

Diseño de un Sistema Fotovoltaico On-Grid para Autogeneración
a Pequeña Escala en el Hotel Bari

Luis Felipe Castellanos Ordoñez y Juan Felipe Sarmiento Dallos

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director

Manuel José Ortiz Rangel

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Codirectores

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

PhD. en Ingeniería

Rolando Andrés Rincón Saravia

Magíster en Dirección de Empresas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mi madre, Joicy Liliana, quien ha sido mi pilar fundamental, mi mayor motivación y la fuente inagotable de fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por cada sacrificio en silencio, por tu paciencia infinita y por enseñarme que con perseverancia los sueños se alcanzan; este logro es tanto tuyo como mío.

Luis Felipe Castellanos Ordoñez

A mi madre, por ser el pilar fundamental de mi vida, la fuente inagotable de apoyo y quien con su amor y sacrificio hizo posible que este sueño se convirtiera en realidad.

Juan Felipe Sarmiento Dallos

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en los momentos de mayor incertidumbre, permitiéndome culminar esta etapa profesional con salud y sabiduría. Su bendición ha sido la luz que iluminó el camino hacia la realización de este proyecto de ingeniería.

A mi madre, Joicy Lilibiana, por ser el pilar fundamental en mi formación humana y académica. Tu amor incondicional, tus sacrificios silenciosos y tu confianza inquebrantable en mis capacidades fueron el motor que me impulsó a superar cada reto; este logro es el fruto de tu entrega y el mayor orgullo que puedo ofrecerte como hijo.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), por abrirme sus puertas y brindarme un espacio de crecimiento personal y técnico de excelencia. A mis profesores, les agradezco por su dedicación, por el rigor académico que forjó mi carácter y por compartir el conocimiento que hoy me permite aportar soluciones sostenibles al sector energético nacional.

A los ingenieros Manuel José Ortiz Rangel, Oscar Arnulfo Quiroga y Rolando Andrés Rincón, por abrirme las puertas de su conocimiento, por la generosidad de su tiempo y por creer en la viabilidad de este proyecto.

Luis Felipe Castellanos Ordoñez

A la Universidad Industrial de Santander y, en especial, a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), por brindarme una formación de excelencia y los conocimientos para mi criterio profesional.

Mi más profundo agradecimiento a los docentes que orientaron mi formación: al ingeniero Manuel José Ortiz Rangel, al ingeniero Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga y al ingeniero Rolando Andrés Rincón Saravia. Sus enseñanzas, rigor técnico y disposición fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis; también a mi compañero de equipo que realizó una gran labor en el proyecto siendo el motor de este.

Juan Felipe Sarmiento Dallos

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2 Marco Referencial y Normativo	16
2.1 Marco Teórico (Fundamentos de energía solar fotovoltaica, sistemas on-grid)	16
2.2 Marco Normativo Colombiano	17
2.2.1 Ley 1715 de 2014 y Ley 2099 de 2021	17
2.2.2 Resoluciones CREG (030, 135, 174)	17
2.2.3 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)	18
2.2.4 Norma Técnica Colombiana NTC 2050	18
3 Diagnóstico Energético y Análisis del Sitio	19
3.1 Descripción de la Instalación (Hotel Bari)	19
3.2 Análisis del Perfil de Consumo Eléctrico	19
3.3 Evaluación del Recurso Solar en Bucaramanga	23
3.4 Caracterización del Sistema de Distribución (ESSA) y comercializador Ruitoque Energía	24
3.5 Caracterización de Áreas Útiles	26
3.5.1 Justificación de la Elevación de la Estructura	27
4 Diseño y Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico	28
4.1 Criterios de Selección de Componentes	28
4.1.1 Paneles Fotovoltaicos	29
4.1.2 Inversores y Sistemas de Conversión o Inversores Fotovoltaicos y Acople a Red . . .	29
4.2 Configuración del Arreglo Fotovoltaico	30
4.2.1 Topología de Conexión de los Paneles Eléctricos	32

4.3	Cálculos Eléctricos y Memoria Técnica	34
4.3.1	Protecciones	35
4.3.2	Puesta a tierra	37
4.4	Datos Climatológicos y Recurso Solar	38
4.5	Simulación del Desempeño Energético PVsyst	39
4.5.1	Balance Energético Mensual	40
4.5.2	Análisis del Diagrama de Pérdidas	42
4.6	Evaluación del Impacto Ambiental	43
5	Evaluación Económica y Financiera	43
5.1	Presupuesto Estimado de Implementación	43
5.2	Evaluación Financiera y Ahorro Proyectado	46
5.3	Análisis de Indicadores de Rentabilidad (TIR, VPN, Payback)	48
5.4	Evaluación de Incentivos Tributarios y Fiscales	50
5.5	Plan de Implementación y Gestión de Riesgos	53
5.5.1	Análisis y Mitigación de Riesgos (Fase Previa)	53
5.5.2	Fase 1: Obras Preliminares y Adecuación Civil	54
5.5.3	Fase 2: Instalación Mecánica y Equipotencialización	54
5.5.4	Fase 3: Instalación Eléctrica	55
5.5.5	Fase 4: Pruebas, Puesta en Marcha y Legalización	55
6	Conclusiones y Recomendaciones	56
6.1	Conclusiones	56
6.2	Recomendaciones	56
	Referencias Bibliográficas	59

Lista de Tablas

	Pág.
1 Cuadro de cargas operativas bajo el escenario de ocupación al 50 %	22
2 Irradiación solar diaria promedio (kWh/m ² /día).	24
3 Estimación de potencia mensual generable para un sistema de 86.1 kWp.	24
4 Características eléctricas y mecánicas del módulo ZNShine 730W (STC)	29
5 Especificaciones técnicas de los inversores fotovoltaicos seleccionados	30
6 Resumen de la configuración eléctrica y topología de los subarreglos.	32
7 Protecciones Lado DC y referencias comerciales.	36
8 Protecciones Lado AC y referencias comerciales.	36
9 Datos meteorológicos mensuales suministrados por Meteonorm 8.2.	39
10 Indicadores principales de rendimiento energético (Resultados PVsyst).	40
11 Balance mensual de energía del Hotel Bari: Consumo base, autoconsumo y excedentes exportados.	41
12 Presupuesto estimado de implementación (CAPEX) y operación anual (OPEX).	45
13 Reducción proyectada del pago eléctrico mensual.	48
14 Proyección de flujo de caja a 25 años: Escenario sin adecuación estructural de cubierta.	49
15 Flujo de caja proyectado a 25 años: Escenario con elevación de paneles.	49
16 Resumen comparativo de Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) sin incentivos.	50
17 Matriz de beneficios tributarios aplicables según la Ley 1715 de 2014.	51
18 Flujo de caja con Incentivos (Escenario Solo Paneles).	52
19 Flujo de caja con Incentivos (Escenario con Adecuación de Techo).	52
20 Resumen comparativo final de Rentabilidad con Incentivos Tributarios.	53

