



**Diseño y simulación de una valla publicitaria autosostenible alimentada con
energía solar para las UTS en Barrancabermeja. 2025-2026**

Modalidad: Proyecto de Investigación

Tomas Antonio Pedraza Herazo
CC 1097184757
Julián Vega Chavez
CC 1096063145
David Ayala Martínez
CC 1005188058

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Barrancabermeja 1 de mayo 2026**



Diseño y simulación de una valla publicitaria autosostenible alimentada con energía solar para las UTS en Barrancabermeja. 2025-2026

Modalidad: Proyecto de Investigación

Tomas Antonio Pedraza Herazo
CC 1097184757
Julián Vega Chavez
CC 1096063145
David Ayala Martínez
CC 1005188058

Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogos en Operación y Mantenimiento Electromecánica

DIRECTOR

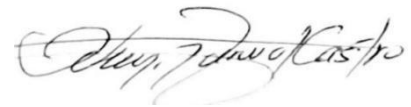
José Luis Barbosa Ortega

Grupo de investigación – SIGLA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Barrancabermeja 1 de mayo 2026

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título de Tecnología en operación y mantenimiento electromecánico, según el Acta del Comité de Trabajos de Grado FCNI-269 con fecha: 03/06/2026 evaluado por Ademyr Arlindo Castro.



Firma del Evaluador



Firma del Director

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado primeramente a Dios y a las personas que con su apoyo, esfuerzo y constancia, hicieron posible llegar a esta etapa académica con éxito.

Queremos reconocer a nuestros asesores docentes por su apoyo valioso, pese a las dificultades que aparecieron durante la ejecución del proyecto, les agradecemos su paciencia y la confianza total que tuvieron en las capacidades del equipo de investigación.

Expresamos nuestra gratitud a nuestros padres por representar la constancia y el amor, brindando apoyo incondicional en cualquier circunstancia.

Finalmente, agradecemos al equipo de investigación, cuyo esfuerzo y dedicación permitieron cumplir con el objetivo propuesto.

Grupo investigador

AGRADECIMIENTOS

El grupo de investigación expresa su gratitud de manera especial hacia aquellas personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo de grado.

Queremos reconocer al docente Ademir Arlindo Mármol Castro, quien fue la persona con la que comenzamos este proyecto de grado, y fue él quien nos orientó proporcionándonos conocimientos.

Apreciamos la paciencia y el rigor del profesor José Luis Barbosa Ortega, que contribuyeron de manera significativa en la finalización exitosa del proceso de investigación final.

Extendemos nuestro agradecimiento a nuestros padres y familiares por ser un pilar fundamental en cada etapa académica, aportando esfuerzo, dedicación y amor.

Grupo investigador

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	5
Agradecimientos	6
Lista de Figuras	11
Lista de Tablas	12
Resumen	13
Palabras clave	14
Introducción	14
Descripción del Problema	16
Pregunta de Investigación	16
1. Descripción del trabajo de investigación	17
1.1. Planteamiento del problema	17
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	19
1.4. Estado del arte	19
2. Marco referencial	24
3. Diseño de la investigación	26
4. Desarrollo del trabajo de grado	27
4.1. Fase 1: Revisión Bibliográfica y Análisis de Requerimientos	27
4.2. Fase 2: Diseño Estructural y Dimensionamiento del Sistema	29
4.3. Definición y Selección de Insumos para el Prototipo	29
4.4. Diseño Estructural y Modelado 3D	30
4.5. Guía de Ensamble e Instalación	31
5. Resultados	32

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,

VERSIÓN: 2.0

5.1.	Análisis del recurso solar _____	32
5.2.	Ubicación del Proyecto _____	32
5.3.	Recurso Solar Disponible _____	32
5.4.	Temperatura de Operación de los Paneles _____	34
5.5.	Cálculo de la demanda energética _____	34
5.5.1.	Modelo 1 — Valla Iluminada Tradicional (Off-Grid) _____	34
5.5.2.	Cálculo de Energía Diaria _____	36
5.5.3.	Modelo 2 — Valla con Pantalla LED (Sistema Híbrido Solar + Red) _____	36
5.5.3.1	Inventario de Cargas Eléctricas _____	37
5.5.3.2	Cálculo de Energía Diaria Total _____	37
5.5.3.3	Distribución de Energía según Criterio Híbrido 70/30 _____	38
5.5.4.	Distribución de Energía según Criterio Híbrido 70/30 _____	38
5.6.	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico _____	39
5.6.1.	Dimensionamiento de Paneles Solares — Modelo 1 (Off-Grid) _____	39
5.6.2.	Número de Paneles Requeridos _____	40
5.6.3.	Dimensionamiento de Paneles Solares — Modelo 2 (Híbrido) _____	40
5.6.4.	Dimensionamiento del Banco de Baterías _____	41
5.6.5.	Modelo 1 — Batería AGM (Off-Grid, Autonomía 3 Días) _____	41
5.6.6.	Modelo 2 — Batería LiFePO ₄ (Híbrido, Autonomía 1 Día Solar) _____	42
5.6.7.	Dimensionamiento del Controlador de Carga _____	42
5.6.8.	Modelo 1 — Controlador MPPT 30A / 24V _____	43
5.6.9.	Modelo 2 — Controlador MPPT 40A / 48V _____	43
5.7.	Dimensionamiento del Inversor — Modelo 2 (Exclusivo) _____	44
5.7.1.	Sistema de Transferencia con Respaldo a Red _____	45
5.7.2.	Dimensionamiento del Cableado _____	47
5.7.3.	Protecciones Eléctricas _____	49
5.7.3.1	Protecciones DC — Modelo 1 _____	50
5.7.3.2	Protecciones DC y AC — Modelo 2 _____	50

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,

VERSIÓN: 2.0

5.7.3.3	Sistema de Puesta a Tierra _____	51
5.8.	Diseño estructural _____	52
5.8.1.	Modelo 1 — Valla Iluminada Tradicional (4 m x 3 m) _____	52
5.8.1.1	Descripción y Dimensiones _____	52
5.8.1.2	Inclinación del Panel Solar y Carga de Viento _____	52
5.8.2.	Modelo 2 — Valla con Pantalla LED Modular _____	54
5.9.	Modelado del sistema _____	54
5.9.1.	Modelado Modelo 1 — Valla Iluminada (Blender) _____	55
5.9.2.	Modelado Modelo 2 — Valla con Pantalla LED (Blender) _____	57
5.10.	Guía de ensamble e instalación _____	60
5.10.1.1	ETAPA 1 — Preparación del Sitio y Obra Civil _____	61
5.10.1.2	ETAPA 2 — Montaje Estructural _____	61
5.10.1.3	ETAPA 3 — Instalación del Panel Solar _____	62
5.10.1.4	ETAPA 4 — Instalación del Banco de Baterías _____	62
5.10.1.5	ETAPA 5 — Instalación de Protecciones y Cableado _____	63
5.10.1.6	ETAPA 6 — Conexión del Controlador MPPT e Inversor _____	63
5.10.1.7	ETAPA 7 — Pruebas Eléctricas y Validación Operativa _____	64
5.11.	Presupuesto y análisis económico _____	65
5.11.1.	Presupuesto Detallado — Modelo 1 (Off-Grid) _____	65
5.11.2.	Presupuesto Detallado — Modelo 2 (Híbrido) _____	66
5.11.3.	Análisis Comparativo y Costo-Beneficio _____	68
5.12.	Cumplimiento RETIE — Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas	69
5.12.1.	Puesta a Tierra — RETIE Artículo 15 _____	70
5.12.2.	Señalización y Demarcación — RETIE Artículo 13 _____	70
5.12.3.	Protección DC — RETIE / NTC 2050 Artículo 690 _____	72
5.12.4.	Protecciones AC — RETIE / NTC 2050 (Solo Modelo 2) _____	74
5.12.5.	Tablero Eléctrico y Montaje — RETIE Artículo 29 _____	75
5.12.6.	Conductores Certificados — RETIE Artículo 10 _____	76

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,

VERSIÓN: 2.0

5.12.7.	Resumen de Cumplimiento RETIE _____	77
5.13.	Desarrollo de modelado 3d _____	78
5.13.1.	Evolución Cronológica y Técnica del Diseño Estructural _____	78
5.14.	Simulación Eléctrica: Pruebas virtuales del comportamiento del sistema, autonomía de batería y eficiencia lumínica.....	85
6.	Conclusiones _____	88
7.	Recomendaciones _____	90
8.	Referencias bibliográficas _____	92
9.	Apéndices _____	98
10.	Anexos _____	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Irradiancia horizontal global mensual en Barrancabermeja (7°N/73°O)	33
Figura 2. Diagrama UNIFILAR – MODELO 1 – SISTEMA OFF – GRID 24V DC..	57
Figura 3. Diagrama UNIFILAR – MODELO 2 -HÍBRIDO SOLAR + RED	60
Figura 4. Modelo 3D de edificio, valla publicitaria y marquesina en Blender	79
Figura 5. Entrada de la estructura general en modelo 3D	80
Figura 6. Vista general de las estructuras en entorno 3D	80
Figura 7. Vista de luces en la propuesta de valla publicitaria 3D	81
Figura 8. Estructura general de la valla publicitaria en Blender	81
Figura 9. Vista superior del diseño de pantalla LED y sistema fotovoltaico	82
Figura 10. Vista lateral de los soportes estructurales del prototipo.	83
Figura 11. Vista frontal del prototipo virtual para análisis de escala	83
Figura 12. Proyección lateral del poste estructural y valla fotovoltaica	84
Figura 13. Vista aérea del prototipo virtual en entorno de desarrollo	84
Figura 14. Vista frontal del diseño integrado con la identidad corporativa UTS	85
Figura 15. Esquema eléctrico del sistema de iluminación nocturna automatizado.	86
Figura 16. Esquema eléctrico del sistema de regulación de carga e inversión	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de cargas.....	35
Tabla 2. Resumen de demanda energética.....	36
Tabla 3. Inventario de cargas.....	36
Tabla 4. Resumen de demanda energética	38
Tabla 5. Especificaciones técnicas panel solar	39
Tabla 6. Lógica ATS.....	46
Tabla 7. Resumen de calibres y caídas de tensión	48
Tabla 8. Protecciones eléctricas DC	50
Tabla 9. Protecciones eléctricas DC y AC.....	50
Tabla 10. Componentes estructurales.....	52
Tabla 11. Componentes estructurales.....	54
Tabla 12. Presupuesto detallado.....	64
Tabla 13. Presupuesto detallado.....	65
Tabla 14. Análisis comparativo Modelo 1 vs Modelo 2.....	67
Tabla 15. Verificación de cumplimiento RETIE y normas asociadas.....	76

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de grado presenta el diseño de una valla publicitaria autosostenible mediante sistemas solares fotovoltaicos para la sede de las Unidades Tecnológicas de Santander en Barrancabermeja, como respuesta a la necesidad de implementar soluciones de ingeniería de bajo impacto ambiental. El objetivo principal fue dimensionar y modelar un sistema electromecánico capaz de alimentar sistemas de iluminación LED y pantallas led, garantizando autonomía energética sin depender de la red convencional.

La metodología se desarrolló en cuatro fases: primero, se realizó una caracterización climática de la región, determinando un potencial de 4.5 HSP; segundo, se calculó la carga eléctrica para dos escenarios (iluminación estática y pantalla LED modular); tercero, se seleccionaron los componentes según normatividad RETIE y NTC 2050, y cuarto, se realizó el modelado estructural en Blender junto al circuito del prototipo en TinkerCAD para tener una visión de cómo se vería el proyecto ejecutado y como funcionaría eléctricamente si se escala a prototipo.

Los resultados arrojaron un diseño técnico detallado, logrando un equilibrio costo-beneficio óptimo para la institución. Se concluye que el proyecto es técnicamente viable y escalable, proporcionando una guía técnica de montaje que sirve como referente para la modernización de la infraestructura publicitaria universitaria bajo estándares de eficiencia energética. La propuesta final no solo cumple con los requisitos de ingeniería, sino que se alinea con las políticas de sostenibilidad institucional.

PALABRAS CLAVE. Energía solar fotovoltaica, Diseño electromecánico, Eficiencia energética, Normativa RETIE, Autosostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación desarrolla el diseño técnico de una valla publicitaria autosostenible para la sede de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) en Barrancabermeja. La iniciativa surge ante la necesidad de modernizar la infraestructura institucional bajo criterios de eficiencia energética y responsabilidad ambiental. A diferencia de los sistemas de comunicación tradicionales que dependen exclusivamente de la red eléctrica convencional, esta propuesta integra sistemas solares fotovoltaicos para garantizar un funcionamiento autónomo. El documento detalla el proceso de dimensionamiento eléctrico, la selección de componentes bajo normativa RETIE y el modelado estructural, buscando no solo mitigar el impacto ambiental, sino también establecer un referente tecnológico en el uso de energías limpias dentro de la comunidad académica.

A nivel global y nacional, la integración de sistemas fotovoltaicos en mobiliario urbano e infraestructura publicitaria ha cobrado un interés significativo. Diversas investigaciones previas han evaluado el potencial de la energía solar en aplicaciones estructurales; por ejemplo, se ha demostrado cómo la optimización del ángulo de inclinación y la selección de inversores de alta eficiencia mejoran drásticamente el rendimiento energético en

zonas de alta radiación (Lin, 2025). Asimismo, estudios enfocados en el desarrollo tecnológico del sector destacan que el uso de simuladores lógicos y herramientas de modelado paramétrico disminuye significativamente los errores en las etapas de manufactura y ensamble estructural (Sandoval Quijano, 2014). Estos antecedentes sientan las bases técnicas sobre el comportamiento de los sistemas autónomos en entornos urbanos consolidados.

A pesar de estos avances en la literatura técnica actual, la mayoría de los estudios existentes se enfocan en la implementación de vallas publicitarias estáticas de iluminación convencional a gran escala, dejando un vacío investigativo en el desarrollo comparativo y simultáneo de sistemas dinámicos (pantallas LED modulares) y estáticos para entornos institucionales en regiones con microclimas de temperaturas extremas. Este trabajo aporta un enfoque innovador al diseñar y contrastar de manera directa dos alternativas de diseño bajo las condiciones climáticas específicas de Barrancabermeja, integrando una lógica de control automatizada por fotorresistencia para mitigar de forma óptima el consumo nocturno y extendiendo el ciclo de vida del banco de almacenamiento.

Para alcanzar este propósito, la investigación se fundamenta en una metodología de enfoque cuantitativo y de tipo descriptivo-tecnológico, estructurada en tres fases secuenciales: en primer lugar, se realiza la caracterización del potencial solar de la zona mediante la recopilación de datos meteorológicos históricos; en segundo lugar, se ejecuta el dimensionamiento eléctrico paramétrico bajo los lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE); y finalmente, se valida la arquitectura del sistema mediante el modelado geométrico tridimensional en Blender y la simulación lógica de los circuitos de control en la plataforma TinkerCAD.

Descripción del Problema

En la sede UTS Barrancabermeja, la infraestructura publicitaria actual depende en un 100% de la red de energía comercial, lo que implica costos operativos fijos y una huella de carbono asociada a la generación térmica predominante en el sistema interconectado nacional. A nivel técnico, una valla convencional de 4m x 3m con iluminación de vapor de sodio o halogenuros metálicos puede consumir aproximadamente 450W - 600W por hora de operación; considerando un encendido promedio de 12 horas nocturnas, esto representa un consumo mensual de 216 kWh, lo que se traduce en costos significativos de facturación y un mantenimiento constante por la baja vida útil de las luminarias tradicionales (Barón Cangrejo & Amaya Hernández, 2020; Dávalos Laverde & Amaya Hernández, 2023).

A esto se suma el factor climático: Barrancabermeja presenta una de las radiaciones solares más altas del país, con un promedio de 4.5 a 5.1 HSP (Altahona Piñeres, 2023; Rincon Leal, Piñeros Carvajal & Cano Triviño, 2024), un recurso que actualmente se desperdicia. La ausencia de un modelo de ingeniería que aproveche este potencial para la comunicación institucional evidencia una brecha tecnológica y una falta de alineación con los objetivos de desarrollo sostenible que la universidad promueve (Sandoval Quijano, 2014). Sin un diseño detallado, la transición hacia una infraestructura verde sigue siendo una intención declarativa sin viabilidad técnica comprobada.

Pregunta de Investigación

¿Cómo diseñar un sistema publicitario autosostenible mediante energía solar fotovoltaica que sea técnicamente viable, cumpla con la normativa eléctrica vigente y responda a las condiciones climáticas específicas de la sede UTS Barrancabermeja?

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿De qué manera el desarrollo de un prototipo de valla publicitaria autosostenible ayudaría a mejorar el gasto energético y la sostenibilidad ambiental en las UTS, sede Barrancabermeja? La visibilidad institucional se encuentra limitada por el empleo de métodos publicitarios convencionales que conllevan altos costos operativos además de un impacto ambiental considerable debido a su consumo de electricidad fósil, situación que se ve agravada por la dependencia de la red eléctrica pública que eleva los gastos fijos mensuales y contradice los principios de eficiencia promovidos por la universidad (Barón Cangrejo & Amaya Hernández, 2020); de igual manera, la ausencia de plataformas modernas dificulta la difusión de información relevante, lo que proyecta una imagen desactualizada ante una sociedad que demanda soluciones tecnológicas alineadas con la preservación del entorno y la optimización de los recursos energéticos disponibles (Condori Flores, 2018; Dávalos Laverde & Amaya Hernández, 2023).

1.2. JUSTIFICACIÓN

La ejecución de este proyecto se fundamenta en la urgencia de adoptar modelos de desarrollo sostenible que permitan a las UTS Barrancabermeja reducir sus costos por

concepto de energía eléctrica, puesto que la transición hacia vallas publicitarias alimentadas por energía solar representa una solución técnica viable que disminuye la huella de carbono y optimiza el presupuesto institucional a largo plazo (Lin, 2025); asimismo, la investigación posee un alto valor académico para el programa de Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico Industrial, debido a que el prototipo funciona como una herramienta de aprendizaje práctico sobre sistemas de potencia aislados y componentes electrónicos (Villalva, 2019), lo cual garantiza que los autores y la institución se posicionen a la vanguardia de la innovación tecnológica regional.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una guía técnica detallada y un modelo de ingeniería integrado que explique el proceso de diseño, dimensionamiento y construcción de una valla publicitaria autosostenible con energía solar, esto debido a las exigencias técnicas y a los altos costos que implica la construcción de un prototipo físico, se plantea como alternativa la elaboración de un manual de implementación con esquemas técnicos y modelado 3D, que permita que el proyecto pueda ser replicado a escala real o reducida, ya sea por la universidad o por terceros que deseen desarrollarlo como proyecto de grado o iniciativa similar.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estructurar el dimensionamiento fotovoltaico mediante el análisis de radiación y cargas para definir la capacidad técnica de cada componente del sistema.
- Elaborar planos detallados y modelado tridimensional del sistema mecánico y electrónico para visualizar la integración total a escala real y prototipo.
- Consolidar una guía de ensamble paso a paso con presupuesto y normativa RETIE para facilitar la construcción técnica precisa por terceros.

