -	\$ 378.869	\$ -3.208.066
15	\$ -	\$ 134.521	\$ 341.921	\$ 88.324	\$ -	\$ 388.118	\$ -2.819.948
16	\$ -	\$ 139.432	\$ 350.469	\$ 92.387	\$ -	\$ 397.515	\$ -2.422.433
17	\$ -	\$ 144.583	\$ 359.231	\$ 96.636	\$ -	\$ 407.178	\$ -2.015.256
18	\$ -	\$ 149.824	\$ 368.211	\$ 101.082	\$ -	\$ 416.954	\$ -1.598.302
19	\$ -	\$ 155.197	\$ 377.417	\$ 105.731	\$ -	\$ 426.883	\$ -1.171.419
20	\$ -	\$ 160.843	\$ 386.852	\$ 110.595	\$ -	\$ 437.100	\$ -734.319
21	\$ -	\$ 166.799	\$ 396.523	\$ 115.682	\$ -	\$ 447.640	\$ -286.679
22	\$ -	\$ 172.823	\$ 406.437	\$ 121.004	\$ -	\$ 458.256	\$ 171.577
23	\$ -	\$ 179.094	\$ 416.598	\$ 126.570	\$ -	\$ 469.122	\$ 640.698
24	\$ -	\$ 185.506	\$ 427.013	\$ 132.392	\$ -	\$ 480.127	\$ 1.120.825
25	\$ -	\$ 192.316	\$ 437.688	\$ 138.482	\$ -	\$ 491.522	\$ 1.612.347
Total		\$ 3.225.427	\$ 8.265.731	\$ 2.125.964	\$ 3.047.046		
VAN		TIR		Payback		ROI	
\$-2.844.005,87		2%		22		-65,74%	

Fig. C.1 Flujo de caja - Configuración 3 paneles. Fuente: Elaboración propia

Año	Inversión Inicial	Ingresos Por Excedentes	Ahorros en Boletas	Mantenimiento	Reemplazo de componentes	Flujo Neto Anual	Flujo Acumulado
0	\$ 4.890.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -4.890.000	\$ -4.890.000
1	\$ -	\$ 125.728	\$ 241.987	\$ 48.900	\$ -	\$ 318.814	\$ -4.571.186
2	\$ -	\$ 130.850	\$ 248.036	\$ 51.149	\$ -	\$ 327.737	\$ -4.243.449
3	\$ -	\$ 135.849	\$ 254.237	\$ 53.502	\$ -	\$ 336.584	\$ -3.906.865
4	\$ -	\$ 141.081	\$ 260.594	\$ 55.963	\$ -	\$ 345.712	\$ -3.561.153
5	\$ -	\$ 146.502	\$ 267.109	\$ 58.538	\$ -	\$ 355.073	\$ -3.206.080
6	\$ -	\$ 152.032	\$ 273.786	\$ 61.230	\$ -	\$ 364.587	\$ -2.841.493
7	\$ -	\$ 157.901	\$ 280.631	\$ 64.047	\$ -	\$ 374.485	\$ -2.467.008
8	\$ -	\$ 163.905	\$ 287.647	\$ 66.993	\$ -	\$ 384.558	\$ -2.082.450
9	\$ -	\$ 170.124	\$ 294.837	\$ 70.075	\$ -	\$ 394.887	\$ -1.687.563
10	\$ -	\$ 176.547	\$ 302.208	\$ 73.298	\$ 3.047.046	\$ -2.641.589	\$ -4.329.153
11	\$ -	\$ 183.129	\$ 309.764	\$ 76.670	\$ -	\$ 416.222	\$ -3.912.930
12	\$ -	\$ 189.923	\$ 317.508	\$ 80.197	\$ -	\$ 427.234	\$ -3.485.696
13	\$ -	\$ 197.126	\$ 325.445	\$ 83.886	\$ -	\$ 438.685	\$ -3.047.011
14	\$ -	\$ 204.480	\$ 333.581	\$ 87.745	\$ -	\$ 450.317	\$ -2.596.695
15	\$ -	\$ 212.090	\$ 341.921	\$ 91.781	\$ -	\$ 462.230	\$ -2.134.464
16	\$ -	\$ 220.088	\$ 350.469	\$ 96.003	\$ -	\$ 474.554	\$ -1.659.910
17	\$ -	\$ 228.336	\$ 359.231	\$ 100.419	\$ -	\$ 487.148	\$ -1.172.763
18	\$ -	\$ 236.937	\$ 368.211	\$ 105.038	\$ -	\$ 500.111	\$ -672.652
19	\$ -	\$ 245.859	\$ 377.417	\$ 109.870	\$ -	\$ 513.405	\$ -159.246
20	\$ -	\$ 255.090	\$ 386.852	\$ 114.924	\$ -	\$ 527.019	\$ 367.772
21	\$ -	\$ 264.629	\$ 396.523	\$ 120.211	\$ -	\$ 540.941	\$ 908.714
22	\$ -	\$ 274.530	\$ 406.437	\$ 125.740	\$ -	\$ 555.226	\$ 1.463.940
23	\$ -	\$ 284.840	\$ 416.598	\$ 131.524	\$ -	\$ 569.913	\$ 2.033.853
24	\$ -	\$ 295.334	\$ 427.013	\$ 137.574	\$ -	\$ 584.773	\$ 2.618.625
25	\$ -	\$ 306.316	\$ 437.688	\$ 143.903	\$ -	\$ 600.101	\$ 3.218.727
Total		\$ 5.099.224	\$ 8.265.731	\$ 2.209.181	\$ 3.047.046		
VAN		TIR		Payback		ROI	
\$-2.483.521,51		3%		20		-34,18%	