Lista de Figuras

	Pág.
1 Foto satelital del hotel Bari	19
2 Perfiles de consumo horario - Enero Hotel Bari	20
3 Comparativa entre la simulación de perfil de consumo y matriz de consumo real. . .	23
4 Resultados del estudio de conexión simplificada emitido por la ESSA	25
5 Perspectiva arquitectónica de la cubierta superior del Hotel Bari	26
6 Sombreado y radiación en cubierta	27
7 Escenarios de distribución de módulos en cubierta	31
8 Sección transversal del diseño de montaje y soportes estructurales	31
9 Esquema de interconexión eléctrica de cadenas (strings) al inversor	33
10 Distribución en planta y lógica de conexiones del campo fotovoltaico.	33
11 Comparativo de facturación eléctrica mensual: Escenario base vs. Sistema de au- togenerated propuesto.	42
12 Modelos de estructuras de soporte y soluciones de montaje para sistemas elevados.	46

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

- Apéndice A.** Perfiles de Carga
- Apéndice B.** Simulación y Análisis de la Demanda
- Apéndice C.** Datos Meteorológicos NASA
- Apéndice D.** Precios y Cotizaciones
- Apéndice E.** Configuraciones Escogidas
- Apéndice F.** Simulaciones de PVsyst
- Apéndice G.** Reducción de Pago Eléctrico
- Apéndice H.** Datos Cruzados de PVsyst
- Apéndice I.** Reporte de PVsyst
- Apéndice J.** Presupuesto
- Apéndice K.** Flujo de Caja
- Apéndice L.** Simulación de PVsyst
- Apéndice M.** Diagrama Unifilar
- Apéndice N.** Archivo de Simulación de Sombreado (.pvprj)

GLOSARIO

Autoconsumo: Modalidad de generación en la cual la energía producida es utilizada directamente por el propio usuario para satisfacer su demanda interna.

Conexión a Red: Configuración técnica que permite al sistema fotovoltaico interactuar con la red de distribución eléctrica convencional para el intercambio de energía.

Corriente alterna (AC): Tipo de corriente eléctrica utilizada en los sistemas de distribución y consumo, caracterizada por la variación periódica de su magnitud y sentido (en Colombia, a una frecuencia de 60 Hz).

Corriente continua (DC): Tipo de corriente eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos, en la cual el flujo de electrones se mantiene en un solo sentido.

Efecto fotovoltaico: Fenómeno físico-químico en el que ciertos materiales semiconductores, al absorber fotones de la luz solar, liberan electrones y generan directamente una corriente eléctrica y una diferencia de potencial (Tensión).

Eficiencia energética: Optimización del uso de la energía eléctrica la cual busca obtener el máximo rendimiento con el menor consumo posible.

Energía Solar: Energía proveniente de la radiación emitida por el sol, aprovechable para la generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos.

HSP (Horas de sol pico): Unidad que mide la disponibilidad del recurso solar. Equivale al número de horas con una irradiancia hipotética constante de 1000 W/m².

Inversor On-Grid: Equipo electrónico de potencia que convierte corriente continua (DC) en corriente alterna (AC), sincronizando su salida con la tensión, frecuencia y fase de la red eléctrica.

Irradiación Solar: Cantidad de energía solar que incide sobre una superficie durante un periodo determinado, se expresa usualmente en kWh/m²/día o kWh/m²/año.

kWp (Kilovatio pico): Unidad de potencia que representa la capacidad máxima teórica que puede generar un sistema fotovoltaico bajo condiciones estándar de prueba.

Medidor Bidireccional: Equipo de medida técnica que registra tanto la energía consumida desde la red como los excedentes de energía inyectados a ella.

Módulo Fotovoltaico: Dispositivo compuesto por celdas de silicio interconectadas que transforma la radiación solar en energía eléctrica de corriente continua (DC).

Operador de red (OR): Entidad responsable de la planeación de la expansión, las inversiones, la operación y el mantenimiento de todo o parte de un sistema de transmisión regional (STR) o de un sistema de distribución local (SDL).

PVsys: Software de apoyo especializado para la simulación del recurso solar, análisis de sombreado y estimación de la producción energética.

PVSOL: Software especializado en la simulación tridimensional y análisis de sombras en sistemas fotovoltaicos.

Recurso Solar: Disponibilidad de radiación solar en una región determinada, evaluada a partir de datos climáticos históricos.

Sombras cercanas: Obstrucciones físicas (edificios, árboles, chimeneas) que reducen la radiación solar incidente sobre los módulos y afectan drásticamente el rendimiento del sistema.

Strings: Cadena o serie de paneles solares conectados eléctricamente en serie para sumar sus tensiones y alcanzar el rango operativo del inversor.

Resumen

Título: Diseño de un Sistema Fotovoltaico On-Grid para Autogeneración a Pequeña Escala en el Hotel Bari.

Autores: Luis Felipe Castellanos Ordoñez & Juan Felipe Sarmiento Dallos

Palabras clave: Autogeneración, Energía Solar Fotovoltaica, Eficiencia Energética, Infraestructura Eléctrica, Viabilidad Financiera.

Descripción: El presente proyecto aborda el diseño y la evaluación financiera de un sistema de generación fotovoltaica on-grid para el Hotel Bari en Bucaramanga. Este proyecto surge como una solución a la marcada dependencia de la red eléctrica convencional que, en conjunto con las altas tarifas operativas, genera importantes gastos asociados al funcionamiento continuo del establecimiento. La solución planteada a partir del diagnóstico del perfil de demanda eléctrica y la caracterización de la infraestructura permitió definir los parámetros del sistema. Debido a la escasa superficie útil para ser utilizada en la cubierta y las sombras críticas provocadas por elementos arquitectónicos, el diseño de elevar la estructura provoca que se optimice la captación de irradiancia a partir de módulos solares aumentando el rendimiento. El cálculo del comportamiento energético se llevó a cabo con el uso de software específico (PVsyst), asegurando así la viabilidad técnica de la generación. La ingeniería de detalles fue llevada a cabo bajo el cumplimiento del marco normativo colombiano (RETIE, NTC 2050 y regulaciones CREG). Por último, se ejecutó un modelo financiero incluyendo los incentivos tributarios establecidos bajo la Ley 1715, observando que la implementación del sistema reduce drásticamente la facturación mensual, minimiza la huella de carbono y genera indicadores de rentabilidad que resultan muy favorables dentro del sector.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Manuel José Ortiz Rangel. Magíster en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Design of an On-Grid Photovoltaic System for Small-Scale Self-Generation at Hotel Bari.