1.4. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presenta un breve análisis de los antecedentes centrados en el diseño de sistemas solares fotovoltaicos. Esta revisión bibliométrica permite identificar los avances tecnológicos y hallazgos de otros investigadores, cuyos aportes se estructuran de la siguiente manera:

Detalle de validación Bibliométrica

Autor(es):	Condori Flores, 2018
Título de la Investigación	Fabricación de letreros publicitarios rotatorios con sistema solar fotovoltaico respaldado
Aspectos Relevantes Identificados	En este proyecto se presenta una iniciativa creativa que busca un uso responsable de la tecnología en favor del entorno natural. La meta principal es desarrollar un sistema publicitario que incorpore las tres “E”: Ecológico, Económico y Eficiente, utilizando energía solar como fuente

<p>Autor(es): Título de la Investigación</p>	<p>predominante. Esta iniciativa surge de un análisis que reveló que la mayoría de los letreros publicitarios en comercios dependen de electricidad convencional de 220V, lo que ocasiona un elevado consumo y una fuerte dependencia de recursos no renovables. Frente a esta problemática, la propuesta consiste en sustituir estos métodos tradicionales por un cartel publicitario rotativo que funcione con energía fotovoltaica, de este modo, se fomenta el uso de energías limpias y renovables. Así, la investigación se vuelve significativa al evidenciar cómo la implementación de la energía solar puede optimizar la eficiencia energética, disminuir gastos y contribuir a la sostenibilidad ambiental en la comunidad.</p>
<p>Aspectos Relevantes Identificados</p>	<p>Lin, 2025 Sustainable Investment Strategy: A Fuzzy Nonlinear Multi-Objective Programming for Taiwan's Solar Photovoltaic Billboards</p> <p>Se propone una estrategia que fomente la sostenibilidad, con el fin de disminuir la energía consumida y las emisiones de carbono generadas por los grandes anuncios situados en los techos de edificios comerciales en Taiwán. El principal objetivo de la investigación es desarrollar un modelo de inversión sostenible mediante la implementación de sistemas solares fotovoltaicos que hagan uso de los espacios disponibles en las azoteas para producir energía limpia y eficiente. El estudio adopta un enfoque cuantitativo basado en programación difusa no lineal y optimización con múltiples objetivos, enfocándose en equilibrar ganancias, tiempo de instalación, costos, calidad del sistema y reducción de emisiones contaminantes. Además, el modelo emplea herramientas analíticas como la tasa interna de retorno modificada difusa y la técnica α-cut para medir la eficiencia y el regreso de la inversión. Este análisis es valioso para el proyecto actual, ya que demuestra cómo la incorporación de energía solar fotovoltaica en estructuras publicitarias puede mejorar la eficacia energética, disminuir el impacto ambiental y fomentar un desarrollo urbano sostenible, sirviendo de modelo teórico y práctico para proyectos que buscan integrar tecnología, economía y sostenibilidad.</p>
<p>Autor(es): Título de la Investigación</p>	<p>Dávalos Laverde & Amaya Hernández, 2023 Diseño y estudio técnico-económico de prototipo de paneles solares para sustituir los sistemas convencionales de iluminación en vallas publicitarias</p>
<p>Aspectos Relevantes Identificados</p>	<p>tiene como objetivo elaborar un estudio técnico-económico que permita analizar la viabilidad de implementar paneles</p>

solares para la iluminación de vallas publicitarias instaladas por la empresa AGS soluciones en la ciudad de Bogotá DC. La presente investigación se ubica dentro del ámbito de los estudios experimentales, integrando enfoques tanto técnicos como económicos con el fin de evaluar la factibilidad y los efectos de implementar un sistema de energía solar para reemplazar la iluminación tradicional de las vallas publicitarias. Este análisis tiene como objetivo descubrir las formas más eficaces de utilizar la energía solar, sugiriendo un diseño que mejore el uso de energía y promueva la adopción de fuentes limpias.

Los resultados obtenidos son de gran importancia, ya que evidencian que la implementación de paneles solares es una opción sostenible y económicamente viable a largo plazo. Asimismo, esta investigación incentiva a las compañías a crear planes tecnológicos que se alineen con las circunstancias reales del entorno, promoviendo así un mayor sentido de responsabilidad ambiental y un aprendizaje técnico práctico que facilite la transición hacia fuentes de energía renovable y un uso más consciente de los recursos.

Autor(es):

Título de la Investigación

Aspectos Relevantes Identificados

Barón Cangrejo & Amaya Hernández, 2020

Diseño de un sistema solar fotovoltaico para suplir la iluminación en vallas publicitarias de la empresa Efectimedios S.A.

tiene como objetivo Diseñar un sistema fotovoltaico para suplir la demanda energética de las vallas publicitarias a nivel nacional para la empresa Efectimedios S.A. que permita minimizar el consumo energético en la ciudad de Bogotá DC. Los investigadores del proyecto sostienen que al incorporar instalaciones de energía solar se puede ofrecer una alternativa única y sostenible para el abastecimiento energético de las vallas publicitarias. Este enfoque tecnológico no solo mejora la efectividad y reduce los costos operativos, sino que también impulsa el aumento de la conciencia ambiental tanto dentro de la empresa como en su entorno. La adopción de paneles solares es una estrategia que favorece la autonomía energética y mitiga la huella ecológica, promoviendo hábitos responsables hacia el medio ambiente.

En resumen, este análisis respalda al proyecto actual al demostrar cómo la energía solar fotovoltaica se presenta como un recurso clave para optimizar los procesos de negocio y apoyar el progreso sostenible. Su integración aporta beneficios económicos, ecológicos y tecnológicos, alentando la innovación y posicionando a la empresa como un referente en la adopción de energías limpias en el sector publicitario.

<p>Autor(es): Título de la Investigación</p>	<p>Altahona Piñeres, 2023 Estudio y viabilidad del potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja, para el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica</p>
<p>Aspectos Relevantes Identificados</p>	<p>este estudio busca evaluar la disponibilidad y aprovechamiento del recurso solar en el municipio, con el fin de plantear estrategias que impulsen la implementación de sistemas fotovoltaicos sostenibles en el contexto local. El estudio emplea un método descriptivo y documental, ya que se basa en la recopilación, análisis y comparación de información sobre la radiación solar, las características geográficas y la situación actual del aprovechamiento de la energía solar en el país, utilizando datos de la NASA y estudios anteriores sobre fuentes de energía renovables. Los hallazgos permiten afirmar que la energía solar es una opción viable y sostenible para el desarrollo energético de Barrancabermeja, particularmente en las áreas rurales no conectadas a la red eléctrica. No obstante, su implementación enfrenta obstáculos relacionados con los altos gastos de inversión, la escasez de conocimiento técnico y la falta de incentivos gubernamentales claros. Por lo tanto, se sugiere crear estrategias que fomenten el uso eficiente de la energía solar, la incorporación de tecnologías fotovoltaicas y el fortalecimiento de una cultura energética sostenible en la región.</p>
<p>Autor(es): Título de la Investigación</p>	<p>Sandoval Quijano, 2014 Energía solar: estudio de implementación de un sistema de generación de energía para el edificio Yariquíes de la Universidad de Santander UDES</p>
<p>Aspectos Relevantes Identificados</p>	<p>Tuvo como propósito analizar la factibilidad de aplicar un sistema fotovoltaico en dicha institución. El estudio buscó evaluar el potencial energético disponible y determinar la manera más eficiente de aprovechar la radiación solar mediante la instalación de paneles solares, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al fortalecimiento del programa institucional UDESVERDE. El proyecto se centró en determinar los equipos requeridos como son paneles solares, inversores, controladores y baterías, y en llevar a cabo un análisis de costos que facilitara la evaluación de la viabilidad tanto técnica como económica del sistema. También se tomaron en cuenta factores como el consumo de energía por planta, la radiación solar en Bucaramanga y la mejor ubicación para los módulos solares con el fin de aumentar su eficiencia. Los hallazgos mostraron que la energía solar fotovoltaica es una opción limpia y sostenible frente al uso de energía tradicional, lo que ayuda a disminuir la dependencia de <u>recursos no renovables y a reducir la contaminación.</u></p>

	<p>Además, se llegó a la conclusión de que la adopción de este tipo de tecnologías en centros educativos impulsa el aprendizaje, la conciencia ecológica y el uso eficiente de los recursos, convirtiéndose en una herramienta esencial para fomentar la eficiencia energética y la sostenibilidad.</p>
Autor(es):	Rincon Leal, Piñeros Carvajal, & Cano Triviño, 2024)
Título de la Investigación	Propuesta de implementación de soluciones solares en comunidades energéticas urbanas de Barrancabermeja
Aspectos Relevantes Identificados	<p>El objetivo principal de este proyecto fue promover la autosuficiencia y la reducción de costos energéticos mediante la implementación de paneles solares como una alternativa sostenible para los hogares urbanos de la ciudad.</p> <p>La investigación utilizó un método mixto, combinando abordajes cuantitativos y cualitativos para examinar de forma detallada los impactos técnicos, económicos y sociales que provoca la implementación de tecnologías solares. En la parte cuantitativa, se analizaron los beneficios económicos y energéticos que surgen del uso de paneles solares, mientras que en la parte cualitativa se indagaron las opiniones, posturas y niveles de aceptación de los ciudadanos hacia esta alternativa ecológica.</p> <p>En lo relacionado al diseño del método, el estudio se clasificó como exploratorio, descriptivo y aplicado. La fase exploratoria ayudó a identificar las principales dificultades y posibilidades para la incorporación de energías renovables en el ámbito local; la etapa descriptiva analizó el posible impacto de los sistemas solares en la economía familiar y en la independencia energética; y la fase aplicada se enfocó en la búsqueda de soluciones prácticas y concretas para disminuir la dependencia de fuentes de energía no renovables en la zona.</p> <p>La recopilación de datos integró encuestas estructuradas, entrevistas semiestructuradas y análisis de fuentes secundarias como investigaciones anteriores y reportes energéticos. Este enfoque metodológico permitió conseguir una visión completa del fenómeno, evidenciando que la implementación de tecnologías solares puede mejorar de manera notable la calidad de vida de los residentes y favorecer la sostenibilidad ambiental de la ciudad.</p>

Autores:

2. MARCO REFERENCIAL

El sustento de la presente investigación se articula mediante un análisis integral que vincula la teoría fotovoltaica con la normativa técnica vigente, el contexto ecológico y el diseño digital especializado. En primera instancia, el marco teórico profundiza en el efecto fotoeléctrico aplicado a celdas de silicio monocristalino, considerando que las condiciones climáticas de Barrancabermeja exigen un estudio analítico detallado sobre el coeficiente de temperatura de los módulos, dado que el incremento en la temperatura de la celda disminuye de manera inversamente proporcional el voltaje de circuito abierto y la potencia máxima del sistema (Villalva, 2019). En relación con el marco legal, el proyecto se alinea estrictamente con los requerimientos de seguridad del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2013) y las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998) para el dimensionamiento óptimo de conductores, canalizaciones y protecciones contra sobrecorrientes; asimismo, la Ley 1715 de 2014 actúa como el eje jurídico nacional que promueve e incentiva la implementación de estas fuentes no convencionales de energía en el sector público y académico (Congreso de la República de Colombia, 2014). Desde el componente de diseño y validación, la metodología se apoya en el uso de la plataforma TinkerCAD para la simulación electrónica, permitiendo realizar pruebas virtuales de los circuitos de control y la lógica de carga de los bancos de almacenamiento antes de cualquier despliegue físico (Autodesk, 2022); de manera complementaria, se emplea el software Blender para el desarrollo técnico-estético, utilizando esta herramienta de código abierto para el modelado tridimensional de la estructura y la simulación fotorrealista de materiales integrados al entorno real del campus (Blender Online Community, 2024). Finalmente, el

marco ambiental y el marco conceptual se entrelazan para fundamentar la sostenibilidad del sistema, donde la sustitución de fuentes fósiles por energía solar se alinea con los factores de emisión nacionales para la reducción de gases de efecto invernadero (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2020), al tiempo que se analiza el ciclo de vida y la baja toxicidad de las baterías de Litio $LiFePO_4$ como una alternativa ecológica frente a los acumuladores convencionales de plomo-ácido (Mesa & Torres, 2022).

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se define estructuralmente como un diseño técnico-validado mediante simulación computacional, adoptando un enfoque cuantitativo y un método proyectivo que permite establecer la viabilidad de la valla publicitaria sin recurrir a la ejecución física en esta etapa, lo cual garantiza que el alcance del proyecto sea la entrega de un modelo de ingeniería riguroso y ejecutable. En este sentido, la fase de recolección de datos se fundamentó en fuentes de alta confiabilidad técnica, extrayendo los parámetros de radiación solar para las coordenadas específicas de Barrancabermeja de las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2014) y el proyecto POWER de la National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2020), lo cual permitió promediar un valor de 4.5 Horas Sol Pico (HSP) como criterio base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

En cuanto al proceso de diseño y validación, se estableció una ruta metodológica dividida en fases críticas de ingeniería; primero, se realizó el censo de carga detallado de los componentes LED y la pantalla publicitaria, definiendo una autonomía de 3 días para asegurar la continuidad del servicio ante condiciones climáticas adversas y variaciones en la radiación. Segundo, se procedió a la validación circuital mediante el uso de TinkerCAD, plataforma en la cual se simularon de manera independiente el sistema de carga principal, el comportamiento de la valla y el circuito de control para la iluminación nocturna (Autodesk, 2022), permitiendo verificar la respuesta de las protecciones eléctricas y el flujo de corriente bajo diferentes estados de carga de las baterías, cumpliendo así con los estándares de seguridad exigidos por el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

Simultáneamente, el desarrollo de la representación gráfica y técnica se llevó a cabo en Blender, software que permitió trasladar los cálculos matemáticos de estructuras y ángulos de inclinación a un entorno tridimensional para realizar una validación técnico-estética (Blender Online Community, 2024), asegurando la correcta disposición de los paneles para evitar efectos de sombreado y facilitando la integración visual del prototipo en el campus universitario.

Finalmente, la metodología concluye con la consolidación de productos verificables que incluyen un manual de montaje exhaustivo, planos de conexión técnica y un análisis detallado de costos, lo que demuestra que, si bien el proyecto no cuenta con una construcción física, posee todos los soportes de ingeniería necesarios para su posterior fabricación e instalación real por parte de la institución.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. Fase 1: Revisión Bibliográfica y Análisis de Requerimientos

Esta etapa inicial se desarrolló mediante una búsqueda detallada de información técnica en bases de datos académicas y repositorios especializados. A partir de esta revisión, se identificó que la radiación solar promedio en la zona de Barrancabermeja oscila entre 4.5 y 5.5 kWh/m² por día, lo cual representa un potencial energético adecuado para la implementación de sistemas fotovoltaicos aislados (García & González, 2018).

Con base en estos resultados, se determinó que el uso de paneles solares monocristalinos constituye la opción más viable, debido a su mayor eficiencia en condiciones de alta temperatura (Castañer & Silvestre, 2011). Adicionalmente, el análisis

de proyectos similares permitió establecer los siguientes elementos clave como base para el diseño del sistema:

- **Potencial de radiación local:** Datos obtenidos del Atlas de Radiación Solar de la UPME, los cuales confirman la viabilidad de carga de baterías incluso en condiciones de nubosidad en la región del Magdalena Medio (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2015).
- **Tecnología fotovoltaica:** Selección de celdas monocristalinas por su mejor coeficiente de temperatura frente a las policristalinas, reduciendo pérdidas de eficiencia por calor (Villalva, 2019).
- **Normativa RETIE (Capítulo 4):** Requisitos aplicables a sistemas de generación con fuentes no convencionales, incluyendo señalización de seguridad y dispositivos de protección (Ministerio de Minas y Energía, 2013).
- **Estándares IEEE 1547:** Lineamientos para la correcta gestión de sistemas energéticos distribuidos, garantizando estabilidad en el suministro eléctrico (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2018).
- **Gestión de almacenamiento:** Uso de baterías de ciclo profundo tipo AGM o Gel, seleccionadas por su bajo mantenimiento y alta resistencia a descargas profundas (Heredia, 2016).

La información recopilada permitió realizar una revisión detallada del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), enfocándose en los requisitos para sistemas de baja tensión y protección contra sobretensiones (Ministerio de Minas y Energía, 2013). A partir de esto, se definieron parámetros críticos de diseño, como el uso de conductores con aislamiento tipo THHN/THWN para condiciones de humedad, así como la incorporación de dispositivos de protección entre los diferentes componentes del sistema (Enríquez Harper, 2014).

En consecuencia, este proceso de análisis técnico permitió validar la viabilidad del diseño propuesto, asegurando el cumplimiento de la normativa eléctrica colombiana y

estableciendo las bases para la selección de los componentes necesarios que garanticen una autonomía mínima de tres días en la operación de la valla publicitaria (Roldán Viloria, 2015).

4.2. Fase 2: Diseño Estructural y Dimensionamiento del Sistema

Una vez finalizada la fundamentación teórica se procedió con la fase de diseño técnico donde se elaboraron los primeros esquemas geométricos de la valla publicitaria empleando herramientas de dibujo asistido, puesto que era indispensable definir la inclinación óptima del panel solar la cual se fijó en aproximadamente 10 grados hacia el sur para aprovechar la latitud de la ciudad, permitiendo así que la estructura soporte no solo el peso de los componentes electrónicos sino también las cargas de viento laterales sin comprometer la estabilidad del prototipo (Heredia, 2016).

De manera simultánea se realizó el cálculo de dimensionamiento eléctrico para garantizar que el sistema no sufra de apagones prematuros, de modo que se aplicaron fórmulas de balance energético comparando la energía generada por el panel frente al consumo total de la carga LED durante un periodo de 12 horas nocturnas, dando como resultado un margen de seguridad del 20% que permite cubrir las pérdidas por calor en los conductores y la eficiencia propia del regulador, logrando así una integración armónica entre la parte mecánica de la valla y el sistema de generación renovable que servirá de base para el ensamble físico programado (Villalva, 2019).

4.3. Definición y Selección de Insumos para el Prototipo

Una vez que se establecieron los cálculos de consumo y generación de energía, se procedió con la identificación de los materiales comerciales necesarios para materializar el prototipo físico, puesto que la selección de cada componente se basó en una relación

costo-beneficio ajustada a los precios de mercado actuales. De esta manera, se determinó que el sistema requiere una serie de elementos específicos que garantizan tanto la estabilidad estructural como la eficiencia eléctrica, logrando así consolidar el siguiente listado técnico que servirá de guía para el proceso de ensamble:

- **Módulo Fotovoltaico y Almacenamiento:** Panel solar de 10W y batería de 7Ah que constituyen el núcleo energético del proyecto al permitir la captura y guarda de electricidad para el uso nocturno (García & González, 2018).
- **Gestión y Control:** Regulador MPPT de 10A seleccionado por su facilidad de configuración y por incluir protecciones internas que evitan daños en la batería por sobrecarga (Villalva, 2019).
- **Componentes de Iluminación y Estructura:** Tiras LED de alta luminosidad junto con perfiles metálicos y láminas de polímeros que dan forma a la valla, asegurando que el mensaje publicitario sea visible sin exceder el presupuesto energético calculado.
- **Accesorios de Conexión y Seguridad:** Cableado de calibre adecuado y sistemas de protección mediante fusibles que cumplen con las recomendaciones del RETIE para instalaciones solares de pequeña escala (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

4.4. Diseño Estructural y Modelado 3D

El diseño estructural de ambos modelos cumple con los requisitos para fuerzas de viento establecidos en la norma sismorresistente colombiana NSR-10 Título B (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010), considerando una velocidad de viento de 90 km/h para Barrancabermeja. La carga de viento sobre el panel inclinado 10° se calculó mediante la ecuación de presión estática:

$$F_v = q \cdot G \cdot C_p \cdot A$$

Donde esta fuerza es resistida por los perfiles de acero ASTM A500 Gr. B con un factor de seguridad ≥ 1.5 .

El modelado tridimensional de ambas vallas se desarrolló en Blender, incluyendo subensambles de estructura principal, marco de valla, sistema fotovoltaico, gabinete eléctrico e iluminación/pantalla (Blender Online Community, 2024). Los renders fotorrealistas generados permiten visualizar la integración del prototipo en el campus universitario.

4.5. Guía de Ensamble e Instalación

La guía de ensamble aplica de forma general a ambos modelos y se desarrolla en 7 etapas secuenciales: (1) Preparación del sitio y obra civil; (2) Montaje estructural; (3) Instalación del panel solar; (4) Instalación del banco de baterías; (5) Instalación de protecciones y cableado; (6) Conexión del controlador MPPT e inversor; (7) Pruebas eléctricas y validación operativa. Cada etapa incluye especificaciones de torque, materiales, herramientas y procedimientos de seguridad conforme al RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

5. RESULTADOS

A continuación, se detallan los resultados de cada objetivo así:

5.1. ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR

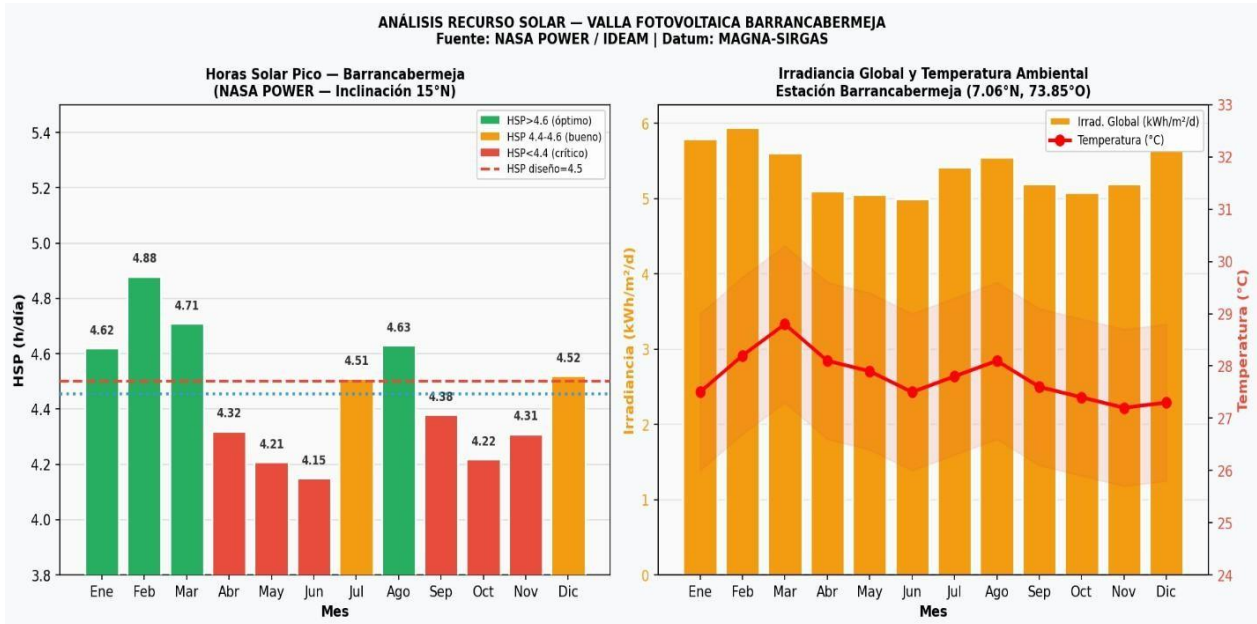
5.2. Ubicación del Proyecto

El proyecto se desarrolla en el municipio de Barrancabermeja, departamento de Santander, Colombia, ubicado aproximadamente a 7°04'N de latitud y 73°51'O de longitud, a una altitud promedio de 75 m.s.n.m. Esta localidad se sitúa en la región del Valle Medio del Río Magdalena, caracterizada por un clima tropical húmedo con temperaturas que oscilan entre 26 °C y 35 °C y una irradiación solar significativamente superior al promedio nacional.