Fig. C.2 Flujo de caja - Configuración 4 paneles. Fuente: Elaboración propia

Año	Inversión Inicial	Ingresos Por Excedente	Ahorros en Boletas	Mantenimiento	Reemplazo de componentes	Flujo Neto Anual	Flujo Acumulado
0	\$ 5.257.800	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -5.257.800	\$ -5.257.800
1	\$ -	\$ 222.003	\$ 241.987	\$ 52.578	\$ -	\$ 411.412	\$ -4.846.388
2	\$ -	\$ 231.023	\$ 248.036	\$ 54.997	\$ -	\$ 424.063	\$ -4.422.325
3	\$ -	\$ 240.085	\$ 254.237	\$ 57.526	\$ -	\$ 436.796	\$ -3.985.529
4	\$ -	\$ 249.474	\$ 260.594	\$ 60.173	\$ -	\$ 449.895	\$ -3.535.635
5	\$ -	\$ 259.220	\$ 267.109	\$ 62.941	\$ -	\$ 463.388	\$ -3.072.246
6	\$ -	\$ 269.352	\$ 273.786	\$ 65.836	\$ -	\$ 477.303	\$ -2.594.943
7	\$ -	\$ 279.825	\$ 280.631	\$ 68.864	\$ -	\$ 491.592	\$ -2.103.352
8	\$ -	\$ 290.692	\$ 287.647	\$ 72.032	\$ -	\$ 506.306	\$ -1.597.046
9	\$ -	\$ 301.977	\$ 294.837	\$ 75.346	\$ -	\$ 521.468	\$ -1.075.577
10	\$ -	\$ 313.627	\$ 302.208	\$ 78.811	\$ 3.047.046	\$ -2.510.023	\$ -3.585.600
11	\$ -	\$ 325.737	\$ 309.764	\$ 82.437	\$ -	\$ 553.064	\$ -3.032.536
12	\$ -	\$ 338.328	\$ 317.508	\$ 86.229	\$ -	\$ 569.607	\$ -2.462.929
13	\$ -	\$ 351.390	\$ 325.445	\$ 90.195	\$ -	\$ 586.640	\$ -1.876.289
14	\$ -	\$ 364.986	\$ 333.581	\$ 94.344	\$ -	\$ 604.223	\$ -1.272.066
15	\$ -	\$ 379.021	\$ 341.921	\$ 98.684	\$ -	\$ 622.258	\$ -649.808
16	\$ -	\$ 393.653	\$ 350.469	\$ 103.224	\$ -	\$ 640.898	\$ -8.909
17	\$ -	\$ 408.801	\$ 359.231	\$ 107.972	\$ -	\$ 660.060	\$ 651.150
18	\$ -	\$ 424.537	\$ 368.211	\$ 112.939	\$ -	\$ 679.810	\$ 1.330.960
19	\$ -	\$ 440.854	\$ 377.417	\$ 118.134	\$ -	\$ 700.137	\$ 2.031.097
20	\$ -	\$ 457.757	\$ 386.852	\$ 123.568	\$ -	\$ 721.042	\$ 2.752.139
21	\$ -	\$ 475.275	\$ 396.523	\$ 129.252	\$ -	\$ 742.546	\$ 3.494.685
22	\$ -	\$ 493.458	\$ 406.437	\$ 135.198	\$ -	\$ 764.697	\$ 4.259.381
23	\$ -	\$ 512.400	\$ 416.598	\$ 141.417	\$ -	\$ 787.581	\$ 5.046.962
24	\$ -	\$ 531.956	\$ 427.013	\$ 147.922	\$ -	\$ 811.047	\$ 5.858.010
25	\$ -	\$ 552.210	\$ 437.688	\$ 154.726	\$ -	\$ 835.171	\$ 6.693.180
Total		\$ 9.107.641	\$ 8.265.731	\$ 2.375.344	\$ 3.047.046		
VAN		TIR		Payback		ROI	
\$-1.689.827,33		6%		17		27,30%	

Fig. C.3 Flujo de caja - Configuración 3 paneles. Fuente: Elaboración propia

Año	Generación Anual [kWh]	Emisiones Evitadas Anual [kgCO ₂]
1	3130,55	757,91
2	3118,27	754,93
3	3101,74	750,93
4	3085,33	746,96
5	3068,88	742,98
6	3052,47	739,00
7	3036,1	735,04
8	3019,7	731,07
9	3003,29	727,10
10	2986,85	723,12
11	2970,42	719,14
12	2954,03	715,17
13	2937,63	711,20
14	2921,24	707,23
15	2904,86	703,27
16	2888,46	699,30
17	2872,03	695,32
18	2855,56	691,33
19	2839,12	687,35
20	2822,7	683,38
21	2806,27	679,40
22	2789,82	675,42
23	2773,34	671,43
24	2756,91	667,45
25	2740,41	663,45
Generación Total [MWh]		Emisiones Evitadas Total [ton]
73,44		17,78
Factor Emisión: 0,2421 [kgCO ₂ e/kWh]		

Fig. C.4 Emisiones de CO₂ evitadas por año. Fuente: Elaboración propia