Authors: Luis Felipe Castellanos Ordoñez & Juan Felipe Sarmiento Dallos

Keywords: Self-Generation, Solar Photovoltaic Energy, Energy Efficiency, Electrical Infrastructure, Financial Viability.

Description: This project addresses the technical design and financial evaluation of a grid-tied photovoltaic generation system for Hotel Bari in Bucaramanga. It emerges as a solution to the high dependence on the conventional electrical grid which, combined with high operational tariffs, generates significant expenses associated with the continuous operation of the establishment. The proposed solution was developed based on a diagnosis of the electrical demand profile and infrastructure characterization, which allowed for the definition of the system parameters. Due to the limited useful area on the roof and critical shadows cast by architectural elements, an elevated structure design was implemented to optimize irradiance capture through solar modules, thereby increasing overall performance. Energy yield calculations were performed using specialized software (PVsyst), ensuring the technical viability of the generation system. Detailed engineering was carried out in strict compliance with the Colombian regulatory framework (RETIE, NTC 2050, and CREG regulations). Finally, a financial model was executed, incorporating the tax incentives established under Law 1715. The results indicate that the system's implementation drastically reduces monthly billing, minimizes the carbon footprint, and generates profitability indicators that are highly favorable within the sector.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: Manuel José Ortiz Rangel. Master in Electrical Engineering.

Introducción

El consumo energético en el sector hotelero representa uno de los mayores desafíos operativos para la industria de servicios, impulsado por la demanda continua de equipos de climatización, calentamiento de agua y redes de iluminación y otros. En el caso específico del Hotel Bari, ubicado en la ciudad de Bucaramanga, este escenario se evidencia a través de una dependencia total de la red de distribución comercial. Con tarifas que rondan los 784 a 884 COP/kWh dependiendo del mes y la escasez de generación energética, esta exclusividad con la red convencional se traduce en facturaciones mensuales que oscilan entre los 19 y 32 millones de pesos. Y al depender de una matriz energética nacional con una gran dependencia de fuentes hidroeléctricas cercanas al 70% de la energía producida en Colombia, los costos operativos por energía del hotel enfrentan una variabilidad ante fenómenos climáticos e incrementos tarifarios.

A pesar de que el hotel cuenta con una cubierta de 443.7 m² —cuya área útil se ve significativamente reducida por las sombras proyectadas por obstáculos arquitectónicos— y se ubica en una zona geográfica con una irradiación solar promedio de 5.0 kWh/m² al día, el establecimiento actualmente carece de la infraestructura que permita aprovechar este recurso renovable. Frente a esta necesidad, surge la pregunta de este proyecto: ¿En qué medida el diseño de un sistema fotovoltaico on-grid bajo el marco normativo colombiano permite reducir el gasto energético y mitigar la dependencia eléctrica del Hotel Bari? La integración de tecnologías de autogeneración fotovoltaica se muestra como una solución para mitigar esta carga operativa. Por el lado financiero, este proyecto proyecta indicadores de rentabilidad altamente atractivos, con una TIR estimada entre el 20% y el 60% dependiendo del escenario, y un periodo de recuperación de la inversión de 2 a 5 años, adicionalmente con los incentivos fiscales y deducciones de renta estipulados en la legislación nacional para energías limpias.

En términos comerciales y ambientales, dar este paso hacia la transición energética reduce de manera directa las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto representa una ventaja competitiva importante, sobre todo si consideramos que, de acuerdo con la plataforma Booking, más del 70% de los turistas priorizan alojamientos con prácticas sostenibles. Partiendo de esta premisa, el objetivo general de este trabajo de grado es diseñar el sistema fotovoltaico on-grid y estructurar su plan de implementación bajo el cumplimiento de

la normativa colombiana (RETIE, NTC 2050 y resoluciones de la CREG). El desarrollo del proyecto abarca desde el diagnóstico del perfil de carga y el dimensionamiento de los equipos —sorteando las restricciones físicas de la cubierta— hasta la evaluación de su viabilidad financiera utilizando indicadores como la TIR y el VPN. Es clave precisar que el alcance de la investigación llega exclusivamente hasta las etapas de diseño y evaluación, por lo que no incluye la instalación de la obra física en el hotel.

El panorama nacional demuestra que este tipo de proyectos ya son una realidad completamente viable. En los últimos años, la adopción de energía solar en Colombia ha tomado mucha fuerza, especialmente dentro del sector hotelero. Un gran referente de esto es el Hotel Richmond Suites en Bogotá, que logró convertirse en el primero de la capital en ser autosuficiente: hoy generan el 125 % de su consumo eléctrico y evitan la emisión de 65 toneladas de CO₂ al año. Otro caso clave es el Hotel Sánha Plus en Santa Marta, donde la instalación de un arreglo de 140 kWp les permite cubrir el 30 % de su demanda, logrando así un recorte en sus gastos operativos superior al 25 %.

Fuera del sector hotelero, esta tecnología también ha probado su eficacia en infraestructuras. Un ejemplo de esto es el Hospital San Carlos en el Huila, donde instalaron un sistema de autogeneración total que no solo asegura la continuidad del servicio médico, sino que les deja ahorros por más de \$150.000.000 de pesos al año. En el sector educativo, la Universidad del Quindío implementó un sistema on-grid que, además de abastecer el campus, funciona como un laboratorio vivo para la enseñanza y la recolección de datos técnicos. Ver que estas iniciativas ya operan con éxito en el país —apalancadas fuertemente por los beneficios tributarios vigentes— nos da la certeza de que la autogeneración es un camino seguro y rentable. Justamente, evaluar estos casos reales nos sirvió como punto de partida para estructurar nuestro diseño y confirmar que adaptar esta solución energética a las necesidades del Hotel Bari es una decisión completamente acertada.

Capítulo 1

Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema fotovoltaico on-grid para autoconsumo en el Hotel Bari (Bucaramanga) y un plan de implementación conformes con la normativa colombiana vigente.

1.2 Objetivos Específicos

- 1) Analizar el perfil de consumo energético del Hotel Bari y las condiciones técnicas del sitio de instalación, incluyendo planos eléctricos, memoria de cálculo.
- 2) Dimensionar el sistema fotovoltaico on-grid considerando irradiación, orientación, tipo de módulo y espacio disponible.
- 3) Evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema con base en indicadores de rentabilidad (TIR, VPN, payback).

Capítulo 2

Marco Referencial y Normativo

2.1 Marco Teórico (Fundamentos de energía solar fotovoltaica, sistemas on-grid)

1. Fundamentos de la Energía Solar Fotovoltaica: La generación fotovoltaica se basa en la conversión directa de la radiación electromagnética en corriente continua (DC) mediante materiales semiconductores, principalmente el silicio. Su rendimiento depende críticamente de la irradiancia solar incidente y la eficiencia de los módulos. En el caso de Bucaramanga, los registros de NASA POWER indican una irradiación promedio de 5,0 kWh/m²/día. Esta alta disponibilidad del recurso permite proyectar un sistema de alta densidad energética para el Hotel Bari, donde la optimización de la inclinación y orientación será clave para maximizar la captación en los 443,7 m² de cubierta útil disponible.