5.3. Recurso Solar Disponible

Con base en los datos del Atlas de Radiación Solar de Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014) y validados con la herramienta NASA POWER para las coordenadas del proyecto (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2020), la irradiación horizontal global (GHI) para Barrancabermeja se distribuye de la siguiente forma:

Figura 1. Irradiancia horizontal global mensual en Barrancabermeja (7°N/73°O)



Nota: según NASA POWER 2024. Línea naranja: promedio anual (5.2 kWh/m²/día). Línea roja discontinua: valor de diseño adoptado (4.5 kWh/m²/día). Los meses de mayo y octubre registran el mínimo anual de 4.5 h/día, siendo los meses críticos de diseño.

El valor mínimo registrado corresponde a los meses de octubre y mayo, con 4.5 kWh/m²/día. Para garantizar el dimensionamiento conservador y asegurar la operación continua durante los meses de menor radiación, se adopta el siguiente valor de Horas Sol Pico (HSP):

$$HSP = 4.5 \text{ kWh/m}^2/\text{día} \rightarrow HSP = 4.5 \text{ h/día}$$

La elección del valor mínimo como criterio de diseño responde al principio de ingeniería de sistemas de mayor disponibilidad: dimensionar para el peor escenario operativo garantiza que el sistema sea capaz de atender la carga en cualquier época del año, evitando déficit energético durante períodos de baja irradiación. Este criterio está en

concordancia con la metodología de simulación de micredes (HOMER Energy, 2021) y con las prácticas internacionales de la norma para sistemas fotovoltaicos autónomos (International Electrotechnical Commission [IEC], 2004).

5.4. Temperatura de Operación de los Paneles

La temperatura ambiente promedio en Barrancabermeja es de aproximadamente 31 °C. Considerando que la temperatura de la celda solar supera la temperatura ambiente entre 20 °C y 30 °C bajo operación normal (NOCT ≈ 45–47 °C para paneles estándar), se define la temperatura de operación de celda para fines de corrección de rendimiento:

$$T_{celda} = T_{amb} + (NOCT - 20) * \left(\frac{G}{800}\right) \rightarrow T_{celda} = 31 + (47 - 20) * \left(\frac{1000}{800}\right) \approx 65^{\circ}C \quad (1)$$

Para la corrección de potencia del panel por temperatura se aplica el coeficiente de temperatura de potencia ($\gamma_{Pmax} \approx -0.35 \text{ \%/}^{\circ}C$ para monocristalino):

$$Factor_T = 1 + \gamma_{Pmax} \cdot (T_{celda} - T_{STC}) = 1 + (-0.0035) \cdot (65 - 25) = 1 - 0.14 = 0.86(2)$$

Este factor indica que bajo condiciones reales de operación en Barrancabermeja, el panel opera aproximadamente al 86% de su potencia nominal STC, lo cual se incorpora dentro de la eficiencia global del sistema en las secciones de dimensionamiento.

5.5. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

5.5.1. Modelo 1 — Valla Iluminada Tradicional (Off-Grid)

Inventario de Cargas Eléctricas

Tabla 1

Inventario de cargas Modelo 1.

Equipo	Cantidad	Potencia (W)	P. Total (W)	Horas/día
Reflector LED exterior	3	20	60	12
TOTAL	-	-	60 W	12 h

5.5.2. Cálculo de Energía Diaria

$$E_{bruta} = P_{total} \cdot t = 60 \text{ W} \cdot 12 \text{ h} = 720 \text{ Wh/día} \quad (3)$$

Dado que el sistema opera 100% en modo off-grid, se aplica un factor de eficiencia global del sistema ($\eta_{sistema}$) que contempla las pérdidas por autoconsumo del controlador de carga, resistencia de los conductores, eficiencia del banco de baterías (carga/descarga) y otros factores parásitos. Se adopta una eficiencia del sistema del 80%, valor conservador para sistemas DC de baja tensión con controlador MPPT:

$$\eta_{sistema} = 0.80$$

$$E_{requerida} = \frac{E_{bruta}}{\eta_{sistema}} = \frac{720}{0.80} = 900 \text{ Wh/día} \quad (4)$$

Esta es la energía que el arreglo fotovoltaico debe suministrar diariamente para mantener la operación del sistema y reponer las pérdidas inherentes a la conversión y transmisión de energía. Nótese que, al ser un sistema DC puro (sin inversor), no se aplica pérdida por conversión DC/AC.

Tabla 2

Resumen de demanda energética Modelo 1.

Parámetro	Valor
Potencia de carga total	60 W
Horas de operación nocturna	12 h/noche
Energía bruta diaria	720 Wh/día
Eficiencia global del sistema	80 %
Energía requerida al sistema FV	900 Wh/día

5.5.3. Modelo 2 — Valla con Pantalla LED (Sistema Híbrido Solar + Red)

5.5.3.1 Inventario de Cargas Eléctricas

Tabla 3

Inventario de cargas Modelo 2.

Equipo	Cant.	Potencia (W)	P. Total (W)	Horas/día
Pantalla LED modular 768x768 mm	1	350	350	8
Controlador de pantalla (receptor)	1	15	15	8
Ventilador de refrigeración gabinete	2	10	20	8
TOTAL	-	-	385 W	8 h

Nota: Se adopta 385 W como potencia total del sistema, que incluye cargas auxiliares.

5.5.3.2 Cálculo de Energía Diaria Total

$$E_{bruta} = P_{total} \cdot t = 385W \cdot 8h = 3080 \text{ Wh/día} \quad (5)$$

En el Modelo 2, la señal de alimentación es AC (110 V/220 V), por lo que se requiere inversor de onda senoidal pura. Las pérdidas del inversor ($\eta_{inv} = 0.93$) se integran en la eficiencia global. Adicionalmente se considera la eficiencia de la batería LiFePO_4 ($\eta_{bat} = 0.97$) y pérdidas en conductores ($\eta_{cable} = 0.97$):

$$\eta_{sistema} = \eta_{inv} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{cable} = 0.93 \cdot 0.97 \cdot 0.97 = 0.875 \quad (6)$$

$$E_{requerida_{total}} = \frac{E_{bruta}}{\eta_{sistema}} = \frac{3520}{0.875} = 3520 \text{ Wh/día} \quad (7)$$

5.5.3.3 Distribución de Energía según Criterio Híbrido 70/30

De acuerdo con el criterio de diseño obligatorio adoptado para este modelo, el 70% de la energía diaria es suministrado por el sistema fotovoltaico y el 30% restante proviene de la red eléctrica convencional como respaldo:

$$E_{solar} = 0.70 \cdot 3520 = 2464 \text{ Wh/día} \quad (8)$$

$$E_{red} = 0.30 \cdot 3520 = 1056 \text{ Wh/día} \quad (9)$$

La justificación técnico-económica de este criterio 70/30 radica en los siguientes argumentos: (a) La reducción del banco de baterías en un 70% frente a un sistema 100% autónomo disminuye sustancialmente el costo inicial y prolonga la vida útil de las baterías al reducir los ciclos de carga profunda; (b) La continuidad operativa se garantiza incluso en períodos prolongados de nubosidad o lluvia, que aunque poco frecuentes en Barrancabermeja, pueden generar déficit energético; (c) La viabilidad técnica es superior: un sistema 100% off-grid con pantalla LED de 385 W requeriría un banco de baterías de alto costo y gran volumen, incompatible con la estructura de la valla.

Tabla 4

Resumen de demanda energética Modelo 2.

Parámetro	Valor
Potencia total sistema	385 W
Horas de operación diurna/nocturna	8 h/día
Energía bruta diaria	3,080 Wh/día
Eficiencia global sistema híbrido	87.5 %
Energía total requerida	3,520 Wh/día
Energía a suministrar por FV (70 %)	2,464 Wh/día
Energía de respaldo red (30 %)	1,056 Wh/día

5.6. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

5.6.1. Dimensionamiento de Paneles Solares — Modelo 1 (Off-Grid)

La potencia del arreglo fotovoltaico necesaria para atender la demanda energética diaria se determina mediante la expresión fundamental de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, que relaciona la energía requerida con las horas de sol pico disponibles y la eficiencia del sistema:

$$P_{FV} = \frac{E_{requerida}}{HSP \cdot \eta_{sistema}} = \frac{900 \text{ Wh/día}}{4.5 \text{ h} \cdot 0.80} = \frac{900}{3.6} = 250 \text{ W} \quad (10)$$

Se aplica un factor de seguridad adicional del 10% para contemplar degradación del panel (aprox. 0.5%/año), sombreado parcial y tolerancia en la potencia nominal del módulo:

$$P_{FV_{diseño}} = 250 \cdot 1.10 = 275 \text{ W}_p \quad (11)$$

Se selecciona el panel solar monocristalino JINKO SOLAR JKM400M-72HL4-V (ver Anexo A) con las siguientes especificaciones técnicas en condiciones STC:

Tabla 5

Especificaciones técnicas panel solar Modelo 1.

Especificación Panel JINKO 400 W	Valor
Modelo	JKM400M-72HL4-V
Tecnología	Monocristalino PERC
Potencia nominal (Pmax)	400 W _p
Tensión en MPP (Vmpp)	41.2 V
Corriente en MPP (Impp)	9.71 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	49.5 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	10.18 A
Eficiencia del módulo	20.5 %
Coefficiente temperatura Pmax	-0.35 %/°C
Dimensiones	1,956 × 992 × 40 mm
Garantía de producción	25 años (80% Pmax)

5.6.2. Número de Paneles Requeridos

$$N_{\text{paneles}} = \frac{P_{FV_{\text{diseño}}}}{P_{\text{panel}}} = \frac{275}{400} = 0.69 \rightarrow 1 \text{ panel (mínimo)} \quad (12)$$

Se adopta 1 panel de 400 W_p, lo cual proporciona un margen generoso sobre el requerimiento de diseño de 275 W_p (factor de sobredimensionamiento = 1.45), lo que incrementa la reserva energética y garantiza la carga completa del banco de baterías incluso con pérdidas por temperatura y sombreado parcial en las horas de máxima radiación.

$$P_{\text{inst}} = 1 \cdot 400 = 400W_p \quad (13)$$

$$E_{gen} = 400 \cdot 4.5 \cdot 0.80 = 1440 \text{Wh/día} \gg 900 \text{Wh/día} \quad (14)$$

5.6.3. Dimensionamiento de Paneles Solares — Modelo 2 (Híbrido)

Para el Modelo 2 se dimensiona el arreglo fotovoltaico para cubrir únicamente la fracción solar de la demanda ($E_{solar} = 2,464 \text{ Wh/día}$), dado que el 30% restante proviene de la red eléctrica. La potencia del generador fotovoltaico se calcula:

$$P_{FV} = \frac{E_{solar}}{HSP \cdot \eta_{FV}} = \frac{2464}{4.5 \cdot 0.875} = \frac{2464}{3.9375} = 625.8W_p \quad (15)$$

$$P_{FV_{diseño}} = 625.5 \cdot 1.10 = 688W_p \quad (16)$$

Se selecciona el mismo panel JINKO SOLAR JKM400M-72HL4-V por criterios de homologación, disponibilidad en Colombia y curva I-V favorable a altas temperaturas (tecnología PERC). El número de módulos requeridos:

$$N_{paneles} = \frac{688}{400} = 1.72 \rightarrow 2 \text{ paneles en paralelo} \quad (17)$$

$$P_{inst} = 2 \cdot 400 = 800W_p \quad (18)$$

$$E_{gen_{FV}} = 800 \cdot 4.5 \cdot 0.875 = 3150 \text{Wh/día} > 2464 \text{Wh/día} \quad (19)$$

Los 2 paneles se conectan en paralelo para mantener el voltaje de trabajo a 41.2 V (compatible con el inversor y el controlador MPPT) y duplicar la corriente de generación. La configuración en paralelo es conveniente dado que el voltaje del sistema se mantiene en el rango de 24–48 V DC del controlador MPPT.

5.6.4. Dimensionamiento del Banco de Baterías

5.6.5. Modelo 1 — Batería AGM (Off-Grid, Autonomía 3 Días)

La tecnología de batería seleccionada para el Modelo 1 es AGM (Absorbent Glass Mat), tipo VRLA sellada, idónea para instalaciones fotovoltaicas en exteriores sin mantenimiento de electrolito. La profundidad de descarga máxima recomendada para baterías AGM en ciclo solar es del 50% (DOD = 0.50), lo que prolonga la vida útil a más de 500 ciclos profundos (Heredia, 2016).

$$C_{bat} = \frac{E_{requerida} \cdot \text{Días}_{autonomía}}{V_{sistema} \cdot DOD} \quad (20)$$

$$C_{bat} = \frac{900\text{Wh/día} \cdot 3\text{días}}{24\text{V} \cdot 0.50} \quad (21)$$

$$C_{bat} = \frac{2700}{12} = 225\text{Ah @ 24 V} \quad (22)$$

Se selecciona la batería TROJAN T-105 PLUS de 6V / 225 Ah. Para alcanzar 24V del sistema se requieren 4 baterías en serie, una configuración estándar para bancos de almacenamiento en pequeña escala que garantiza estabilidad ante regímenes de descarga constante (Roldán Viloría, 2015).

Configuración: $4 \times \text{TROJAN T} - 105 \text{ PLUS (6 V, 225 Ah)}_{serie} \rightarrow 24 \text{ V/225 Ah}$

$$E_{banco} = 24\text{V} \cdot 225\text{Ah} = 54\text{Wh} \rightarrow E_{útil(DOD\ 50\%)} = 2700 \text{ Wh} = 3\text{días} \quad (24)$$

5.6.6. Modelo 2 — Batería LiFePO₄ (Híbrido, Autonomía 1 Día Solar)

Para el Modelo 2 se adopta tecnología de batería de litio ferrofosfato LiFePO₄, justificada por su mayor densidad energética (150–200 Wh/kg frente a 30–50 Wh/kg del AGM), mayor eficiencia coulombica (97% frente al 85% de las tecnologías de plomo-ácido), ciclo de vida superior (>3,000 ciclos a un DOD del 80%) y capacidad de descarga profunda sin daño mecánico o químico degradante (Linden & Reddy, 2011). En un sistema híbrido con respaldo de red, la batería solo debe cubrir el almacenamiento de energía solar para las horas de operación sin sol y actuar como buffer ante transitorios.

Se diseña para 1 día de autonomía solar

completa:

$$C_{bat} = \frac{E_{solar}}{V_{sistema} \cdot DOD} \quad (25)$$

$$C_{bat} = \frac{2464}{48V \cdot 0.80} = \frac{2464}{38.4} = 64.2Ah @ 48V \quad (26)$$

Se adopta un voltaje de sistema de 48 V para el Modelo 2, compatible con inversores de onda senoidal pura de mayor rendimiento. Se selecciona la batería PYLONTECH US3000C LiFePO₄ de 48V / 74 Ah, la cual integra un sistema de gestión de baterías (BMS) obligatorio para regular los parámetros operativos en entornos de alta temperatura (Reiner, 2021).

$$\text{Número de módulos: } 1 \text{ batería PYLONTECH US3000C (48V/74 Ah)} \quad (27)$$

$$E_{total} = 48V \cdot 74Ah = 3552Wh \rightarrow E_{útil(DOD 80\%)} = 2842Wh > 2464Wh \quad (28)$$

5.6.7. Dimensionamiento del Controlador de Carga

5.6.8. Modelo 1 — Controlador MPPT 30A / 24V

La corriente máxima de entrada al controlador de carga se calcula a partir de la corriente de cortocircuito del panel (I_{sc}) multiplicada por un factor de seguridad del 25% conforme a lo establecido por el NEC 690.8 y adoptado como práctica recomendada en sistemas fotovoltaicos bajo RETIE Colombia:

$$I_{controlador} = N_{paneles} \cdot I_{sc} \cdot 1.25 = 1 \cdot 10.18 A \cdot 1.25 = 12.73 A \quad (29)$$

Se selecciona un controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking) de 30 A como capacidad nominal, lo que ofrece un margen del 136% sobre la corriente calculada. La elección de MPPT frente a PWM se justifica por: (a) Mayor eficiencia de seguimiento (93–

98% vs 75–80% para PWM), especialmente relevante en condiciones de alta temperatura ambiente en Barrancabermeja donde la curva I-V del panel se degrada; (b) Compatibilidad con tensión de panel superior (41.2V V_{mpp}) al voltaje del banco de baterías (24V); (c) Capacidad de carga rápida del banco AGM.

Para el cumplimiento de estos requerimientos en el diseño autónomo, se seleccionó el controlador de carga EPEVER TRACER 3210AN (ver Anexo D). Este dispositivo opera con tecnología MPPT, cuenta con una capacidad nominal de corriente de 30 A y soporte para voltajes de sistema de 12 y 24 V. Adicionalmente, cuenta con un límite de tensión en circuito abierto $V_{oc} = 100 V$, lo que asegura que el componente opere dentro de los márgenes de seguridad eléctrica requeridos ante la entrada de tensión del arreglo fotovoltaico.

5.6.9. Modelo 2 — Controlador MPPT 40A / 48V

Para el Modelo 2 con 2 paneles en paralelo y sistema de 48 V:

$$I_{controlador} = N_{paneles} \cdot I_{sc} \cdot 1.25 = 1 \cdot 10.18A \cdot 1.25 = 12.73 A \quad (31)$$

Se selecciona un controlador MPPT de 40 A / 48 V, que cubre el requerimiento con un factor de seguridad de 1.57. Este equipo debe ser compatible con la batería LiFePO₄ (PYLONTECH), por lo que se requiere configuración de perfil de carga específico para litio.

Para el cumplimiento de estos requerimientos, se seleccionó el controlador de carga EPEVER TRACER 4210AN (ver Anexo D). Este dispositivo opera con tecnología MPPT, cuenta con una capacidad nominal de corriente de 40 A y compatibilidad nativa con sistemas de 12, 24, 36 y 48 V. Asimismo, posee un límite de tensión en circuito abierto $V_{oc} = 150 V$, lo que garantiza un margen de seguridad dieléctrica óptimo frente a la configuración de los módulos fotovoltaicos

5.7. Dimensionamiento del Inversor — Modelo 2 (Exclusivo)

$$I_{controlador} = N_{paneles} \cdot I_{sc} \cdot 1.25 = 2 \cdot 10.18 \cdot 1.25 = 25.45 A \quad (33)$$

La pantalla LED y sus equipos auxiliares operan a tensión de corriente alterna (AC), por lo que se requiere un inversor que convierta la tensión de corriente continua (DC) del banco de baterías (48 V) en tensión AC senoidal. Se selecciona un inversor de onda senoidal pura, dado que la pantalla LED modular es una carga electrónica sensible que requiere una señal de alimentación limpia; los inversores de onda modificada inducen distorsión armónica severa que degrada los convertidores AC-DC internos de la pantalla y generan interferencia electromagnética (Enríquez Harper, 2014).

Cálculo de Potencia del Inversor:

$$P_{carga\ total} = 385\ W \text{ (pantalla LED + controlador + ventiladores)} \quad (34)$$

De acuerdo con las recomendaciones de diseño eléctrico residencial e industrial, se aplica un factor de seguridad del 25% para proteger al equipo contra sobrecargas continuas (National Fire Protection Association [NFPA], 2017).

$$\text{Factor de seguridad inversor} = 1.25 \text{ (NEC 690/práctica estándar)} \quad (35)$$

$$P_{inversor} = 385 \cdot 1.25 = 481\ W \rightarrow \text{Seleccionar } 500\ W \text{ nominal} \quad (36)$$

El cálculo matemático sugiere una capacidad mínima de 481.25 W. Adicionalmente, se debe considerar la corriente de inserción o arranque de los ventiladores del gabinete. Por tanto, con el fin de garantizar la estabilidad de la tensión de salida bajo variaciones transitorias de carga y evitar el acoplamiento de armónicos, se sobredimensiona el sistema adoptando una capacidad comercial superior (Roldán Viloría, 2015).

Para el cumplimiento de estos requerimientos, se seleccionó el inversor VICTRON ENERGY Phoenix 48/1200 (ver Anexo E). Este equipo opera con una entrada de 48 V DC, entrega una salida de 230 V AC de onda senoidal pura y cuenta con una potencia aparente nominal de 1200 VA, proporcionando un margen de seguridad robusto frente a la demanda máxima calculada.

5.7.1. Sistema de Transferencia con Respaldo a Red

Para implementar el esquema híbrido solar y red eléctrica, se incorpora un interruptor de transferencia automática o ATS (Automatic Transfer Switch), el cual monitorea constantemente la tensión del banco de baterías y activa el respaldo de la red convencional cuando el estado de carga (State of Charge, SOC) desciende por debajo del 30%. El sistema de transferencia automática trabaja en conjunto con el inversor/cargador para garantizar la continuidad operativa ininterrumpida de la pantalla LED, siguiendo los lineamientos de automatización y selectividad exigidos por el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

La lógica de conmutación programada para el control del sistema se detalla en la Tabla 6. Cabe destacar que, durante el estado de conexión al respaldo, la red eléctrica convencional posee la capacidad de cargar simultáneamente el banco de acumuladores operando en modo cargador, asegurando la recuperación del sistema ante descargas prolongadas (Roldán Vilorio, 2015).

Tabla 6

Lógica ATS Modelo 2. Programada en Cerbo GX mediante VictronConnect App.

Condición SOC	Fuente activa	Estado ATS	Acción del sistema
SOC \geq 80%	Solar (FV)	Aislado de red	Pantalla LED alimentada 100% por FV+Batería
$50\% \leq$ SOC < 80%	Solar + Red (70/30)	Semi-conectado	FV carga batería + suple carga; red complementa
SOC < 30%	Red Eléctrica	Conectado red	Red asume 100% carga; FV carga batería
Fallo de red	Solar + Batería	Anti-islanding off	Sistema FV opera en isla — autonomía 4–6h

Para la ejecución física de este esquema, se seleccionó el centro de comunicación y monitoreo VICTRON ENERGY Cerbo GX junto con la pantalla Touch 50 (ver Anexo E). Este módulo electrónico integra interfaces de comunicación remota vía WiFi/LAN, algoritmos avanzados para la gestión del SOC y un canal de comunicación dedicado para el sistema de gestión de baterías (BMS) del acumulador PYLONTECH a través del protocolo industrial CAN-bus (Reiner, 2021).

5.7.2. Dimensionamiento del Cableado

El dimensionamiento de conductores se realiza bajo los siguientes criterios establecidos en el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Resolución RETIE vigente, Colombia) y la NTC 2050 (adaptación nacional del NEC 2017): (a) La caída de tensión máxima permitida en el tramo DC (panel \rightarrow controlador) y en el tramo DC (controlador \rightarrow batería) es del 1% para cada segmento, con un total DC \leq 3%; (b) En

el tramo AC (inversor → carga) la caída máxima es del 2%; (c) Los conductores deben ser de cobre, tipo THHN o THWN-2, certificados NTC/UL; (d) La corriente nominal del conductor debe ser superior a la corriente de diseño multiplicada por los factores de corrección por temperatura (35°C ambiente) y por agrupamiento.

- Modelo 1 — Tramo Panel → Controlador (DC 24V)

$$I_{diseño} = I_{sc} \cdot 1.25 \cdot N_{paneles} = 10.18 \cdot 1.25 \cdot 1 = 12.73 \text{ A} \quad (40)$$

Longitud estimada del tramo (panel en techo de valla → caja de control lateral): L = 5 m (tramo de ida), longitud total $L_{total} = 2 \times 5 = 10 \text{ m}$.

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot \Delta V} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 12.73}{56 \cdot 0.24V} = \frac{127.3}{13.44} = 9.47 \text{ mm}^2 \quad (41)$$

Donde $\sigma = 56 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ para cobre a 60 °C, y $\Delta V = 1\% \times 24V = 0.24V$. Se adopta conductor de 10 mm² AWG (calibre 8 AWG = 8.37 mm²) con corriente admisible de 50 A >> 12.73 A. Verificación de caída de tensión:

$$\Delta V = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot S} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 12.73}{56 \cdot 8.37} = \frac{127.3}{468.7} = 0.271 \text{ V} \quad (42)$$

$$\Delta V\% = \frac{0.271}{24} \cdot 100 = 1.13 \% \leq 3 \% \quad (43)$$

- Modelo 1 — Tramo Controlador → Batería (DC 24V)

I = 30 A (**corriente nominal controlador**) → **calibre mínimo: 10 AWG (5.26 mm²)**

Se adopta conductor 10 AWG THHN (corriente admisible 35A en conduit) con distancia ≤ 1 m entre controlador y batería:

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 1 \cdot 30}{56 \cdot 5.26} = \frac{60}{294.6} = 0.20V \rightarrow 0.85\% \quad (44)$$

- Modelo 1 — Tramo Controlador → Carga (DC 24V)

$$I_{\text{carga}} = \frac{P}{V} = \frac{60}{24} = 2.5A \rightarrow \text{Calibre 14 AWG (2.08 mm)}^2 \quad (45)$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 8 \cdot 2.5}{56 \cdot 2.08} = \frac{40}{116.5} = 0.343V \rightarrow 1.43\% \leq 3\% \quad (46)$$

- Modelo 2 — Tramo Panel → Controlador (DC 48V)

$$I = N \cdot I_{sc} \cdot 1.25 = 2 \cdot 10.18 \cdot 1.25 = 25.45A \quad (47)$$

$$S = \frac{2 \cdot 6 \cdot 25.45}{56 \cdot 0.48} = \frac{305.4}{26.88} = 11.36\text{mm}^2 \rightarrow \text{Adoptar } 16\text{mm}^2 \text{ (AWG 6)} \quad (48)$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 6 \cdot 25.45}{56 \cdot 13.3} = \frac{305.4}{744.8} = 0.41V \rightarrow 0.85\% \leq 1\% \quad (49)$$

- Modelo 2 — Tramo Inversor → Carga (AC 220V)

$$I_{AC} = \frac{P_{\text{carga}}}{V_{AC}} = \frac{385}{220} = 1.75A \rightarrow \text{Calibre 14 AWG} \quad (50)$$

$$\Delta V_{AC} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 1.75}{56 \cdot 2.08} = \frac{14}{116.5} = 0.12V \rightarrow 0.055\% \leq 2\% \quad (51)$$

Tabla 7

Resumen de calibres y caídas de tensión. Todos los tramos cumplen $\Delta V \leq 3\%$ (RETIE).

Tramo de cableado	Modelo	V (V)	I_diseño (A)	Long. (m)	Calibre AWG	$\Delta V\%$
Panel → Controlador	M1	24	12.73	5	8 THHN AWG	1.13%
Controlador → Batería	M1	24	30	1	10 THHN AWG	0.85%

Tramo de cableado	Modelo	V (V)	I_diseño (A)	Long. (m)	Calibre AWG	$\Delta V\%$
Controlador → Carga DC	M1	24	2.5	8	14 AWG THHN	1.43%
Panel → Controlador	M2	48	25.45	6	6 AWG THHN	0.85%
Controlador → Batería	M2	48	40	1	8 AWG THHN	0.48%
Inversor → Carga AC	M2	220	1.75	4	14 AWG THHN	0.06%

5.7.3. Protecciones Eléctricas

El diseño del esquema de protecciones cumple con las disposiciones del Artículo 15 (Sistemas de Puesta a Tierra) y del Artículo 30 (Protección de las personas y bienes) establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) vigente en el territorio nacional (Ministerio de Minas y Energía, 2013). Asimismo, se incorporan los requisitos técnicos de la norma técnica colombiana NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2020) en sus secciones de sistemas solares fotovoltaicos y sistemas de generación interconectada. Con el fin de mitigar riesgos por sobrecorrientes, sobretensiones transitorias y fallas de aislamiento, se configuran arreglos de protección independientes para los segmentos de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) de cada modelo.

5.7.3.1 Protecciones DC — Modelo 1

Las especificaciones de los componentes de corte y supresión seleccionados para salvaguardar el sistema autónomo se consolidan a continuación:

Tabla 8

Protecciones eléctricas DC Modelo 1.

Elemento	Descripción	Cantidad	Especificación	Norma
Fusible PV string	Protección panel FV	1	15A / 1000V DC	NTC 2050 Art.690
Breaker DC	Desconexión controlador	1	30A / 48V DC	IEC 60947-2
Fusible batería	Protección banco baterías	1	30A / 32V DC	NTC 2050 Art.690
DPS Tipo 2 DC	Descargador sobretensión PV	1	40kA / 1000V DC	IEC 61643-31
Diodo bypass	Evita corriente inversa	1	15A / 1000V	NEC 690.35

5.7.3.2 Protecciones DC y AC — Modelo 2

Tabla 9

Protecciones eléctricas DC y AC Modelo 2.

Elemento	Descripción	Cantidad	Especificación	Norma
Fusible PV string	Protección panel FV (x2)	2	15A / 1000V DC	NTC 2050 Art.690
Breaker DC MPPT	Desconexión controlador	1	40A / 100V DC	IEC 60947-2
BMS LiFePO4	Protección interna batería	1	Integrado PYLONTECH	UL 1973
DPS Tipo 1+2 DC	Descargador PV	1	40kA / 1000V DC	IEC 61643-31
Breaker AC salida	Protección salida inversor	1	10A / 230V AC	IEC 60898
DPS Tipo 2 AC	Protección red y cargas AC	1	20kA / 275V AC	IEC 61643-11
GFCI/AFCI	Protección diferencial AC	1	30mA / 230V	NEC 690.5

Elemento	Descripción	Cantidad	Especificación	Norma
Puesta a tierra (PAT)	Sistema de tierra física	1	$R \leq 10 \Omega$ (RETIE)	RETIE Art.15

5.7.3.3 Sistema de Puesta a Tierra

El diseño e instalación del sistema de puesta a tierra se ejecuta en estricto cumplimiento con las disposiciones técnicas del Artículo 15 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) (Ministerio de Minas y Energía, 2013) y los lineamientos de seguridad contra fallas de aislamiento de la norma NTC 2050 en su Artículo 250 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2020). Para la dispersión de corrientes de falla y descargas atmosféricas en el terreno de Barrancabermeja, se dispone la instalación de un electrodo de puesta a tierra tipo varilla de acero revestida en cobre (*Copperweld*) de especificación comercial de 5/8" x 2.4 m, la cual se entierra verticalmente en el suelo natural adyacente a la base estructural de la valla publicitaria.

La resistencia de dispersión del electrodo de tierra se calcula y valida bajo la siguiente restricción paramétrica impuesta por la normativa nacional para estaciones de baja tensión y estructuras expuestas:

$$R_{tierra} \leq 10 \Omega \quad (52)$$

De acuerdo con el criterio de equipotencialidad, todos los marcos metálicos de los módulos fotovoltaicos, los perfiles de soporte de la valla y los gabinetes que albergan los componentes eléctricos y electrónicos se interconectan sólidamente al electrodo central. Esta unión galvánica se realiza empleando un conductor de cobre desnudo de calibre #6 AWG (equivalente a una sección transversal de 13.3 mm², satisfaciendo la capacidad de corriente de cortocircuito prescrita por la norma de instalaciones eléctricas (ICONTEC, 2020). El acoplamiento mecánico y eléctrico de los conductores hacia la varilla se efectúa mediante conectores de compresión tipo C debidamente certificados bajo ensayos de corrosión y conductividad.

5.8. DISEÑO ESTRUCTURAL

5.8.1. Modelo 1 — Valla Iluminada Tradicional (4 m x 3 m)

5.8.1.1 Descripción y Dimensiones

La estructura soporte del Modelo 1 consiste en una valla publicitaria estática de formato estándar, provista de un panel de exhibición con dimensiones nominales de 4.00 m X 3.00 m (ancho X alto). Todo el conjunto se encuentra acoplado mecánicamente sobre un poste metálico central de perfil tubular circular. El armazón estructural se dimensiona analíticamente para soportar la combinación de cargas críticas concurrentes: el peso propio de los elementos de acero, las fuerzas de arrastre e inducción por presión de viento calculadas bajo los lineamientos del Título B de la norma NSR-10 asumiendo una velocidad básica de viento para la zona geográfica de Barrancabermeja de aproximadamente 90 km/h, junto con el peso muerto adicional de los reflectores LED y sus respectivos accesorios de sujeción (AIS, 2010).

Tabla 10

Componentes estructurales Modelo 1.

Componente Estructural	Especificación
Poste principal	Perfil tubular circular Ø 10" x 6 mm (ASTM A500 Gr.B)
Altura del poste	10 m sobre nivel de piso
Marco de la valla	Perfil cuadrado 80x80x4 mm (ASTM A500)
Arriostres diagonales	Ángulo L 50x50x4 mm (ASTM A36)
Soporte panel FV	Perfil C 60x40x3 mm, inclinación 10°

Componente Estructural	Especificación
Tornillería	Acero al carbono de alta resistencia ISO 898-1 Grado 8.8 (Galvanizado en caliente) o Acero estructural de alta resistencia ASTM A325.
Acabado superficial	Pintura anticorrosiva epóxica + esmalte poliuretano
Placa de anclaje base	500x500x20 mm, 4 pernos de alta resistencia M24 en concreto $f'c=21$ MPa.

5.8.1.2 Inclinación del Panel Solar y Carga de Viento

El módulo fotovoltaico se integra sobre la corona de la estructura mediante un soporte metálico que fija una inclinación de 10° respecto al plano horizontal, orientado hacia el norte geográfico (azimut de 0°) con el fin de optimizar el rendimiento energético anual en una latitud cercana al ecuador. Esta inclinación se selecciona considerando que el ángulo óptimo teórico se aproxima a la latitud del sitio (aproximadamente 7° N). No obstante, se adopta un ángulo de 10° por facilidades de estandarización constructiva y para favorecer el proceso cinético de autolimpieza de la superficie del panel por medio de la escorrentía de las lluvias frecuentes que caracterizan el clima local de Barrancabermeja.

5.8.2. Modelo 2 — Valla con Pantalla LED Modular

La estructura del Modelo 2 está diseñada para alojar una pantalla LED modular de módulos de $768 \text{ mm} \times 768 \text{ mm}$, formando una pantalla compuesta de 4 módulos (2×2) que da como resultado un área útil de $1,536 \text{ mm} \times 1,536 \text{ mm} \approx 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$.

Tabla 11

Componentes estructurales Modelo 2.

Componente Estructural	Especificación
Poste principal	Perfil tubular cuadrado 150x150x6 mm (ASTM A500)
Altura total estructura	4.5 m (poste + base)
Marco soporte pantalla LED	Perfil aluminio anodizado 40x40x3 mm (sistema modular)
Gabinete eléctrico	NEMA 4X (acero inoxidable IP66), 600x600x250 mm
Soporte paneles FV (x2)	Perfil C aluminio 80x40x3 mm, inclinación 10°
Canaleta porta-cable	PVC rígido reforzado UV, 60x40 mm
Tratamiento anticorrosivo	Galvanizado en caliente + pintura poliuretano bicomponente

5.9. MODELADO DEL SISTEMA

El desarrollo geométrico y modelado tridimensional de ambos prototipos se ejecutó mediante la plataforma de diseño asistido por computador Blender (v. 4.0). Aunque esta herramienta se fundamenta en el modelado poligonal, la construcción de las piezas y ensambles se rigió estrictamente bajo las directrices de representación técnica de la norma ISO 128 para la disposición de vistas, proyecciones y cortes, así como en los lineamientos de la norma ANSI/ASME Y14.5 para el control de tolerancias dimensionales y geométricas (GD&T) aplicadas a los componentes de soporte (Chevalier, 2016)..

5.9.1. Modelado Modelo 1 — Valla Iluminada (Blender)

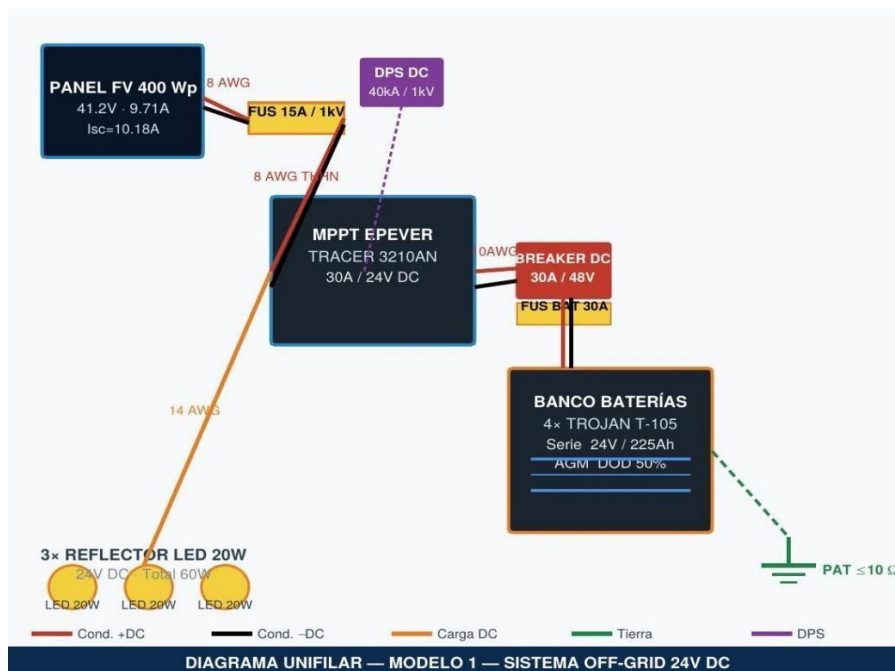
El modelo tridimensional del Modelo 1 se estructuró a partir de una arquitectura de bloques que comprende cinco ensambles y subensambles principales:

- Subensamble 01 – Estructura principal: Compuesto por el poste tubular de sección circular, la placa de base de anclaje, los rigidizadores triangulares de refuerzo y los pernos de cimentación. Cada elemento fue proyectado tomando como referencia las dimensiones reales de perfiles estructurales normalizados bajo la especificación ASTM A500.
- Subensamble 02 – Marco de la valla: Configurado por un perfil cuadrado de 80 X 80 mm con uniones soldadas a inglete en las esquinas. Aloja el panel publicitario para lona tensionada (representada geométricamente como una superficie plana) con un área nominal de 4,000 X 3,000 mm.
- Subensamble 03 – Sistema fotovoltaico: Módulo solar JINKO de 400 W diseñado con base en las cotas de la ficha técnica del fabricante (1,956 X 992 mm). El subensamble integra el soporte metálico inclinado con un ángulo de azimut fijo de 10° fabricado en perfil tipo C.
- Subensamble 04 – Sistema eléctrico: Gabinete de control de acero inoxidable con grado de protección IP65 (dimensiones de 300 X 200 X 150 mm). Este bloque simula la distribución espacial interna del controlador de carga MPPT, los interruptores termomagnéticos (breakers) y las borneras de conexión, incluyendo el modelado de la canaleta protectora de conductores desde el panel hasta la caja.

- Subensamble 05 – Iluminación: Tres reflectores LED de 20 W posicionados con sus respectivos *brackets* de montaje en la sección inferior del marco publicitario, con un rango de apuntamiento ajustable de $\pm 30^\circ$ en el eje horizontal y $\pm 20^\circ$ en el eje vertical.

El ensamble general se consolidó mediante restricciones de posicionamiento geométrico dentro del entorno virtual, lo que permite realizar modificaciones dinámicas en la inclinación del panel solar, la orientación de las luminarias y la altura del poste central sin alterar la coherencia de las cotas. Los archivos maestros de fabricación y manufactura fueron exportados en formatos estandarizados .blend y .fbx, asegurando la compatibilidad geométrica para la extracción de vistas ortogonales (frontal, lateral y superior).