2. Arquitectura de Sistemas On-Grid y Autogeneración (AGPE): Un sistema fotovoltaico On-Grid

o conectado a la red se define por su capacidad de interactuar sincrónicamente con el Sistema Interconectado Nacional (SIN) sin necesidad de bancos de almacenamiento electroquímico. En esta configuración, el componente central es el inversor de red, el cual realiza la conversión de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) y gestiona el punto de máxima potencia (MPPT) para asegurar que los módulos operen en su eficiencia óptima bajo diversas condiciones de nubosidad. Bajo la normativa colombiana, este proyecto se clasifica como Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE), un esquema que permite al usuario priorizar el autoconsumo para reducir costos operativos —que en el caso del Hotel Bari ascienden a facturas de entre 28 y 32 millones de pesos mensuales— y entregar los excedentes a la red de distribución local.

2.2 Marco Normativo Colombiano

La viabilidad de los proyectos de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) en Colombia no se limita a la disponibilidad del recurso primario, sino que está intrínsecamente ligada a la robustez de su marco regulatorio. Para el Hotel Bari, cuya carga operativa mensual por consumo eléctrico oscila entre 28 y 32 millones de pesos, el diseño de un sistema fotovoltaico trasciende la solución técnica para convertirse en un modelo de optimización financiera. Este marco normativo establece las fronteras operativas, los criterios de seguridad eléctrica y los mecanismos de viabilidad económica que permiten transformar al usuario de un consumidor pasivo a un agente prosumidor dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

2.2.1 Ley 1715 de 2014 y Ley 2099 de 2021

- **Ley 1715 de 2014:** Declaró las energías renovables de utilidad pública, rompió el monopolio de generación al habilitar el autoconsumo comercial, y creó el primer paquete de beneficios tributarios.
- **Ley 2099 de 2021 (Transición Energética):** Modernizó la normativa anterior extendiendo la deducción de renta a 15 años, agilizó la tramitología ante la UPME, y exigió la implementación de medidores avanzados (AMI), indispensables para la inyección de excedentes a la red.

2.2.2 Resoluciones CREG (030, 135, 174)

Mientras las leyes establecen el derecho a generar energía, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) dicta el cómo operativo a través de sus resoluciones.

CREG 030 de 2018: Fue la primera gran regulación que estructuró las condiciones para la Autogeneración a Pequeña Escala (sistemas con capacidad instalada inferior a 1 MW). Definió los procesos técnicos de conexión y sentó las bases para la venta de energía de los prosumidores.

CREG 135 de 2021: Introdujo modificaciones transitorias y ajustes técnicos específicos sobre las fronteras comerciales y los equipos de medida, preparando el terreno para una regulación más simplificada.

CREG 174 de 2021: Es la resolución definitiva que compila, reemplaza y simplifica a las anteriores. Para el sistema del Hotel Bari (86.1 kWp), esta resolución es crítica porque reglamenta un proceso de conexión expedito para sistemas menores a 100 kW y define el esquema de medición neta. Establece matemáticamente cómo el operador de red debe valorar y descontar de la factura la energía que el hotel inyecte durante los picos de producción solar, optimizando directamente el flujo de caja del proyecto.

2.2.3 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) es la normativa obligatoria del Ministerio de Minas y Energía encargada de garantizar la seguridad integral de los sistemas eléctricos. Para este diseño fotovoltaico, el reglamento exige el uso exclusivo de componentes (como paneles e inversores) que posean un certificado de conformidad avalado por el ONAC. Además, rige de manera estricta el diseño del sistema de puesta a tierra, la selección de protecciones contra sobretensiones (DPS), el respeto de las distancias de seguridad en la cubierta y la obligatoriedad de aprobar una inspección técnica certificada previo a la energización por parte del operador de red.

2.2.4 Norma Técnica Colombiana NTC 2050

Complementando los lineamientos de seguridad del RETIE, la NTC 2050 (Código Eléctrico Colombiano) rige la ingeniería de detalle a través de su Sección 690, exclusiva para sistemas fotovoltaicos. Esta norma, basada en el *National Electrical Code* (NEC), establece los parámetros matemáticos para el dimensionamiento seguro de la instalación: determina la ampacidad de los conductores, los factores de corrección térmica para la cubierta, la ocupación de ductos y la coordinación de protecciones. Su estricta aplicación en

el diseño es fundamental para minimizar las caídas de tensión, garantizar la eficiencia del arreglo de 86.1 kWp y prevenir fallas por fatiga térmica en el cableado.

Capítulo 3

Diagnóstico Energético y Análisis del Sitio

El diagnóstico inicial establece la línea base técnica y operativa del establecimiento, permitiendo identificar las oportunidades de ahorro y las limitaciones físicas para la integración de la tecnología fotovoltaica.

3.1 Descripción de la Instalación (Hotel Bari)

El Hotel Bari se localiza en Cra. 38 #48-66, Cabecera del Llano, Bucaramanga, Santander, Colombia. La infraestructura consta de una edificación de uso comercial que tiene 66 habitaciones, tres ascensores, áreas de restaurante, co-working y 3 salones. Actualmente, el hotel presenta una dependencia absoluta del Sistema Interconectado Nacional (SIN), sin contar con sistemas de autogeneración o gestión energética avanzada.

Figura 1

Foto satelital del hotel Bari



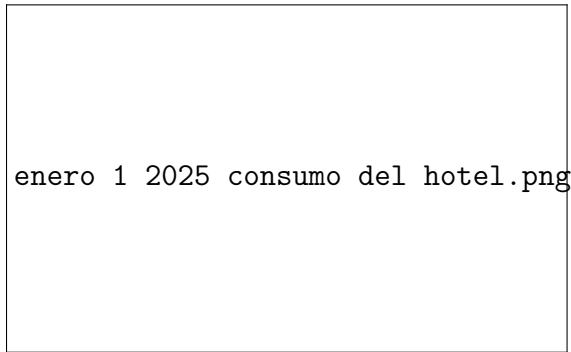
FOTO SATELITAL DEL HOTEL BARI .png

3.2 Análisis del Perfil de Consumo Eléctrico

A partir de la consolidación de la matriz de consumo horario original suministrada por el hotel (**Anexo A**). El análisis gráfico de la matriz evidencia un comportamiento atípico en el consumo energético por esto mismo se toma el mes de enero y de aquí se observa el consumo del hotel. A continuación veremos las gráficas de consumo de enero en ciertos días (**Apéndice A**).