Figura 2. DIAGRAMA UNIFILAR – MODELO 1 – SISTEMA OFF – GRID 24V DC



ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

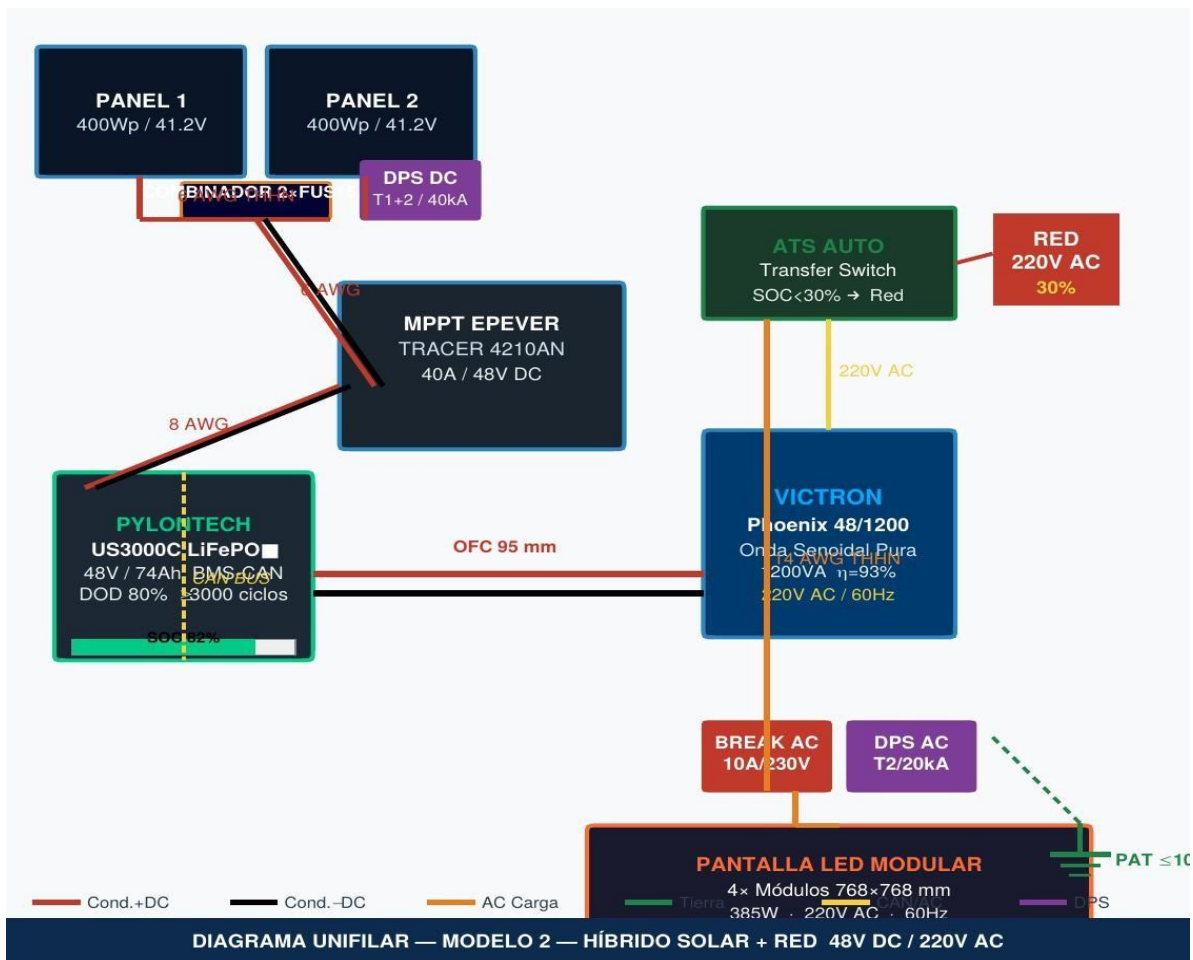
5.9.2. Modelado Modelo 2 — Valla con Pantalla LED (Blender)

El Modelo 2 se desarrolló de forma complementaria en la plataforma Blender (v. 4.0), aprovechando su capacidad para la gestión de mallas complejas y la generación de renderizados fotorrealistas de alta fidelidad para la validación visual y presentación comercial del proyecto. La estructuración del prototipo digital se dividió en cinco bloques constructivos detallados a continuación:

- Subensamble 01 – Estructura poste-base: Comprende un poste de sección cuadrada de 150 X 150 X 6 mm, rígidamente acoplado a una placa de anclaje de 450 X 450 X 20 mm mediante seis pernos de expansión de especificación M24. La geometría de este bloque se exportó de forma analítica para el desarrollo del análisis de elementos finitos (FEA), validando la resistencia mecánica del perfil ante las cargas de viento características de la zona geográfica de Barrancabermeja (Budynas & Nisbett, 2012).
- Subensamble 02 – Marco de la pantalla LED: Consiste en un sistema perimetral de perfiles de aluminio anodizado con canales de ranura en T (*T-slot*) para el anclaje de precisión de los módulos de video. El diseño geométrico contempla las holguras necesarias y compuertas de acceso trasero para las maniobras de mantenimiento técnico.

- Subensamble 03 – Módulos LED: Integración de cuatro unidades modulares de la marca SRYLED con dimensiones nominales de 768 X 768 mm cada una. Los bloques fueron modelados respetando las cotas del fabricante, incluyendo los puertos de inserción modular y los prensaestopas para los conectores con grado de protección IP65 en la cara posterior.
- Subensamble 04 – Gabinete eléctrico NEMA 4X: Modelado del gabinete de distribución con índice de protección ambiental hermético. El diseño interior define el *layout* o distribución espacial real para el montaje del inversor VICTRON, el controlador de carga MPPT EPEVER, el banco de baterías de litio PYLONTECH, las borneras de acoplamiento y el tablero de breakers de protección AC/DC.
- Subensamble 05 – Sistema fotovoltaico dual: Configuración de dos paneles JINKO de 400 W dispuestos en paralelo, los cuales incorporan un mecanismo de soporte que fija la inclinación a un ángulo optimizado de 10°. Incluye el tendido tridimensional de las canalizaciones de aluminio para la conducción de los cables de potencia hacia el gabinete principal.

**Figura 3. DIAGRAMA UNIFILAR – MODELO 2 -HÍBRIDO SOLAR + RED 48V
DC/220V AC**



5.10. GUÍA DE ENSAMBLE E INSTALACIÓN

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

La guía de ensamble que se presenta a continuación aplica de forma general a ambos modelos, con indicaciones específicas donde los procedimientos difieren. El proceso de instalación se realiza en siete etapas secuenciales que garantizan la seguridad del personal y la integridad de los componentes electrónicos durante el montaje.

5.10.1.1 ETAPA 1 — Preparación del Sitio y Obra Civil

Verificar la viabilidad del sitio: área despejada, resistencia del suelo, distancias de seguridad a líneas eléctricas (mínimo 3 m según RETIE Art.13) y accesibilidad para mantenimiento.

Excavación de la cimentación: zapata de 1.20×1.20×1.20 m para Modelo 1; 1.40×1.40×1.30 m para Modelo 2. Concreto $f'c = 21$ MPa (3,000 PSI).

Instalación de los pernos de anclaje de alta resistencia en la cimentación fresca, verificando alineación vertical con nivel de burbuja. Dejar sobresalir 150 mm sobre la superficie.

Instalación del electrodo de puesta a tierra (varilla Copperweld 5/8"×2.4 m) a distancia ≥ 1 m del poste, enterrado verticalmente. Medir resistencia con telurómetro ($R \leq 10 \Omega$).

Curado del concreto: 28 días para resistencia de diseño; se permite continuar el ensamble a partir del día 7 (70% de resistencia).

5.10.1.2 ETAPA 2 — Montaje Estructural

Izar el poste principal de $\varnothing 10$ " con grúa (según altura y peso) y posicionarlo sobre la placa de anclaje. Utilizar nivel de burbuja y plomada para verificar verticalidad en dos planos perpendiculares.

Atornillar tuercas de anclaje con torquímetro al torque especificado: M24 \rightarrow 500 N·m (ASTM A325 / Grado 8.8).

Soldar el marco de la valla al poste según planos de taller (soldadura con electrodo E7018 de 1/8", precalentamiento si el espesor supera los 19 mm).

Instalar arriostres diagonales y rigidizadores según planos. Verificar dimensiones finales con cinta métrica y nivel óptico.

Aplicar pintura anticorrosiva en las zonas de soldadura y retoque de acabado con esmalte poliuretano bicomponente de color especificado.

5.10.1.3 ETAPA 3 — Instalación del Panel Solar

Fijar el soporte inclinado del panel solar a la estructura según planos, verificando la inclinación de 10° con transportador digital o nivel de inclinación.

Levantar el panel solar (22 kg por panel) con protección de las celdas fotovoltaicas (no pisar, no flexionar el módulo).

Verificar la orientación: panel apuntando al norte geográfico ($\pm 5^\circ$ de tolerancia). Usar brújula y corregir por declinación magnética local ($\approx -3^\circ$ en Barrancabermeja).

Tender los conductores del panel (8 AWG THHN) por la canaleta hasta la caja de control. Los conductores PV deben ser doble-aislados con conector tipo MC4 certificado.

IMPORTANTE: Cubrir las celdas fotovoltaicas con material opaco (cartón, tela oscura) durante toda la instalación eléctrica para evitar tensión en los terminales desconectados.

5.10.1.4 ETAPA 4 — Instalación del Banco de Baterías

Instalar la bandeja o soporte de baterías dentro del gabinete en la posición más baja posible (reduce el centro de gravedad del gabinete). Ventilación del compartimento: rejilla de 100 cm² mínimo.

Modelo 1: Conectar las 4 baterías TROJAN T-105 en serie con cable 4 AWG y terminales de compresión. Verificar polaridad con multímetro antes de conectar (+): rojo = positivo, negro = negativo. Tensión banco: 24V \pm 0.5V.

Modelo 2: Instalar la batería PYLONTECH US3000C siguiendo el manual de instalación del fabricante. Conectar el cable BMS (CAN BUS) al puerto correspondiente del inversor VICTRON y al controlador MPPT.

Proteger los terminales con capuchones de goma aislante. No conectar el fusible de batería hasta la etapa de pruebas.

5.10.1.5 ETAPA 5 — Instalación de Protecciones y Cableado

Instalar el tablero de distribución DC en el gabinete: breaker DC de entrada (FV → controlador), porta-fusibles de batería, y breaker de salida a carga.

Modelo 2 adicional: Instalar breaker AC de salida del inversor, DPS AC tipo 2, y GFCI/AFCI.

Tender todos los conductores por las canaletas designadas, identificando cada conductor con anillos de etiquetado según el diagrama. Código de colores RETIE: rojo = positivo DC, negro = negativo DC, verde/amarillo = tierra.

Instalar el DPS (descargador de sobretensión) tipo 2 en el lado DC del panel fotovoltaico, conectando entre cada conductor y tierra.

Conectar el conductor de tierra (#6 AWG Cu desnudo) desde la barra de tierra del gabinete hasta el electrodo de puesta a tierra enterrado.

5.10.1.6 ETAPA 6 — Conexión del Controlador MPPT e Inversor

Conectar los conductores del panel fotovoltaico a las terminales PV+ y PV– del controlador MPPT EPEVER. VERIFICAR que el breaker DC FV esté abierto (OFF) durante la conexión.

Conectar las terminales BATT+ y BATT– del controlador a las terminales del banco de baterías (sin fusible de batería instalado aún).

Conectar la carga DC (reflectores LED en Modelo 1) a las terminales LOAD+ y LOAD- del controlador.

Modelo 2: Conectar el inversor VICTRON a las terminales del banco de baterías con el cable de potencia suministrado (cable OFC 95 mm²). Conectar la salida AC del inversor al tablero AC mediante conductor THHN 14 AWG.

Instalar el fusible de batería (última conexión DC antes de energizar).

5.10.1.7 ETAPA 7 — Pruebas Eléctricas y Validación Operativa

Con el sistema DC energizado (quitar cubierta opaca del panel), verificar con multímetro: tensión panel FV en terminales controlador ($V_{mpp} \approx 41V$), tensión banco baterías (24V M1 / 48V M2), corriente de carga (amperímetro pinza).

Verificar en display del controlador EPEVER: modo de operación MPPT activo, potencia de entrada FV, corriente de carga, SOC del banco de baterías.

Modelo 1: Activar circuito de carga (reflectores LED). Verificar encendido correcto y medir corriente de consumo (esperado $\approx 2.5A @ 24V$). Verificar ausencia de parpadeo.

Modelo 2: Iniciar el inversor VICTRON y verificar en display: tensión salida AC 220V $\pm 5\%$, frecuencia 60 Hz ± 1 Hz, THD $< 3\%$. Energizar la pantalla LED y verificar imagen de prueba.

Medición de puesta a tierra con telurómetro: $R \leq 10 \Omega$. Registrar valor medido en el acta de puesta en servicio.

Prueba de ATS (solo Modelo 2): Simular descarga de batería y verificar que la transferencia automática a red ocurre correctamente. Tiempo máximo de transferencia ≤ 20 ms.

Elaborar el Acta de Puesta en Servicio con todos los valores medidos, firma del instalador certificado RETIE y registro fotográfico de la instalación.

5.11. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO

5.11.1. Presupuesto Detallado — Modelo 1 (Off-Grid)

Tabla 12

Presupuesto detallado Modelo 1. Valores en pesos colombianos (COP).

Ítem / Descripción	Cant.	V. Unitario (COP)	V. Total (COP)	Referencia
GENERACIÓN FOTOVOLTAICA				
Panel JINKO JKM400M-72HL4-V 400W monocristalino	1	\$ 650,000	\$ 650,000	Auto Solar
Controlador EPEVER TRACER 3210AN MPPT 30A	1	\$ 420,000	\$ 420,000	EPEVER Amazon.com /
ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO				
Batería TROJAN T-105 PLUS AGM 6V/225Ah	4	\$ 480,000	\$ 1,920,000	Trojan Battery Co.
ESTRUCTURA METÁLICA				
Poste tubular circular Ø6" + placa anclaje + cimentación	1	\$ 850,000	\$ 850,000	Metalmecánica local
Marco valla 4x3 m (perfil cuadrado 80x80 mm)	1	\$ 620,000	\$ 620,000	Metalmecánica local
Soporte inclinado panel FV (perfil C aluminio)	1	\$ 180,000	\$ 180,000	Ferreterías
Gabinete eléctrico acero IP65 300x200x150 mm	1	\$ 280,000	\$ 280,000	Maelectricos
ILUMINACIÓN				
Reflector LED 20W IP65 (exterior)	3	\$ 85,000	\$ 255,000	Homecenter

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Ítem / Descripción	Cant.	V. Unitario (COP)	V. (COP)	Total	Referencia
CABLEADO Y PROTECCIONES					
Cable THHN 8 AWG rojo/negro (x10 m)	1	\$ 95,000	\$ 95,000		Inter electrica
Cable THHN 10 AWG / 14 AWG (varios tramos)	1	\$ 65,000	\$ 65,000		Inter electrica
Fusible PV 15A/1000V DC + portafusible	2	\$ 35,000	\$ 70,000		AutoSolar
Breaker DC 30A/48V	1	\$ 95,000	\$ 95,000		AutoSolar
DPS Tipo 2 DC 40kA/1000V	1	\$ 185,000	\$ 185,000		HOMECENTER
Varilla PAT Copperweld 5/8"x2.4m + conector	1	\$ 75,000	\$ 75,000		HOMECENTER
Conectores MC4 (pares)	4	\$ 18,000	\$ 72,000		InterElectrica
Canaleta PVC 60x40 mm (x8 m) + accesorios	1	\$ 55,000	\$ 55,000		Ferreteria Local
MANO DE OBRA E INSTALACIÓN					
Mano de obra instalación eléctrica (electricista certificado RETIE)	1	\$ 400,000	\$ 400,000		Contratista certificado
Mano de obra estructura metálica (soldador calificado)	1	\$ 350,000	\$ 350,000		Metalmecánica local
Transporte y logística	1	\$ 120,000	\$ 120,000		-
Ingeniería, diseño y supervisión RETIE	1	\$ 500,000	\$ 500,000		Ing. Electricista
TOTAL MODELO 1 (sin IVA)			\$ 6,457,000		
TOTAL MODELO 1 (con IVA 19%)			\$ 7,683,830		

5.11.2. Presupuesto Detallado — Modelo 2 (Híbrido)

Tabla 13

Presupuesto detallado Modelo 2. Valores en COP

Ítem / Descripción	Cant.	V. Unitario (COP)	V. Total (COP)	Referencia
PANTALLA LED MODULAR				
Módulo LED 768x768 mm (SRYLED o equiv.) outdoor	4	\$ 1,200,000	\$ 4,800,000	SRYLED / Leyard
Controlador de tarjeta pantalla LED (receiving card)	1	\$ 350,000	\$ 350,000	VISUAL LED
GENERACIÓN FOTOVOLTAICA				
Panel JINKO JKM400M-72HL4-V 400W monocristalino	2	\$ 650,000	\$ 1,300,000	EPEVER / Amazon.com
Controlador EPEVER TRACER 4210AN MPPT 40A 48V	1	\$ 680,000	\$ 680,000	MercadoLibre
ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO				
Batería PYLONTECH US3000C LiFePO ₄ 48V/74Ah	1	\$ 3,800,000	\$ 3,800,000	PYLONTECH / distribuidores
INVERSOR Y SISTEMA HÍBRIDO				
Inversor VICTRON Phoenix 48/1200 onda senoidal pura	1	\$ 1,850,000	\$ 1,850,000	Auto Solar
Módulo control Cerbo GX + pantalla Touch 70	1	\$ 750,000	\$ 750,000	Auto Solar
ATS (transferencia automática a red) 16A	1	\$ 280,000	\$ 280,000	EATON
ESTRUCTURA METÁLICA				
Poste cuadrado 150x150x6 mm + base + cimentación	1	\$ 1,100,000	\$ 1,100,000	Metalmecánica
Marco aluminio soporte pantalla LED (sistema modular)	1	\$ 680,000	\$ 680,000	Perfilerías aluminio
Gabinete NEMA 4X IP66 600x600x250 mm	1	\$ 620,000	\$ 620,000	BOMBEO
Soporte paneles FV aluminio (x2)	1	\$ 260,000	\$ 260,000	Ferreterías
CABLEADO Y PROTECCIONES				
Cable THHN 6 AWG (FV) + 8 AWG (bat) + 14 AWG (AC)	1	\$ 220,000	\$ 220,000	Ferreteria Local

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Ítem / Descripción	Cant.	V. Unitario (COP)	V. Total (COP)	Referencia
Cable OFC 95 mm ² batería-inversor (x1.5 m)	1	\$ 180,000	\$ 180,000	Auto Solar
Fusibles PV 15A/1000V DC (x2) + Breaker DC 40A	1	\$ 220,000	\$ 220,000	Ineldec
DPS Tipo 1+2 DC + DPS Tipo 2 AC	1	\$ 380,000	\$ 380,000	Solphower
GFCI/AFCI 30mA, Breaker AC 10A	1	\$ 145,000	\$ 145,000	Schneider
PAT: varilla + conductor Cu #6 AWG (x5 m)	1	\$ 95,000	\$ 95,000	HOMECENTER
Conectores MC4 (pares) + canaleta 60x40 mm	1	\$ 120,000	\$ 120,000	InterElectricas
MANO DE OBRA E INSTALACIÓN				
Mano de obra instalación eléctrica (electricista RETIE)	1	\$ 700,000	\$ 700,000	Contratista
Mano de obra estructural (soldador + montajista)	1	\$ 550,000	\$ 550,000	Metalmecánica
Transporte y logística	1	\$ 180,000	\$ 180,000	-
Ingeniería, diseño y supervisión RETIE	1	\$ 800,000	\$ 800,000	Ing. Electricista
TOTAL MODELO 2 (sin IVA)			\$ 20,060,000	
TOTAL MODELO 2 (con IVA 19%)			\$ 23,871,400	

5.11.3. Análisis Comparativo y Costo-Beneficio

Tabla 14

Análisis comparativo Modelo 1 vs Modelo 2.