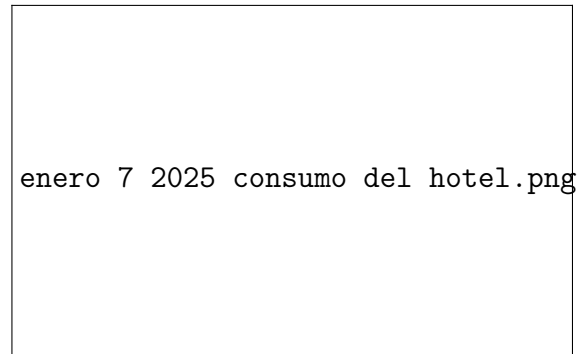
Figura 2

Comparativa de perfiles de consumo horario durante el primer mes para el Hotel Bari.



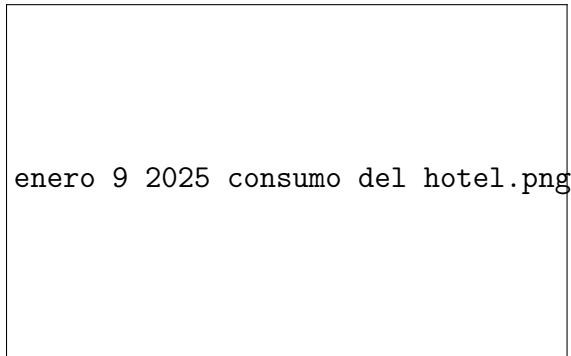
(a)

Perfil de carga - Enero 1 2025



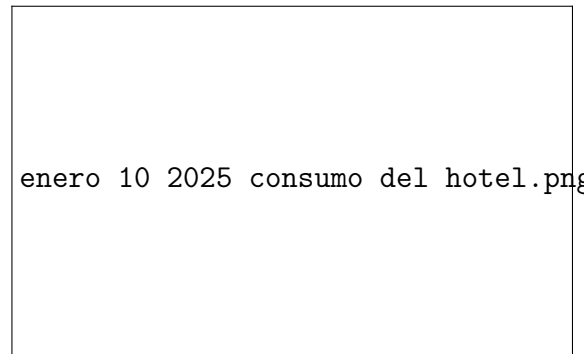
(b)

Perfil de carga - Enero 7 2025



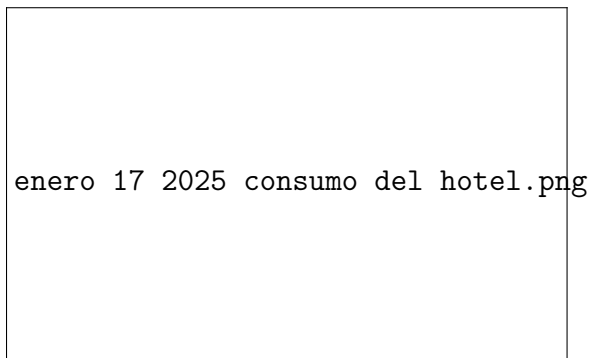
(c)

Perfil de carga - Enero 9 2025



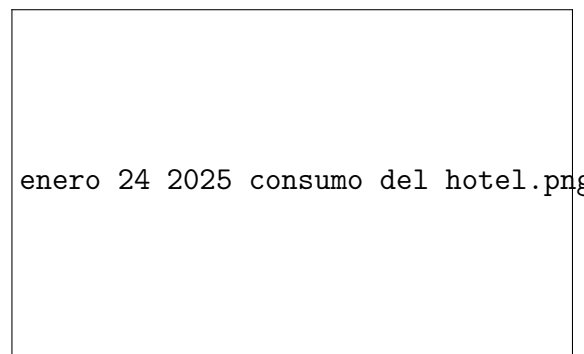
(d)

Perfil de carga - Enero 10 2025



(e)

Perfil de carga - Enero 17 2025



(f)

Perfil de carga - Enero 24 2025

Como se evidencia en los perfiles de carga precedentes, el comportamiento energético de la instalación

difiere del patrón de consumo tradicional del sector turístico. Esta particularidad obedece a su vocación de hotel ejecutivo y corporativo, lo cual supone una dinámica de actividad continua. Asimismo, dada su capacidad instalada —que comprende 66 habitaciones y áreas de co-working, todas equipadas con sistemas de climatización independientes—, el requerimiento térmico y eléctrico experimenta su pico máximo de demanda predominantemente durante las franjas horarias nocturnas y de madrugada.

El análisis del perfil de carga simulado revela una marcada falta de simultaneidad entre la curva de generación fotovoltaica y la curva de demanda del Hotel Bari. Mientras que la máxima producción del arreglo solar de 86.1 kWp ocurre en la franja meridiana (10:00 a 14:00 horas), el requerimiento energético de las instalaciones alcanza su pico máximo durante el horario nocturno (18:00 a 03:00 horas), impulsado por la activación de los sistemas de climatización y el consumo de los usuarios en áreas comunes.

Dado que el pico de demanda energética del hotel se presenta en horario nocturno, la implementación de un banco de baterías para cubrir dicha carga resulta financieramente prohibitiva por su severo impacto en el CAPEX. Por tal motivo, la alternativa técnica seleccionada es una topología On-Grid amparada en la reglamentación para la Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE). Este esquema prescinde de acumuladores físicos y utiliza la red de distribución de ESSA como respaldo; de este modo, se inyectan los excedentes de los 86.1 kWp durante el día y se compensa económicamente el alto consumo nocturno mediante el medidor bidireccional, asegurando la rentabilidad global del proyecto.

Con el propósito de evaluar la resiliencia del sistema frente a fluctuaciones operativas, se plantea un escenario de análisis de sensibilidad asumiendo una tasa de ocupación hotelera del 50 %. En esta configuración, si bien la carga base de las áreas comunes (recepción, iluminación exterior, bombeo y refrigeración comercial) se mantiene relativamente constante, la carga variable de las habitaciones tiene cierta incertidumbre con los dispositivos de climatización, los televisores y el uso general de la habitación.

No obstante, es imperativo precisar que el perfil de carga bajo ocupación parcial conlleva un margen de incertidumbre inherente. El consumo eléctrico en el sector hotelero posee una naturaleza estocástica; es decir, está supeditado al comportamiento probabilístico de los huéspedes. Por consiguiente, la gráfica de

demanda al 50 % no representa una reducción lineal exacta, sino una franja de consumo esperado donde la rampa de demanda nocturna se suaviza, optimizando la capacidad de los excedentes solares exportados durante el día para compensar la facturación neta mensual. El detalle de cómo se tomaron las cargas de cada uno de los aparatos del hotel se encuentra en el **Apéndice B**

Tabla 1

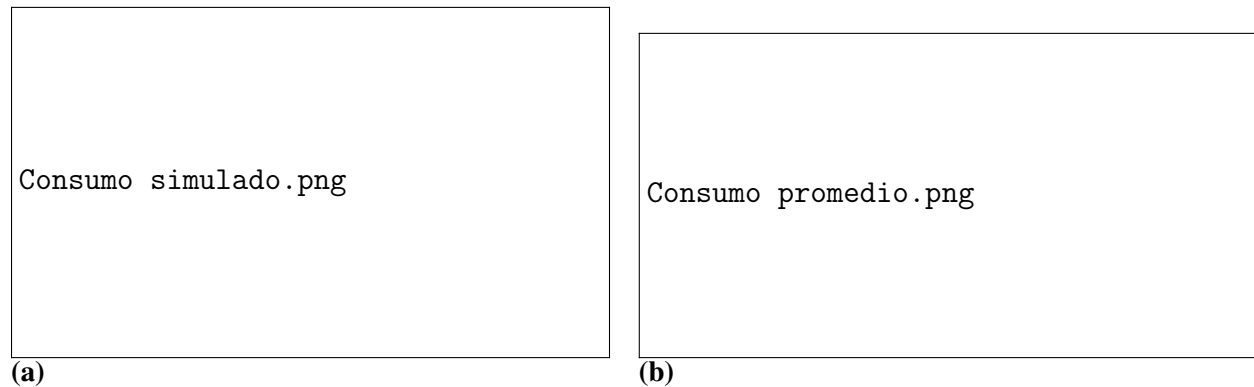
Cuadro de cargas operativas bajo el escenario de ocupación al 50 %.

Aparato	Pot. Unitaria [kW]	Instalados	Usados	Subtotal [kW]
Neveras (Minibar)	0.0245	66	33	0.8112
Aire acondicionado hab. 9000 BTU	0.9545	66	33	31.4985
Aire acondicionado zonas comunes	2.1500	7	4	8.6000
Televisores	0.0400	66	33	1.3200
Computadores administrativos	0.3000	6	6	1.8000
Consumos indep. por habitación	0.3000	66	33	9.9000
Iluminación pasillos	0.0200	12	12	0.2400
Nevera industrial	0.2000	3	3	0.6000
Congelador	0.1000	2	2	0.2000
Cámaras de seguridad	0.0100	40	40	0.4000
Iluminación habitaciones	0.0500	66	30	1.5000
Iluminación zonas comunes	3.0000	1	1	3.0000
Iluminación parqueadero	0.4000	1	1	0.4000
Ascensores	2.5000	3	3	7.5000
Carga Total Simultánea (Escenario 50 %):				67.7697

Nota. Los valores de potencia unitaria corresponden a condiciones nominales de operación de cada equipo. BTU: British Thermal Unit. La columna “Usados” refleja el 50 % de ocupación hotelera asumido para este escenario de análisis de sensibilidad.

Figura 3

Comparativa entre la simulación de perfil de consumo y matriz de consumo real.



Simulación de perfil de consumo [KW].

Promedio anual de la matriz de consumo [KW].

Es completamente previsible que los valores exactos de la demanda simulada al 50% de ocupación no coincidan a la perfección con los registros históricos, ya que aquí entra en juego el impredecible factor humano. Las costumbres de los huéspedes, la hora a la que llegan a sus habitaciones o cómo ajustan el aire acondicionado le dan vida al consumo del hotel y añaden cierta variabilidad natural a los cálculos. Aun así, la visión panorámica de la gráfica nos confirma que el modelo captura la esencia del problema: sigue marcando un claro valle durante el día y el característico pico de demanda nocturno. Gracias al análisis de las cargas simuladas, es posible trazar un perfil eléctrico teórico basado en los equipos instalados. Al cruzar este modelo analítico con el consumo real, se nota cómo la curva teórica se adapta fielmente a la rutina del lugar. Un detalle de gran interés es que el Hotel Bari no consume energía como lo haría un alojamiento vacacional o convencional. Al tener un perfil netamente ejecutivo, sus huéspedes pasan muchas más horas operando dentro de las instalaciones, lo que le otorga a su demanda eléctrica un comportamiento atípico pero muy bien definido.

3.3 Evaluación del Recurso Solar en Bucaramanga

"La evaluación del recurso solar en Bucaramanga se estructuró a partir del análisis de bases de datos meteorológicas históricas de la NASA POWER. Para consolidar un modelo de generación confiable, se tabularon los promedios mensuales de irradiación correspondientes a periodos de 5, 10, 20 y 25 años (2001-2025). Esta estratificación temporal permite evaluar la estabilidad del recurso y seleccionar el escenario

climatológico más representativo para el diseño del generador fotovoltaico y ver si es viable. (Apéndice C)

Tabla 2

Irradiación solar diaria promedio (kWh/m²/día).

Mes	2001-2025	20 Años	10 Años	5 Años
Enero	5.3890	5.3576	5.4018	5.5361
Febrero	5.5216	5.4857	5.5958	5.5716
Marzo	5.0658	5.0272	5.0924	5.1431
Abril	4.7810	4.7878	4.7917	4.7545
Mayo	4.9261	4.9100	4.9505	4.9851
Junio	5.0718	5.0513	4.9964	4.8805
Julio	5.2932	5.2988	5.3436	5.2769
Agosto	5.3485	5.3199	5.4200	5.3133
Septiembre	5.2334	5.2646	5.2571	5.2895
Octubre	4.8204	4.8264	4.8503	4.8753
Noviembre	4.5452	4.5235	4.4509	4.4804
Diciembre	4.8963	4.9405	5.0707	4.9866

Nota. Datos extraídos de la base de datos satelital NASA POWER para la ubicación del Hotel Bari en Bucaramanga. Los períodos de análisis permiten evaluar la estabilidad y tendencia del recurso solar disponible.

Tabla 3

Estimación de potencia mensual generable para un sistema de 86.1 kWp.

Mes	2001-2025	20 Años	10 Años	5 Años
Enero	464.2064	461.5036	465.3140	476.8826
Febrero	475.6321	472.5374	482.0191	479.9350
Marzo	436.3669	433.0435	438.6580	443.0244
Abril	411.8370	412.4202	412.7612	409.5540
Mayo	424.3356	422.9440	426.4333	429.4139
Junio	436.8867	435.1164	430.3864	420.4092
Julio	455.9569	456.4390	460.3011	454.5538
Agosto	460.7179	458.2603	466.8755	457.6908
Septiembre	450.8079	453.4888	452.8485	455.6410
Octubre	415.2320	415.7449	417.8061	419.9546
Noviembre	391.5247	389.6517	383.4030	385.9435
Diciembre	421.7710	425.5766	436.7859	429.5422

Nota. Valores expresados en kWh/mes. La estimación se obtiene multiplicando la irradiación diaria promedio por la potencia instalada del sistema (86.1 kWp) y los días de cada mes, considerando un rendimiento global del sistema.