Criterio	Modelo 1 (Off-Grid)	Modelo 2 (Híbrido)
Costo total con IVA	\$ 7,683,830	\$ 23,871,400
Costo energía/año (red evitada)	\$ 0 (sin red)	\$ 230,400/año (ahorro 70%)

Criterio	Modelo 1 (Off-Grid)	Modelo 2 (Híbrido)
Consumo red/año si fuera 100% convencional	\$ 63,072/año	\$ 329,142/año
Ahorro anual estimado vs red 100%	\$ 63,072	\$ 230,400
Período de retorno simple (payback)	~ 8.5 años (vs red)	~ 7.3 años (costo solar)
Vida útil sistema	20 años (paneles)	20 años (paneles) / 10 años (bat LiFePO ₄)
Autonomía sin red	3 días	1 día (respaldo garantizado)
Continuidad operativa	Alta (depende sol)	Muy alta (red + solar)
Mantenimiento baterías	Cada 5-7 años (AGM)	> 10 años (LiFePO ₄)
Impacto ambiental	Cero emisiones	CO ₂ evitado: ~230 kg/año

5.12. CUMPLIMIENTO RETIE — REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), establecido mediante la Resolución 40225 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía y sus disposiciones vigentes, dicta los requisitos de seguridad técnica y operacional que deben cumplir obligatoriamente todas las instalaciones eléctricas en la República de Colombia, abarcando los sistemas de generación fotovoltaica tanto autónomos como híbridos o interconectados. Las secciones subsiguientes describen detalladamente las estrategias de diseño implementadas para garantizar el cumplimiento estricto de los artículos relevantes del reglamento en ambos prototipos de vallas fotovoltaicas.

5.12.1. Puesta a Tierra — RETIE Artículo 15

Ambos modelos de valla publicitaria incorporan un sistema de puesta a tierra (SPT) unificado, diseñado bajo los parámetros de seguridad contra tensiones de paso y contacto definidos por el Artículo 15 del reglamento vigente y la sección 250 de la norma técnica colombiana NTC 2050 (ICONTEC, 2020), estructurándose mediante las siguientes especificaciones:

- Electrodo de tierra: Se dispone una varilla bimetálica de acero revestida en cobre (*Copperweld*) de especificación comercial de 5/8" x 2.4 m. La misma se entierra de forma vertical en el suelo natural a una profundidad mínima de 2.4 m respecto al nivel del suelo terminado.
- Resistencia de tierra máxima: El arreglo geométrico se dimensiona para garantizar una resistencia de dispersión óhmica de $R_{\text{tierra}} \leq 10\Omega$. Este valor límite debe ser validado en campo mediante el método de caída de potencial empleando un telurómetro digital debidamente calibrado y certificado.
- Conductor del electrodo: Para la conexión principal se utiliza cable de cobre desnudo de calibre #6 AWG (sección transversal de 13.3 mm² clase B, el cual se tiende de forma continua dentro de una zanja técnica hasta alcanzar la barra de tierra dispuesta en el gabinete eléctrico.
- Conexión equipotencial: Todos los elementos metálicos expuestos de la valla (poste estructural, marcos de soporte de los módulos solares, perfiles del marco

publicitario y chasis de los gabinetes) se interconectan al sistema mediante un conductor aislado de color verde o verde/amarillo de calibre mínimo #12 AWG.

- Conectores de tierra: Los acoplamientos mecánicos y mecánicos-eléctricos bajo el suelo se ejecutan utilizando conectores de compresión irreversible tipo C o mediante soldadura exotérmica de alto punto de fusión, prohibiendo explícitamente el uso de tornillos de presión simples por riesgo de aflojamiento galvánico.

5.12.2. Señalización y Demarcación — RETIE Artículo 13

Dando cumplimiento a los requerimientos de prevención establecidos en el Artículo 13 del RETIE para mitigar riesgos por contacto directo o maniobras erróneas por parte de personal no calificado, se implementan las siguientes medidas de control visual:

- Rotulación de alta tensión: Se fija una placa de advertencia con la leyenda "PELIGRO: ALTA TENSIÓN" en la cara exterior de la puerta del gabinete eléctrico, empleando el pictograma estandarizado ISO 7010-W012.
- Restricción de operación: El tablero de distribución interna cuenta con una señalización permanente con la inscripción "NO OPERAR SIN AUTORIZACIÓN", limitando el acceso exclusivamente a personal técnico calificado.
- Identificación de conductores: Todos los cables de potencia se identifican en sus extremos mediante anillos numerados y respetando estrictamente el código de

colores exigido por el reglamento para sistemas de corriente continua y alterna: rojo para el polo positivo (+DC), negro para el polo negativo (-DC), verde o verde/amarillo para la tierra de protección, blanco para la fase AC y gris para el conductor de neutro AC.

- Placa de características FV: Se instala una placa fenólica de identificación en el arreglo fotovoltaico que detalla los parámetros de diseño del sistema, incluyendo la potencia nominal, tensión máxima del circuito, corriente máxima de operación y los datos de contacto de los ingenieros diseñadores.
- Distancias mínimas de seguridad: Se verifica en el levantamiento topográfico de sitio que la estructura de la valla mantiene una distancia radial libre de seguridad de $\geq 3.0\text{m}$ respecto a las líneas de media tensión de la red de distribución local, eliminando riesgos de inducción o arcos eléctricos accidentales.

5.12.3. Protección DC — RETIE / NTC 2050 Artículo 690

La Sección 690 de la norma NTC 2050 (ICONTEC, 2020) establece los requisitos obligatorios de protección, dimensionamiento y aislamiento para los conductores y equipos ubicados en el segmento de corriente continua (DC) de los sistemas fotovoltaicos. El diseño desarrollado cumple con las siguientes directrices:

- Fusibles de protección de string: Se disponen en la caja de combinación (*combiner box*) y están dimensionados para soportar al menos el 125% de la corriente de

cortocircuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico. Esto equivale a una capacidad de $\geq 12.7A$ para el Modelo 1 y de $\geq 25.5A$ para el Modelo 2.

- Medios de desconexión del sistema FV: Se integra un interruptor termomagnético (breaker) de tipo DC con capacidad de ruptura y extinción de arco en corriente continua, instalado en una posición de fácil acceso para maniobras de mantenimiento conforme a la sección NTC 2050 Art. 690.17.
- Conductores de entrada fotovoltaica: Se seleccionaron cables con doble aislamiento del tipo PV (*sunlight-resistant*, calificados para 1000 V DC) y acoplamiento rápidos mediante conectores tipo MC4. Estos conductores se canalizan de manera protegida mediante tuberías tipo *conduit* o canaletas metálicas desde el arreglo de paneles hasta el armario de control.
- Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS): Se implementa un supresor de transitorios Tipo 2 DC bajo el estándar IEC 61643-31, interconectado entre los polos positivo (+) y negativo (-) respecto a la barra de tierra, con el fin de mitigar sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas.
- Segregación de circuitos: Las canalizaciones y el cableado de corriente continua se mantienen físicamente separados de los circuitos de corriente alterna (AC) mediante una barrera física aislante o garantizando una distancia de aislamiento en el aire de $\geq 6mm$ para evitar acoplamiento inductivos.

5.12.4. Protecciones AC — RETIE / NTC 2050 (Solo Modelo 2)

Para la topología híbrida (Modelo 2), la incorporación de la etapa de inversión y la transferencia al respaldo de la red eléctrica comercial exige el diseño de protecciones en el lado de corriente alterna, bajo los lineamientos del RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y el Artículo 705 de la norma NTC 2050 para sistemas de generación interconectados:

- Breaker de salida AC del inversor: Interruptor termomagnético de 10 A / 230 V con curva de disparo tipo C, instalado directamente en el tablero de distribución AC para la protección de las cargas y el inversor contra sobrecorrientes.
- Supresión de transitorios AC: Se aloja un DPS Tipo 2 AC certificado bajo la norma IEC 61643-11 en el tablero principal, con el objetivo de salvaguardar los componentes electrónicos internos contra picos de tensión provenientes de la red de respaldo convencional.
- Interruptor diferencial (GFCI/AFCI): Protección diferencial con un umbral de disparo de 30 mA para la detección de corrientes de fuga a tierra, mitigando el riesgo de electrocución de operarios y previniendo la presencia de incendios por fallas de arco eléctrico en el circuito AC.
- Conmutación segura mediante ATS: El interruptor de transferencia automática (*Automatic Transfer Switch*) garantiza mediante un enclavamiento que el inversor y la red eléctrica jamás se acoplen en paralelo de forma descontrolada sobre la

carga, asegurando la función de *anti-islanding* prescrita en la sección NTC 2050 Art. 705.40.

- Canalizaciones interiores: Todos los conductores destinados a la etapa AC corresponden a la especificación técnica THHN calibrado, alojados de forma ordenada en tuberías de aislamiento metálico rígido dentro del compartimento del gabinete.

5.12.5. Tablero Eléctrico y Montaje — RETIE Artículo 29

El gabinete de control y distribución se proyectó atendiendo las especificaciones de seguridad de productos e instalaciones contempladas en el reglamento técnico vigente (Ministerio de Minas y Energía, 2024), asegurando un montaje mecánico e industrial adecuado para las condiciones ambientales de Barrancabermeja:

- Índice de protección ambiental: El diseño define un grado de protección IP65 para el Modelo 1 y una envolvente hermética IP66 / NEMA 4X para el Modelo 2, garantizando la estanqueidad de los componentes electrónicos frente a la intemperie en zonas de clima tropical con humedades relativas sostenidas superiores al 80%.
- Materiales constructivos: El gabinete del Modelo 1 se compone de lámina de acero galvanizado tratada con recubrimiento de pintura epóxica de alta resistencia térmica; por su parte, el Modelo 2 implementa un armario de acero inoxidable grado 304 con sellos de silicona elástica en las juntas mecánicas.

- Disposición interna: El fondo del tablero incorpora un platina de montaje equipada con rieles tipo DIN para el anclaje simétrico de los interruptores, portafusibles, DPS y regletas de borneras de potencia.
- Área de operación segura: Se proyecta un espacio libre mínimo de trabajo al frente del tablero de 0.9 m sin obstáculos, cumpliendo con la distancia operativa exigida por la sección NTC 2050 Art. 110.26.
- Ergonomía de instalación: El armario se fija a una altura estandarizada comprendida entre 1.0 m y 1.8 m medidos desde el nivel del piso hasta la manija de operación más alta, garantizando un acceso rápido y seguro para el personal de mantenimiento sin requerir estructuras de elevación adicionales.

5.12.6. Conductores Certificados — RETIE Artículo 10

Conforme a lo dictado por el Artículo 10 del reglamento de instalaciones eléctricas, todos los conductores, cables y accesorios de conexión empleados en la construcción de los prototipos deben contar con un certificado de conformidad de producto expedido por un organismo acreditado ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC):

- Cableado interno del gabinete: Conductores tipo THHN/THWN-2 con certificación bajo la norma técnica NTC 3183, provistos por fabricantes homologados con el marcado normativo impreso de forma indeleble en la chaqueta exterior.

- Cableado del arreglo fotovoltaico (Exterior): Conductor de especificación solar PV calificado para 1000 V DC con doble aislamiento de polietileno reticulado (XLPE+PE), certificado bajo los estándares UL 4703 o IEC 62930, acoplado mediante conectores herméticos certificados por agencias de ensayo reconocidas.
- Acometida de potencia banco-inversor (Modelo 2): Conductor flexible de cobre libre de oxígeno (OFC) con una sección transversal de 95 mm², certificado bajo la norma IEC 60228 y terminado mediante terminales de compresión de ojillo debidamente ponchados y certificados.
- Componentes de maniobra y protección: Todos los dispositivos activos y pasivos de distribución (breakers, fusibles y supresores) deben portar su respectiva declaración de conformidad con marcas reconocidas (CE, UL, TÜV), garantizando el cumplimiento de los ensayos de tipo exigidos por la ONAC.

5.12.7. Resumen de Cumplimiento RETIE

Tabla 15

Verificación de cumplimiento RETIE y normas asociadas

Art.	Requisito RETIE	Aplica a	Cumplimiento
10	Conductores y accesorios certificados	M1 y M2	THHN NTC 3183 / MC4 TÜV / UL 4703 ✓
13	Señalización y distancias de seguridad	M1 y M2	Señales ISO 7010, d ≥ 3m a MT ✓
15	Sistema de puesta a tierra	M1 y M2	Varilla Copperweld, R ≤ 10 Ω ✓
29	Tablero eléctrico y montaje	M1 y M2	IP65 M1 / NEMA 4X M2, DIN rail ✓
NTC 2050 Art.690	Protección DC sistema FV	M1 y M2	Fusibles 125% I _{sc} , Breaker DC, DPS ✓
NTC 2050 Art.705	Sistema interconectado (anti-islanding)	M2	ATS + Victron Cerbo GX ✓
NTC 2050 Art.250	Puesta a tierra y equipotencialidad	M1 y M2	#6 AWG Cu, compresión, equipotencial ✓
IEC 61643	Protección contra sobretensiones	M1 y M2	DPS Tipo 2 DC (M1) / Tipo 1+2 DC+AC (M2) ✓

5.13. Desarrollo de modelado 3d

5.13.1. Evolución Cronológica y Técnica del Diseño Estructural

Con el propósito de evidenciar el proceso de optimización del proyecto, se presenta a continuación la transición entre las propuestas iniciales y el diseño final consolidado puesto que durante el desarrollo de la investigación se identificaron necesidades de mejora en cuanto a la aerodinámica y la eficiencia en la captación de energía solar para la sede de Barrancabermeja.

En las siguientes ilustraciones se aprecian los **Diseños Preliminares (Versiones Antiguas)**, los cuales sirvieron como base para la exploración volumétrica inicial, pero presentaban limitaciones en la distribución de cargas mecánicas y en el aprovechamiento de la radiación directa:

Figura 4. Modelo 3D de edificio, valla publicitaria y publicidad tipo marquesina generado en Blender

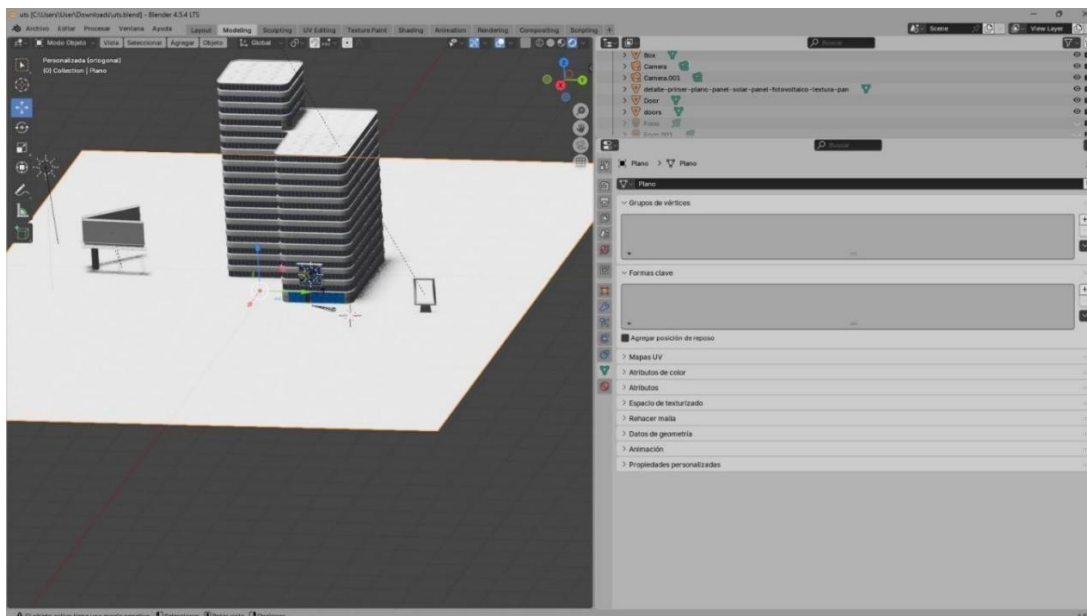


Figura 5. Modelo 3D de edificio generado en Blender.



Figura 6. Modelo 3D de edificio generado, valla publicitaria y marquesina en Blender.



ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figura 7. Vista de luces en propuesta de valla publicitaria 3D de edificio generado.

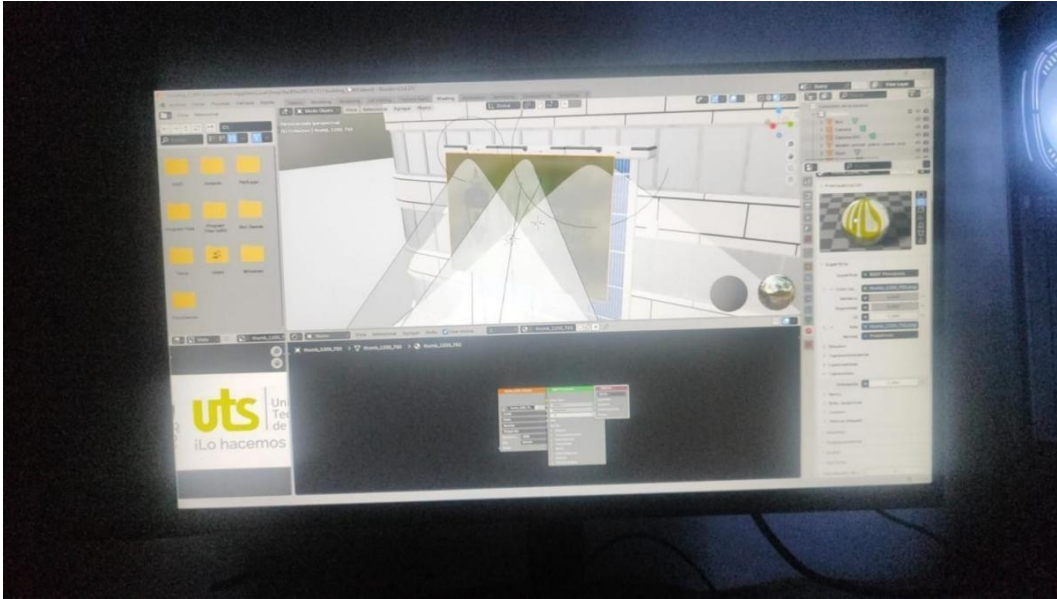
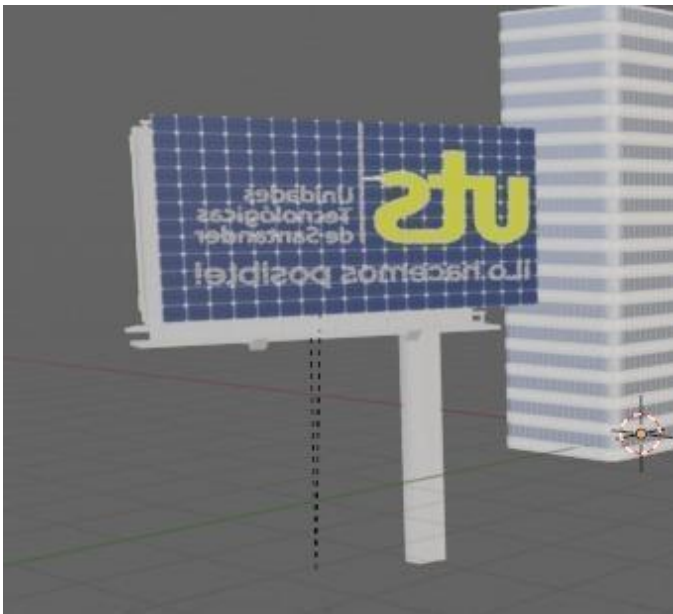
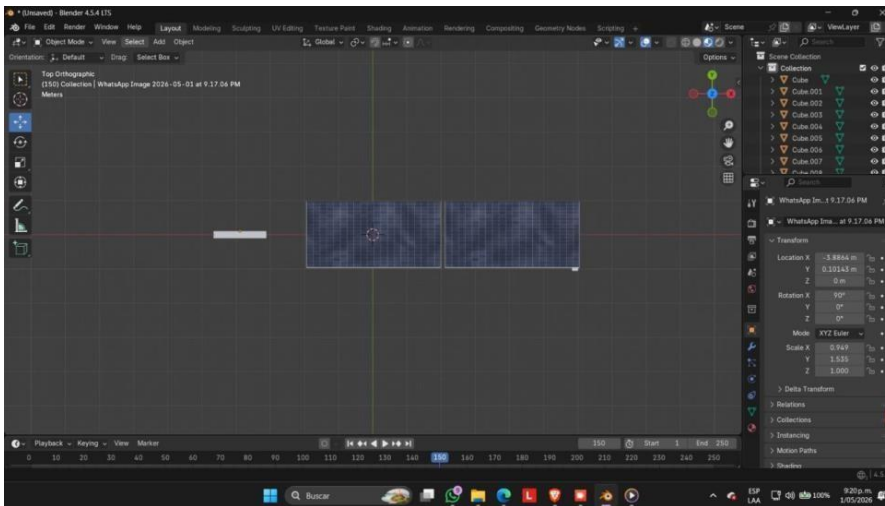


Figura 8. Modelo 3D de valla publicitaria en Blender, mostrando la estructura general.