3.4 Caracterización del Sistema de Distribución (ESSA) y comercializador Ruitoque Energía

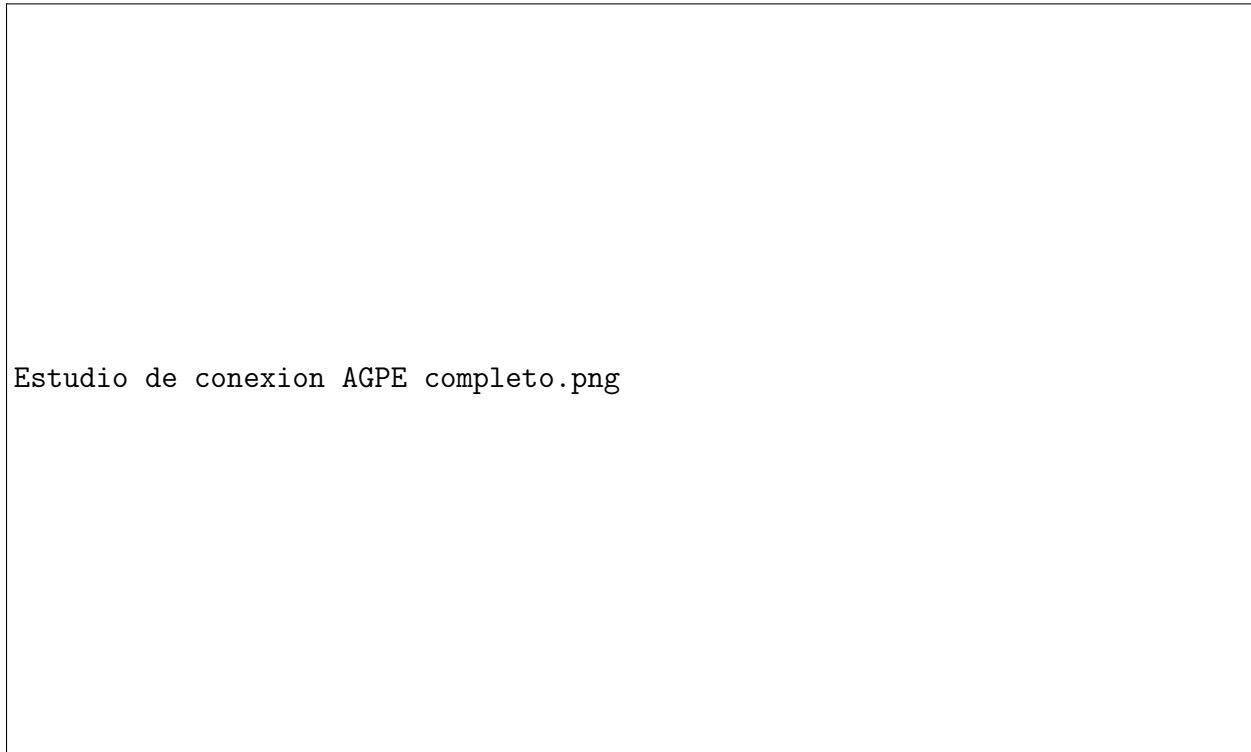
De acuerdo con la información que se obtuvo de la facturación del comercializador Ruitoque Energía, en el punto de conexión de la Subestación CONUCOS. El sistema presenta las siguientes especificaciones regulatorias:

- **Nivel de Tensión de Conexión:** Se realiza en media tensión a 13.2 kV, lo cual corresponde al Nivel de Tensión 2. Esto se debe a que el complejo se vincula físicamente a la red de distribución primaria de la ESSA.

- **Nivel de Tensión de Frontera:** Se define en Nivel de Tensión 1 220V (Baja Tensión), dado que el sistema de medición comercial (Frontera Comercial) se encuentra ubicado en el lado secundario del transformador.

Figura 4

Resultados del estudio de conexión simplificada emitido por la ESSA



De acuerdo con los resultados del Estudio de Conexión Simplificado emitido por la ESSA para el nodo del Hotel Bari:

- **Estado de Carga:** El transformador (ID 0470166) presenta actualmente una ocupación nula por activos de autogeneración, lo que permite la integración del sistema proyectado sin restricciones de saturación en la subestación.
- **Capacidad Disponible:** Se dispone de un margen de 150 kW para la conexión de sistemas de autogeneración, lo cual valida la factibilidad técnica para el arreglo de 86.1 kWp.

- **Cumplimiento Normativo:** Estas condiciones garantizan el cumplimiento de la Resolución CREG 174 de 2021, la cual establece que la potencia del sistema AGPE no debe superar el 50% de la capacidad nominal del transformador (150 kW de límite para un transformador de 300 kVA) para asegurar la estabilidad de la red de baja tensión.

3.5 Caracterización de Áreas Útiles

Al evaluar la infraestructura existente del hotel (ver Figura 5), se identificó que el área disponible sobre la cubierta es insuficiente para cubrir parte de la demanda energética proyectada. El análisis de disposición espacial determinó una capacidad máxima de solo 58 módulos en esta zona. Sin embargo, como se observa en el mapa de sombreado (ver Figura 6), la proximidad de los cuartos de máquinas y muros perimetrales genera una afectación crítica sobre el arreglo. Debido a estas restricciones físicas y energéticas, se optó por el diseño de una estructura elevada. Esta solución permite sobrepasar los obstáculos arquitectónicos, eliminando las pérdidas por sombra proyectada y habilitando el área necesaria para la instalación del sistema completo.