Posteriormente, tras aplicar los cálculos de dimensionamiento fotovoltaico y los criterios de resistencia estructural prescritos por la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-10) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010), se consolidaron los diseños finales correspondientes a las versiones actuales del proyecto. En estos modelos definitivos se observa una configuración estructural con una robustez mecánica optimizada, calculada para soportar los esfuerzos de flexión y volcamiento, junto con una inclinación de los módulos fotovoltaicos corregida paramétricamente para maximizar la captación de irradiancia y garantizar la autonomía energética global del sistema.

Figura 9. Vista superior del modelado 3d correspondiente al diseño virtual de la pantalla LED y del sistema fotovoltaico.



ELABORADO POR:
 Docencia

REVISADO POR:
 Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figura 10. Vista Lateral en entorno de desarrollo 3D, donde se evidencia la distribución de los soportes estructurales del prototipo

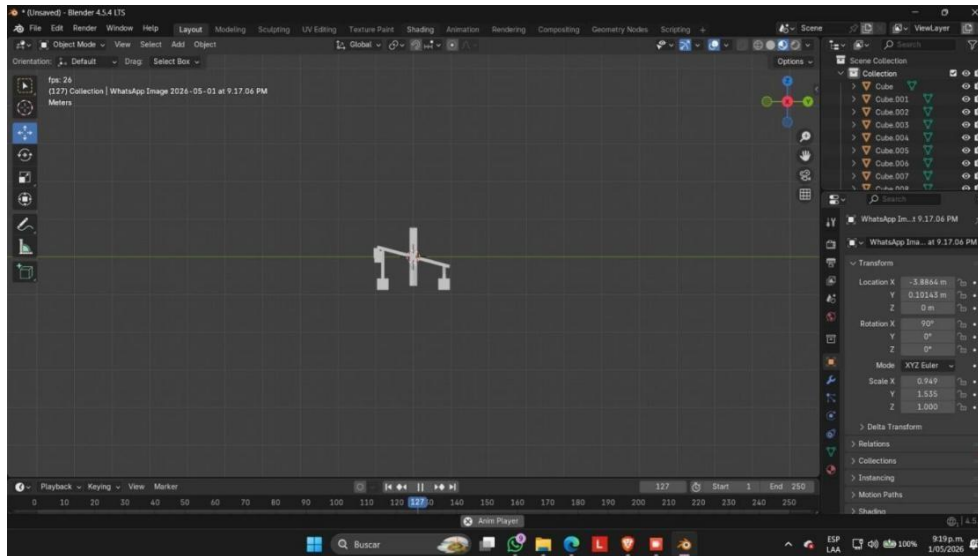
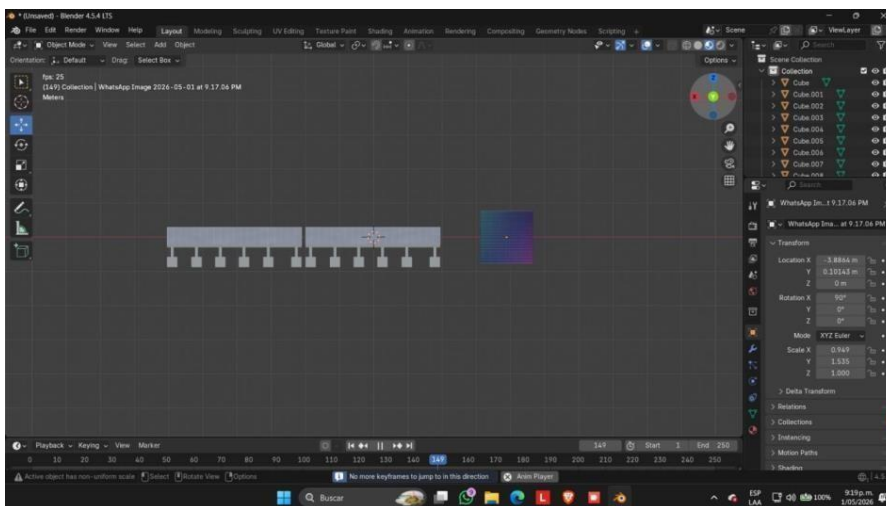


Figura 11. Vista frontal del prototipo virtual, detallando la disposición del panel fotovoltaico para el análisis de escala y proporciones.



ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figura 12. Proyección lateral del poste estructural junto a la valla fotovoltaica, permitiendo análisis del sistema publicitario.

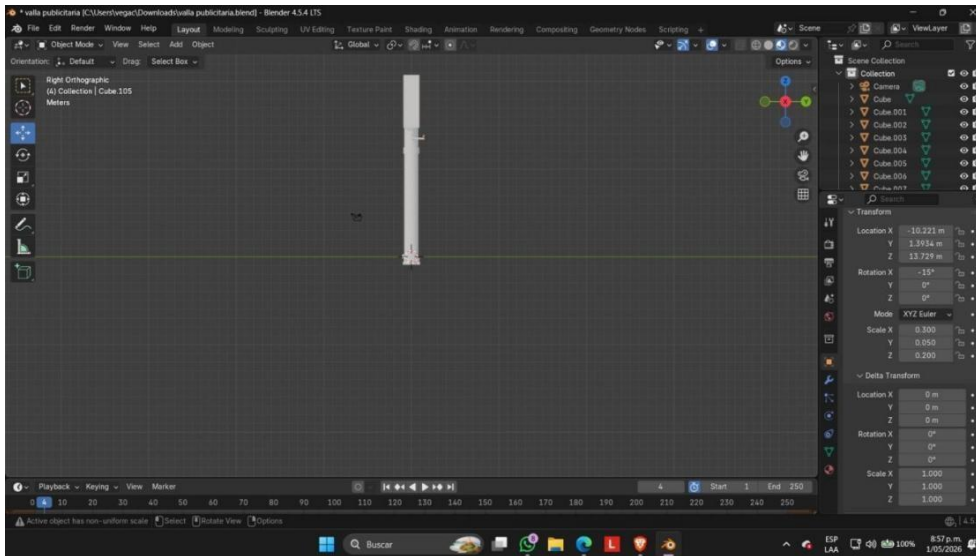
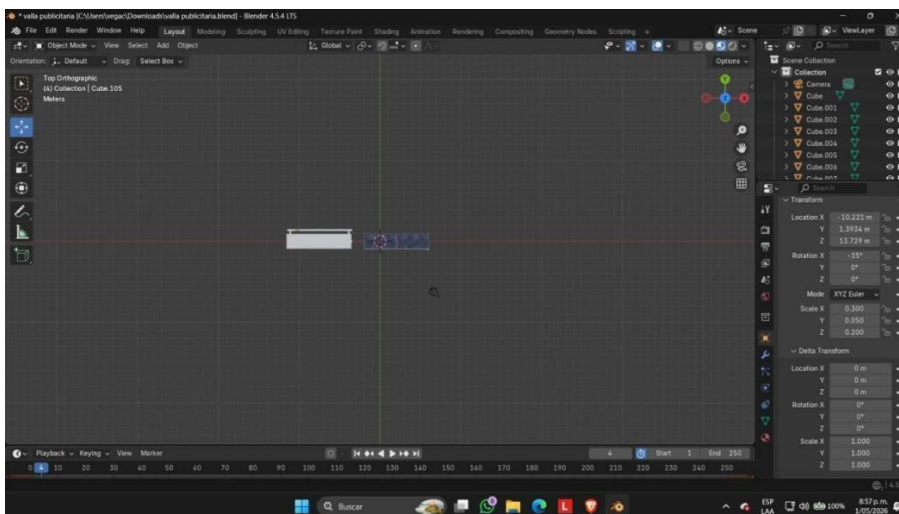


Figura 13. Vista aérea del prototipo virtual en el entorno de desarrollo, lo cual permite previsualizar la armonía entre el panel fotovoltaico y valla.

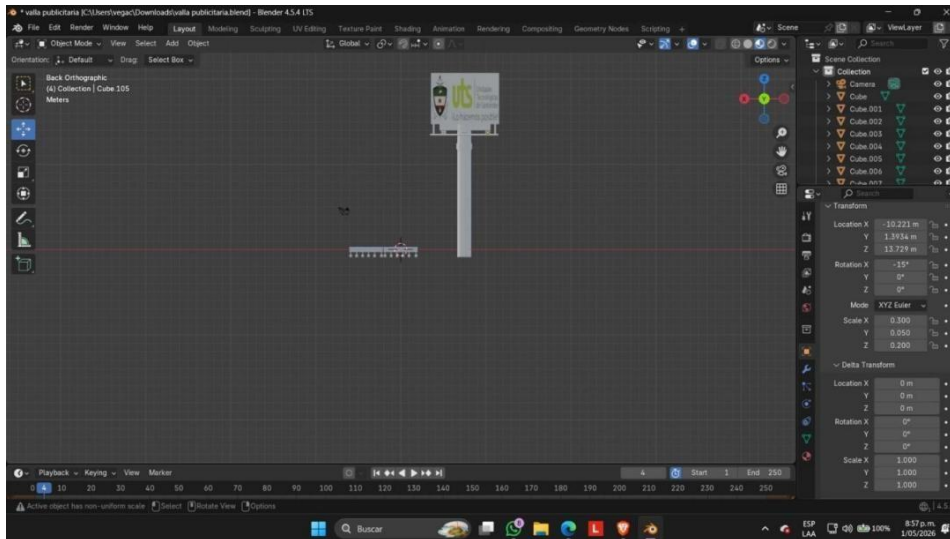


ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figura 14. Vista frontal del diseño , donde se integra la identidad corporativa de las UTS en la visualización para validar el impacto visual de la valla publicitaria.



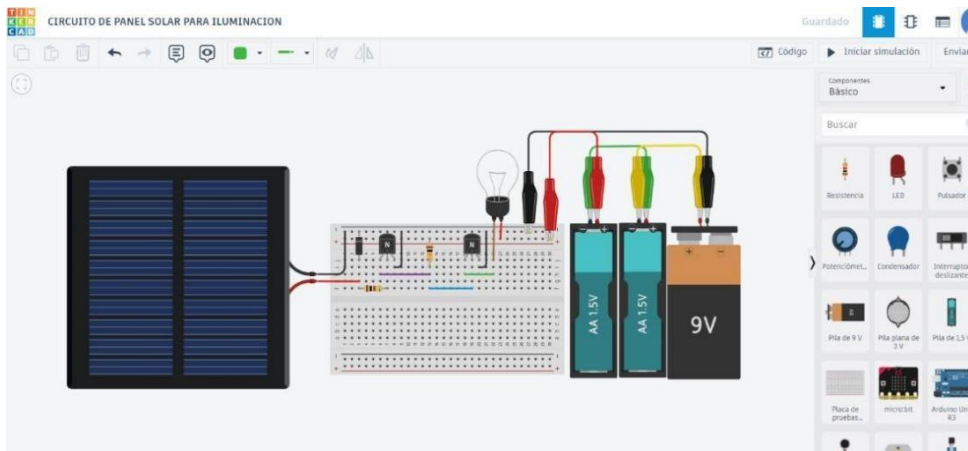
Esta comparativa técnica demuestra que el diseño actual es superior en términos de ingeniería electromecánica ya que integra soluciones de fijación más seguras y una estética institucional que se acopla de manera eficiente al entorno de las Unidades Tecnológicas de Santander mientras que las versiones anteriores carecían de los ajustes de precisión obtenidos mediante las simulaciones finales.

5.14. SIMULACIÓN ELECTRICA: Pruebas virtuales del comportamiento del sistema, autonomía de batería y eficiencia lumínica

Una vez consolidada la estructura física del proyecto, se procedió a la validación de la lógica eléctrica mediante la plataforma Tinkercad donde se desarrollaron dos prototipos funcionales a escala que garantizan la operatividad del sistema bajo diferentes condiciones de uso.

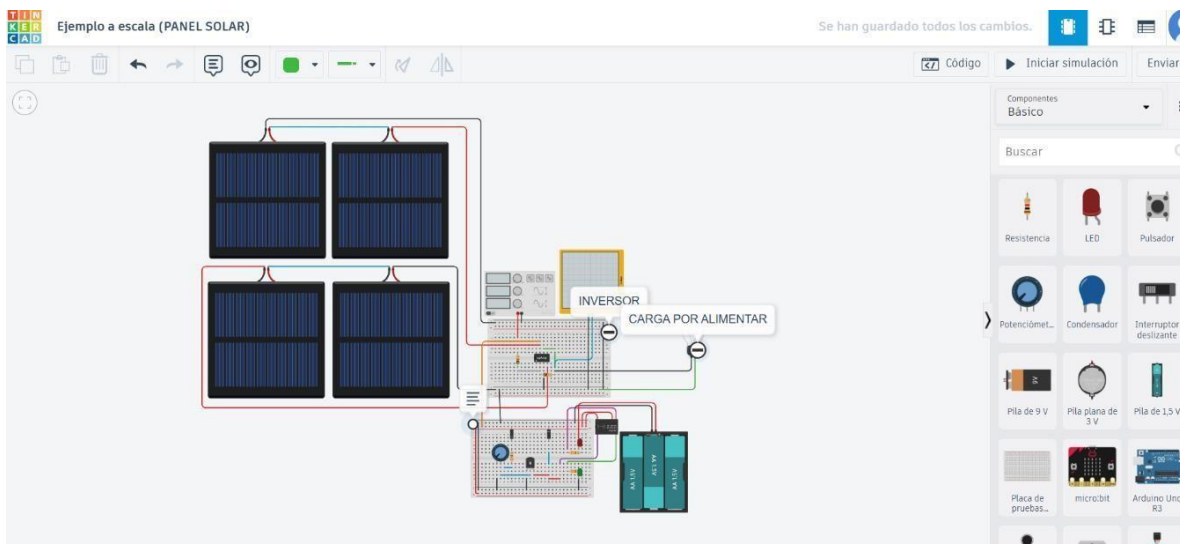
En primer lugar, se presenta el **Circuito de Iluminación Nocturna Automatizado**, el cual integra un sensor de luminosidad (LDR) encargado de activar las luminarias de la valla únicamente cuando la luz ambiental desciende de un umbral preestablecido puesto que este mecanismo es fundamental para optimizar el recurso energético almacenado en las baterías durante el día.

Figura 15 Esquema eléctrico a escala del sistema de iluminación nocturna automatizado



Por otro lado, se diseñó el **Circuito de Registro e Inversor de Carga para la Valla Principal**, el cual simula la etapa de potencia necesaria para convertir la energía de corriente continua proveniente de los paneles en una señal apta para el consumo de la publicidad mientras que, de forma simultánea, se monitorea el flujo de carga hacia los acumuladores para prevenir sobrecargas que puedan comprometer la vida útil de los componentes eléctricos.

Figura 16 Esquema eléctrico a escala del sistema de regulación de carga e inversión de potencia



La integración de ambos circuitos permite concluir que el diseño es técnicamente eficiente ya que la simulación virtual confirma que todos los dispositivos interactúan de manera segura y estable bajo los parámetros de tensión y corriente calculados para la valla publicitaria institucional.

En lo que respecta a los alcances finales del proceso investigativo, es fundamental señalar que, aunque el planteamiento inicial contemplaba la ejecución de una maqueta a escala funcional, el análisis financiero detallado demostró la inviabilidad económica de dicho prototipo por lo cual se procedió a una reestructuración de los productos entregables para garantizar el rigor técnico mediante tres componentes fundamentales.

En primer lugar, se consolidó una Guía técnica de ensamblaje de valla publicitaria, la cual funciona como un manual operativo donde se explican

detalladamente los requerimientos de materiales junto con los costos de inversión y las precauciones de seguridad necesarias para llevar a cabo el proyecto tanto a escala como en una implementación real, asegurando así que cualquier interesado cuente con la hoja de ruta completa para su futura ejecución.

Asimismo, se desarrolló el Modelado 3D detallado del sistema publicitario, el cual permite visualizar la arquitectura de la valla y la disposición de los módulos fotovoltaicos en el espacio institucional, facilitando la comprensión de la estructura mecánica y el impacto visual que tendría la obra una vez instalada en la sede de Barrancabermeja.

Finalmente, se generaron los Esquemas eléctricos de conexión para el modelo a escala, cuya funcionalidad fue validada mediante simulaciones en el entorno virtual de Tinkercad donde se comprobó la correcta interacción entre el panel solar, el sistema de almacenamiento y la carga lumínica, certificando que el diseño propuesto es operativamente eficiente y cumple con los estándares técnicos requeridos.

SIMULACION EN PROTEUS:

[PROTEUS](#)

6. CONCLUSIONES

Tras la finalización del proceso de diseño y validación técnica, se determina que la implementación de una valla publicitaria autosostenible en la sede de las UTS

Barrancabermeja es plenamente viable, siempre que se fundamente en un sistema de almacenamiento de Litio ($LiFePO_4$). Este modelo resultó ser el más eficiente debido a su alta profundidad de descarga y larga vida útil en comparación con las baterías de plomo-ácido, permitiendo que el diseño soporte las altas temperaturas de la región sin comprometer la autonomía de 3 días establecida en los criterios iniciales.

En relación con el análisis de viabilidad técnica, se concluye que el aprovechamiento de un potencial solar de 4.5 HSP garantiza que el arreglo fotovoltaico cubra el 100% de la demanda energética de la valla, eliminando por completo la facturación por consumo eléctrico en este mobiliario y reduciendo la huella de carbono institucional de manera significativa. No obstante, se identificaron restricciones económicas importantes, principalmente relacionadas con la inversión inicial en componentes de alta gama y sistemas de protección contra sobretensiones, los cuales son indispensables para cumplir con la normativa RETIE en una zona de alta actividad atmosférica.

Finalmente, el mayor aporte de este trabajo reside en la entrega de un modelo de ingeniería validado, el cual proporciona a la universidad un manual técnico detallado que elimina la incertidumbre en la etapa de ejecución, demostrando que la integración de software de simulación como TinkerCAD y Blender permite obtener resultados de diseño precisos y seguros antes de la inversión física en materiales.

7. RECOMENDACIONES

Con el propósito de elevar el proyecto a una fase de implementación real, se recomienda a la institución proceder con la fabricación del prototipo físico siguiendo estrictamente el Manual de Montaje y Operación desarrollado en este trabajo, el cual detalla los torques de apriete para la estructura metálica y los diagramas de conexión bajo la norma NTC 2050. Es imperativo que la construcción incluya una validación experimental de la irradiancia mediante el uso de un piranómetro instalado en el sitio, con el fin de ajustar los ángulos de inclinación calculados y verificar si la generación real coincide con los modelos teóricos de la NASA empleados en esta etapa de diseño.

De igual manera, para mejorar la seguridad estructural, se sugiere realizar pruebas de carga de viento mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) o ensayos en túnel de viento a escala, tomando como referencia la norma NSR-10 (Capítulo B.6) para asegurar que el soporte pueda soportar ráfagas superiores a los 90 km/h comunes en tormentas locales, evitando así riesgos de volcamiento o fatiga del material en el poste principal. En el ámbito legal, se debe gestionar una inspección por un organismo acreditado para obtener el dictamen de cumplimiento RETIE, enfocándose especialmente en la medición de la resistencia de la puesta a tierra, la cual debe ser menor a 10Ω para garantizar la seguridad del personal y los equipos.

Finalmente, se propone la creación de un programa de mantenimiento que incluya la limpieza quincenal de los módulos con agua desionizada para remover el material particulado y hollín industrial propio de la zona, además de la instalación de un sistema de monitoreo remoto tipo SCADA o mediante plataformas de Internet de las Cosas (IoT), lo cual permitiría supervisar en tiempo real el estado de carga de las baterías y detectar

fallas preventivamente, asegurando que la inversión tecnológica mantenga su eficiencia energética durante los 25 años de vida útil estimada de los paneles.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altahona Piñeres, C. F. (2023). Estudio y viabilidad del potencial energético solar en las zonas rurales de Barrancabermeja, para el desarrollo de fuentes de generación eléctrica fotovoltaica (Trabajo de grado de maestría). Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.uan.edu.co/items/503ecb9e-0c22-4a01-8f6f-863d8aca3aa5>

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS]. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Tomo 1: Título B - Cargas. Bogotá, Colombia: AIS.

Autodesk. (2022). Tinkercad (Versión interactiva web) [Software de computación]. Recuperado de <https://www.tinkercad.com>

Barón Cangrejo, D. A., & Amaya Hernández, C. E. (2020). Diseño de un sistema solar fotovoltaico para suplir la iluminación en vallas publicitarias de la empresa Efectimedios S.A. (Trabajo de grado de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/items/5aaf4b0e-7149-490c-9b04-88201eaaec5>

Blender Online Community. (2024). Blender (Versión 4.2) [Software de computación]. Ámsterdam, Países Bajos: Blender Foundation. Recuperado de <http://www.blender.org>

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9a ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.

Castañer, L., & Silvestre, S. (2011). Guía de diseño de sistemas fotovoltaicos. Barcelona, España: Editorial Reverté.

Chevalier, A. (2016). Dibujo Técnico (2a ed.). Ciudad de México, México: Editorial Limusa.

Condori Flores, D. W. (2018). Fabricación de letreros publicitarios rotatorios con sistema solar fotovoltaico respaldado. Recuperado de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/395924179/PROYECTO-LETREROS-FOTOVOLTAICOS>

Congreso de la República de Colombia. (2014, 13 de mayo). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial No. 49.150.

Dávalos Laverde, J. A., & Amaya Hernández, E. A. (2023). Diseño y estudio técnico-económico de prototipo de paneles solares para sustituir los sistemas convencionales de iluminación en vallas publicitarias (Trabajo de grado de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11349/33291>

Enríquez Harper, G. (2014). El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales y comerciales. Ciudad de México, México: Editorial Limusa.

EPEVER. (2021). Datasheet: Tracer AN Series MPPT Solar Charge Controller (10A-40A). Beijing, China: Beijing Epsolar Technology Co., Ltd. Recuperado de <https://www.epever.com>

García, J. M., & González, J. L. (2018). Energía solar fotovoltaica: Diseño y aplicaciones técnicas. Madrid, España: Editorial Paraninfo.

Heredia, G. (2016). Manual de instalaciones fotovoltaicas: Cálculos, componentes e implementación. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

HOMER Energy. (2021). HOMER Pro (Versión 3.14) [Software de simulación y optimización]. Recuperado de <https://www.homerenergy.com>

Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2018). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Transmission Interfaces (IEEE Std 1547-2018). Nueva York, NY: IEEE.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2020). Código Eléctrico Nacional (Norma Técnica Colombiana NTC 2050, Segunda actualización). Bogotá, Colombia: ICONTEC.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Bogotá, Colombia: IDEAM.

International Electrotechnical Commission [IEC]. (2004). IEC 62124: Stand-alone photovoltaic (PV) systems - Design verification. Ginebra, Suiza: IEC.

Jinko Solar. (2020). Ficha técnica: Módulos Fotovoltaicos Mono-Crystalline de la serie JKM380M-400M-72. Shanghái, China: Jinko Solar Holding Co., Ltd. Recuperado de <https://www.jinkosolar.com>

Lin, Y.-F. (2025). Estrategia de inversión sostenible: Una programación no lineal y multiobjetivo difusa para las vallas publicitarias fotovoltaicas solares de Taiwán. *Sustainability*, 17(9), 37-63. <https://doi.org/10.3390/su17093763>

Linden, D., & Reddy, T. B. (2011). *Linden's Handbook of Batteries* (4a ed.). Nueva York, NY: McGraw-Hill.

Mesa, A., & Torres, J. (2022). Análisis comparativo del ciclo de vida y huella ecológica de sistemas de almacenamiento basados en Litio y Plomo-Ácido en aplicaciones fotovoltaicas autónomas. *Revista Iberoamericana de Energías Renovables*, 14(2), 45-58.

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. Resolución 90708 de agosto 30 de 2013. Bogotá, Colombia: Minminas.

National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2020). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER Project)*. Hampton, VA: NASA Langley Research Center. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov>

Pylontech. (2021). *Datasheet: US Series Lithium-Ion Phosphate Energy Storage System (US2000C / US3000C / US5000)*. Shanghái, China: Pylon Technologies Co., Ltd. Recuperado de <https://www.pylontech.com.cn>

Reiner, G. (2021). *Battery Management Systems (BMS) for Lithium-Ion Cells: Modeling and Simulation*. Cham, Suiza: Springer.

Rincon Leal, S. A., Piñeros Carvajal, C., & Cano Triviño, J. L. (2024). Propuesta de implementación de soluciones solares en comunidades energéticas urbanas de Barrancabermeja, Santander (Trabajo de grado de especialización). Universidad EAN, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10882/14247>

Roldán Viloría, J. (2015a). Dimensionado e instalación de sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a red. Madrid, España: Ediciones Paraninfo.

Roldán Viloría, J. (2015b). Instalaciones de energía solar fotovoltaica: Montaje y mantenimiento. Madrid, España: Ediciones Paraninfo S.A.

Sandoval Quijano, L. (2014). Energía solar: Estudio de implementación de un sistema de generación de energía para el edificio Yariguies de la Universidad de Santander UDES (Trabajo de grado de pregrado). Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/7fb4660b-5d38-4d1a-9d19-f717b2b15f97>

Trojan Battery Company. (2022). Data sheet: Deep-Cycle Flooded Lead-Acid Batteries. Santa Fe Springs, CA: Trojan Battery Company LLC. Recuperado de <https://www.trojanbattery.com>

Underwriters Laboratories [UL]. (2018). UL 1973: Standard for Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications. Northbrook, IL: UL.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2020). Cálculo del factor de emisión de la matriz de generación eléctrica en Colombia. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.

Victron Energy. (2020). Datasheet: Phoenix Inverter 250VA - 1200VA 230V and 120V (VE.Direct). Almere, Países Bajos: Victron Energy B.V. Recuperado de <https://www.victronenergy.com>

Victron Energy. (2023). VictronConnect App (Versión 5.92) [Software de aplicación móvil y escritorio]. Recuperado de <https://www.victronenergy.com>

Villalva, M. G. (2019). Sistemas fotovoltaicos de energía solar: Teoría y modelado. São Paulo, Brasil: Editorial Universidad Tecnológica de São Paulo.

9. APÉNDICES

Apéndice A

Repositorio Digital de Archivos de Modelado 3D y Simulación Virtual

El presente apéndice compila los archivos digitales maestros desarrollados a lo largo de la investigación, los cuales sustentan la validación geométrica, visual y lógica de los dos prototipos de vallas publicitarias fotovoltaicas para las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), sede Barrancabermeja.

A continuación, se detalla el contenido disponible en el repositorio institucional en la nube:

1. **Modelos Tridimensionales (Blender v. 4.0):** Archivos fuente en formatos nativos .blend e intercambiables .fbx que contienen el ensamble paramétrico completo, despiece de subensambles estructurales, texturizado de componentes comerciales y los renderizados fotorrealistas de la Valla Iluminada Tradicional (Modelo 1) y la Valla con Pantalla LED Modular (Modelo 2).
2. **Esquemas de Simulación Eléctrica (TinkerCAD):** Archivos y diagramas de circuitos lógicos que alojan el código de programación, la lógica de control por fotorresistencia (LDR) para la automatización nocturna y las pruebas de comportamiento de tensión y corriente de los sistemas a escala.

Para consultar, descargar e interactuar con los elementos gráficos y lógicos del proyecto, acceda al siguiente enlace de almacenamiento seguro:

Enlace de acceso al repositorio: [ENTREGABLES](#)

10. ANEXOS

Anexo A

Ficha técnica del panel fotovoltaico Jinko Solar serie JKM380M-400M-72

Engineering Drawings

Packaging Configuration

(Two pallets=One stack)
27pcs/pallet, 54pcs/stack, 594pcs/40' HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence

Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75x158.75mm
No. of cells	72 (6x12)
Dimensions	1979x1002x40mm (77.91x39.45x1.57 inch)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1x4.0mm ² , Length 900/1200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM380M-72		JKM385M-72		JKM390M-72		JKM395M-72		JKM400M-72	
	JKM380M-72-V	JKM385M-72-V	JKM385M-72-V	JKM390M-72-V	JKM390M-72-V	JKM395M-72-V	JKM395M-72-V	JKM400M-72-V	JKM400M-72-V	
Maximum Power (Pmax)	380Wp	286Wp	385Wp	290Wp	390Wp	294Wp	395Wp	298Wp	400Wp	302Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.5V	38.6V	40.8V	38.8V	41.1V	39.1V	41.4V	39.3V	41.7V	39.6V
Maximum Power Current (Imp)	9.39A	7.42A	9.44A	7.48A	9.49A	7.54A	9.55A	7.60A	9.60A	7.66A
Open-circuit Voltage (Voc)	48.9V	47.5V	49.1V	47.7V	49.3V	48.0V	49.5V	48.2V	49.8V	48.5V
Short-circuit Current (Isc)	9.75A	7.88A	9.92A	7.95A	10.12A	8.02A	10.23A	8.09A	10.36A	8.16A
Module Efficiency STC (%)	19.16%		19.42%		19.67%		19.92%		20.17%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum System Voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum Series Fuse Rating	20A									
Power Tolerance	0~+3%									
Temperature Coefficients of Pmax	-0.37%/°C									
Temperature Coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature Coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s


* Power measurement tolerance: ± 3%

The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. JKM380-400M-72-(V)-A3,1-EN

Fuente: Jinko Solar, 2020..

Anexo B

Ficha técnica de la batería de ciclo profundo Trojan Motive T-105 Plus




TROJAN
BATTERY COMPANY

DATA SHEET **MOTIVE T-105 PLUS**

MODEL: T-105 Plus SureVent™ with Flip Top
VOLTAGE: 6
MATERIAL: Polypropylene
DIMENSIONS: Inches (mm)
BATTERY: Deep-Cycle Flooded/Wet Lead-Acid Battery
COLOR: Maroon
WATERING: No Watering System Available

MADE IN THE USA
WITH T₂ TECHNOLOGY



6 VOLT

PHYSICAL SPECIFICATIONS

DGI	MODEL NAME	VOLTAGE	CELL(S)	TERMINAL TYPE *	DIMENSIONS * INCHES (mm)			WEIGHT * LBS. (kg)
					LENGTH	WIDTH	HEIGHT *	
GC2	T-105 PLUS	6	3	1, 2, 3	10.30 (262)	7.11 (181)	11.07 (281)	62 (28)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

CRANKING PERFORMANCE		CAPACITY * MINUTES		CAPACITY * AMP-HOURS (Ah)				ENERGY (kWh)	INTERNAL RESISTANCE (mΩ)	SHORT CIRCUIT CURRENT (amps)
C.C.A. ¹ @ 0°F (-18°C)	C.A. ¹ @ 32°F (0°C)	@ 25 Amps	@ 7.5 Amps	5-Hr	10-Hr	20-Hr	100-Hr	100-Hr		
—	—	447	115	185	207	225	250	1.50	—	—

CHARGING INSTRUCTIONS

SYSTEM VOLTAGE	CHARGER VOLTAGE SETTINGS (AT 77°F/25°C)				
	6V	12V	24V	36V	48V
Bulk Charge	7.41	14.82	29.64	44.46	59.28
Float Charge	6.75	13.50	27.00	40.50	54.00
Equalize Charge	8.10	16.20	32.40	48.60	64.80

Do not install or charge batteries in a sealed or non-ventilated compartment. Constant under or overcharging will damage the battery and shorten its life as with any battery.

CHARGING TEMPERATURE COMPENSATION

ADD	SUBTRACT
0.005 volt per cell for every 1°C below 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F below 77°F	0.005 volt per cell for every 1°C above 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F above 77°F

OPERATIONAL DATA

OPERATING TEMPERATURE	SELF-DISCHARGE
-4°F to 113°F (-20°C to +45°C). At temperatures below 32°F (0°C) maintain a state of charge greater than 60%.	5 – 15% per month depending on storage temperature conditions.

RECYCLE RESPONSIBLY



STATE OF CHARGE MEASURE OF OPEN-CIRCUIT VOLTAGE

PERCENTAGE CHARGE	SPECIFIC GRAVITY	CELL	6 VOLT
100	1.277	2.122	6.37
90	1.258	2.103	6.31
80	1.238	2.083	6.25
70	1.217	2.062	6.19
60	1.195	2.040	6.12
50	1.172	2.017	6.05
40	1.148	1.993	5.98
30	1.124	1.969	5.91
20	1.098	1.943	5.83
10	1.073	1.918	5.75


Fuente: Trojan Battery Company, 2022.


Anexo C


Ficha técnica de las baterías de litio para montaje en rack Pylontech Serie US


LOW-VOLTAGE / RACK-MOUNTED BATTERY


US Series

 Flexible for Mixed Usage

 Free to Scale Up

 19inch Rack Compatible

 High Power Efficiency



Module	US2000C	US3000C	US5000
Nominal Voltage (VDC)	48	48	48
Nominal Capacity (kWh)	2.4	3.55	4.8
Usable Capacity (kWh)	2.28	3.37	4.56
Dimension (W*D*H mm)	442*410*89	442*410*112	442*420*161
Weight (kg)	22.5	32	39.7
Depth of Discharge	95%	95%	95%
Charge/Discharge (A)	25 (Normal) 50-89 @60s (Max) 90-200 @15s (Peak)	37 74-89 @60s 90-200 @15s	100 101-120 @15min 121-200 @15s
Communication Port		RS485/CAN	
Single String Quantity (pcs)	16	16	16
Working Temperature/ (°C) Charge		0~55	
Working Temperature/ (°C) Discharge		-10~55	
Storage Temperature/ (°C)		-20~45	
Short-current/duration time (A)	<4000/2ms		
IP rating		IP20	
Humidity (RH)		5%-95% No Condensation	
Altitude (m)		<4000	
Design life (@25°C)	15+ Years	15+ Years	15+ Years
Cycle Life (@25°C)	>8,000	>8,000	>8,000
Certification	UL1642/IEC 62619/ IEC 63056/ IEC 61000-6-2/3/ UN38.3	UL1973/UL 1642/ UL9540A/VDI 2170-50/ IEC 63056/IEC 62619/ IEC 62040/IEC 62477-1/ IEC 61000-6-2/3/UN38.3	UL1973/UL 9540A IEC 62619/IEC 63056/ IEC 61000-6-2/3/ UN38.3

Fuente: Pylontech, 2021

Anexo D

Ficha técnica del controlador de carga solar MPPT EPEVER Serie Tracer AN

Technical specifications

Model	Tracer 1206AN	Tracer 2206AN	Tracer 1210AN	Tracer 2210AN	Tracer 3210AN	Tracer 4210AN
System nominal voltage	12/24VDC (1) Auto					
Rated charge current	10A	20A	10A	20A	30A	40A
Rated discharge current	10A	20A	10A	20A	30A	40A
Battery voltage range	8-32V					
Max. PV open circuit voltage	60V (2) (6V) (3)			100V (2) (6V) (3)		
MPP voltage range	(Battery voltage +2V) ~ 36V			(Battery voltage +2V) ~ 72V		
Max. PV input power	130W/12V 260W/24V	260W/12V 520W/24V	130W/12V 260W/24V	260W/12V 520W/24V	390W/12V 780W/24V	520W/12V 1040W/24V
Self-consumption	≤12mA					
Discharge circuit voltage drop	≤0.23V					
Temperature compensate coefficient (3)	-3mV/°C/2V (Default)					
Grounding	Common negative					
RS485 interface	5VDC/100mA					
LCD backlight time	60S (Default)					

(1) When a lead-acid battery is used, the controller hasn't the low temperature protection
 (2) At minimum operating environment temperature
 (3) At 25°C environment temperature
 (4) When a lithium-ion battery is used, the system voltage can't be identified automatically

Electrical Parameters	
Working environment temperature	-25°C ~ +50°C (100% input and output)
Storage temperature range	-20°C ~ +70°C
Relative humidity	≤95% N.C.
Enclosure	IP30

The controller can full load working in the working environment temperature, When the internal temperature is 81°C, the reducing power charging mode is turned on. Refer to P24

Model	Tracer1206AN Tracer1210AN	Tracer2206AN Tracer2210AN	Tracer3210AN	Tracer4210AN
Mechanical Parameters				
Dimension	172x139 x 44mm	220x154x 52mm	228x164x55mm	252x180x63mm
Mounting dimension	130x130mm	170x145mm	170x164mm	210x171mm
Mounting hole size	Φ5mm			
Terminal	12AWG(4mm ²)	6AWG(16mm ²)	6AWG(16mm ²)	6AWG(16mm ²)
Recommended cable	12AWG(4mm ²)	10AWG(6mm ²)	8AWG(10mm ²)	6AWG(16mm ²)
Weight	0.57kg	0.94kg	1.26kg	1.65kg

BLDG#18, CO. PARK, NO.8 HEYING ROAD, CHANGPING DISTRICT, BEIJING, CHINA
 010-82894112 010-82894882 www.epsolarpv.com info@epsolarpv.com

Fuente: EPEVER, 2021

Anexo E

Ficha técnica del inversor Victron Energy Phoenix VE-Direct

Inversor VE-Direct 230V/50Hz	12/250 24/250 48/250	12/375 24/375 48/375	12/500 24/500 48/500	12/800 24/800 48/800	12/1200 24/1200 48/1200	12/1600 24/1600 48/1600
Article number (1)	PHN1251X10	PHN1371X10	PHN1501X10	PHN1801X10	PHN2121X10	PHN2161X00
Cont. power at 25°C	250W	375W	450W	800W	1150W	1450W
Cont. power at 40°C	200W	300W	380W	650W	1000W	1300W
Time-limited power (cold start)	300W/15s	450W/30s	500W/1h	900W/1h	1200W/1h	1600W/1h
Peak power	400W/2s	600W/2s	750W/3s	1200W/15s	1600W/15s	2100W/15s
Output AC voltage / frequency (adjustable)	230VAC +/- 3% 50Hz or 60Hz +/- 0.1%					
Input voltage range	9.2 - 17.7 / 18.5 - 34 / 36.8 - 62 V					
DC low shut down (adjustable)	9.3 / 18.6 / 37.2 V					
Dynamic load dependent DC low shut down (fully configurable)	Dynamic cut-off, see https://www.victronenergy.com/live/ve-direct-to-phenix-inverters-dynamic-cut-off					
DC low restart and alarm (adjustable)	10.9 / 21.8 / 43.6 V					
Battery charged detect (adjustable)	14 / 28 / 56 V					
Max. efficiency	84 / 86 / 86 %	86 / 88 / 88 %	86 / 88 / 88 %	90 / 90 / 91 %	91 / 91 / 92%	91 / 91 / 92%
Zero-load power	5 / 6.8 W	6 / 7.9 W	7 / 8 / 10 W	8 / 8.9 W	10 / 11 / 12 W	14 / 14 / 15 W
Default zero-load power in ECO mode (default retry interval: 2.5 s, adjustable)	1 / 1.2 W	1 / 1.2 W	1 / 1.2 W	1 / 1.2 W	1 / 2 / 3 W	1 / 2 / 3 W
ECO mode stop and start power setting	Adjustable					
Protection (2)	a g					
Operating temperature range	-40 to +65°C (fan assisted cooling); (Derate 1.25% per °C above 40°C)					
Humidity (non-condensing)	max 95%					
ENCLOSURE						
Material & Colour	Steel chassis and plastic cover (Blue RAL 5012)					
Battery-connection	Screw terminals					
Maximum cable cross-section	10 mm²	10 mm²	10 mm²	25/16/16 mm²	35/25/25 mm²	50/25/25 mm²
Standard AC outlets	230V Schuko (CEE 7/4), EC-3/0 (male plug included) UK (BS 1363), AU/NZ (AS/NZS 3112)					
Protection category	IP 21					
Weight (kg)	2.7	3	3.5	5.5	7.2	8.0
Dimensions (h x w x d, mm)	86 x 165 x 260 86 x 165 x 260 86 x 165 x 260	86 x 165 x 260 86 x 165 x 260 86 x 165 x 260	86 x 172 x 275 86 x 172 x 275 86 x 172 x 275	95 x 231 x 334 95 x 231 x 334 95 x 231 x 334	117 x 231 x 333 117 x 231 x 333 117 x 231 x 333	117 x 231 x 335 117 x 231 x 335 117 x 231 x 335
ACCESSORIES						
Remote on-off	Yes					
Automatic transfer switch	Fitbox					
STANDARDS						
Safety	EN-IEC 60335-1 / EN-IEC 62109-1					
EMC	EN 55014-1 / EN 55014-2 / IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3					
Automotive Directive	ECE R10-4					
1) Output socket: X=1: IEC X=2: Schuko X=3: ALAN-Z X=4: UK	2) Protection key: a) output short circuit b) overload c) battery voltage too high d) battery voltage too low e) temperature too high f) DC ripple too high					



Battery Alarm
An excessively high or low battery voltage is indicated by an audible and visual alarm, and a relay for remote signalling.



BMV Battery Monitor
The BMV Battery Monitor features an advanced microprocessor control system combined with high resolution measuring systems for battery voltage and charge/discharge current. Besides this, the software includes complex calculation algorithms to exactly determine the state of charge of the battery. The BMV selectively displays battery voltage, current, consumed Ah or time to go. The monitor also stores a host of data regarding performance and use of the battery.



VE.Direct Bluetooth Smart dongle

Fuente: Victron Energy, 2020