Figura 5

Perspectiva arquitectónica de la cubierta superior del Hotel Bari

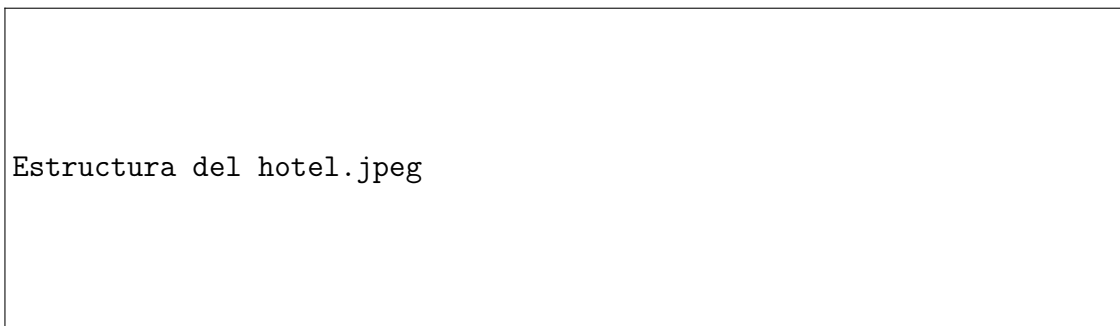
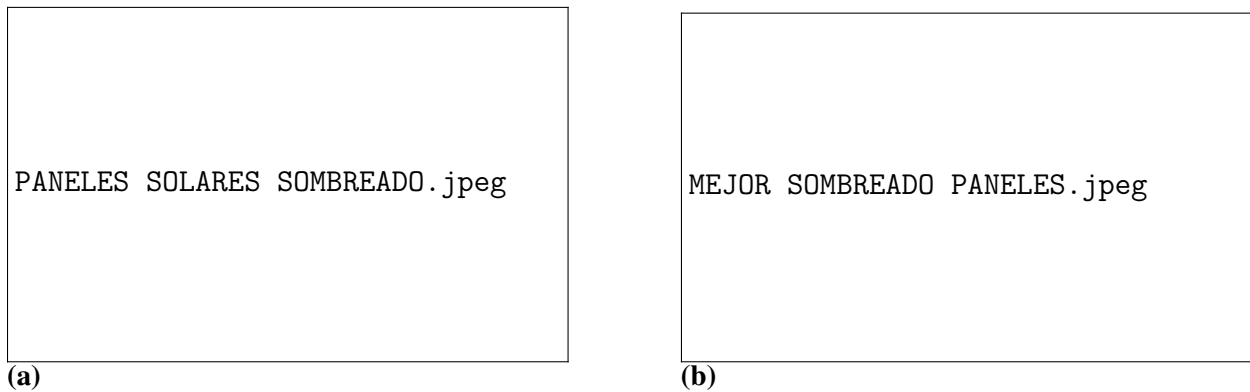


Figura 6

Comparativa entre las disposiciones de sombreado y el análisis de radiación en la cubierta.



Mapa de pérdidas con sombreado con todos los paneles.

Mapa de pérdidas por sombreado con mejor disposición de paneles.

3.5.1 Justificación de la Elevación de la Estructura

La configuración del montaje sobre una estructura elevada no responde únicamente a criterios de inclinación, sino que es una solución técnica necesaria frente a las restricciones del entorno. Se ha determinado esta elevación debido a los siguientes factores críticos:

- **Mitigación de Sombras por Obstáculos Físicos:** El análisis de sombreado reveló que las estructuras colindantes y la volumetría del propio edificio proyectan sombras significativas sobre el nivel de la cubierta en diversas horas del día. Al elevar el plano de captación, se logra desplazar el área de incidencia de estas sombras, recuperando superficie que de otro modo sería técnicamente inviable.
- **Maximización del Área Útil:** Gracias a la elevación, se minimizan las distancias de retroceso (keep-out zones) respecto a los muros y edificios vecinos, permitiendo una mayor densidad de módulos por metro cuadrado sin comprometer la eficiencia energética del arreglo.
- **Desempeño Eléctrico:** Al evitar que las sombras alcancen las celdas inferiores de los módulos, se previene la activación constante de los diodos de bypass y el efecto de "punto caliente" (hotspot), protegiendo la integridad del sistema y optimizando el punto de máxima potencia (MPPT) del inversor.

Capítulo 4

Diseño y Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

4.1 Criterios de Selección de Componentes

La selección de los equipos principales del sistema fotovoltaico (módulos e inversores) se fundamenta en un análisis técnico-económico diseñado para garantizar la operabilidad, la viabilidad financiera y la precisión de los estudios previos. Para este fin, se han establecido los siguientes cuatro criterios rectores:

- **Compatibilidad de Modelado Computacional:** Es un requisito estricto que los componentes evaluados formen parte de la base de datos oficial del software PVsyst, contando con sus respectivos archivos de caracterización paramétrica de fabricante (.PAN para módulos fotovoltaicos y .OND para inversores).
- **Disponibilidad en el Mercado Nacional:** Los equipos deben contar con representación comercial, distribuidores autorizados y cadena de suministro en Colombia. Este criterio busca mitigar los riesgos de sobrecostos y retrasos por logística de importación, asegurar respuestas ágiles en temas de garantías y, de manera crítica, garantizar que los equipos cuenten con los certificados de conformidad vigentes exigidos por el RETIE.
- **Acople Directo a la Tensión de Red:** Las características de salida en corriente alterna (AC) de los inversores deben coincidir de forma nativa con los niveles de tensión del punto de acoplamiento común (220 V).
- **Relación Costo-Beneficio:** Se prioriza la integración de tecnologías que ofrezcan el menor costo específico por unidad de potencia (COP/Wp) sin comprometer los estándares de calidad industrial. El objetivo de este criterio es optimizar el presupuesto de capital (CAPEX) para maximizar los indicadores como la TIR y el VPN.

Para observar de qué manera incidieron estos parámetros en la toma de decisiones, cuyos resultados y ponderaciones se encuentran en el (Apéndice D)

4.1.1 Paneles Fotovoltaicos

Tras llevar a cabo una matriz de evaluación técnica y comercial que contempló más de 20 referencias de diversos fabricantes, del cual se optó por la opción más económica en el país, se seleccionó el módulo fotovoltaico ZNShine Solar de 730 W (tecnología monocristalina bifacial). Esta elección obedece al cumplimiento estricto de los criterios de diseño estipulados para el proyecto. La ficha técnica de este panel solar está en el **Anexo B**.

Tabla 4

Características eléctricas y mecánicas del módulo ZNShine 730W (STC)

Parámetro	Valor Técnico
Modelo	ZXM8-GPLDD132-730
Potencia Máxima (P_{max})	730 W
Voltaje en Circuito Abierto (V_{oc})	49.50 V
Corriente de Cortocircuito (I_{sc})	18.51 A
Voltaje a Máxima Potencia (V_{mp})	41.70 V
Corriente a Máxima Potencia (I_{mp})	17.51 A
Eficiencia del Módulo (η)	23.50 %
Peso	38.5kg
Dimensiones	2384 × 1303 × 33 mm
Tecnología	Monocristalino Bifacial (N-Type)

Nota. Valores medidos bajo Condiciones Estándar de Prueba (STC: Standard Test Conditions): irradiancia de 1000 W/m², temperatura de celda de 25°C y masa de aire AM 1.5. P_{max} : Potencia máxima. V_{oc} : Voltaje en circuito abierto. I_{sc} : Corriente de cortocircuito. V_{mp} : Voltaje a máxima potencia. I_{mp} : Corriente a máxima potencia. η : Eficiencia del módulo.

4.1.2 Inversores y Sistemas de Conversión o Inversores Fotovoltaicos y Acople a Red

La selección de los inversores se realizó bajo una arquitectura de múltiples unidades para optimizar la gestión de energía y la redundancia del sistema. Se seleccionaron equipos de las marcas Growatt y Fronius, priorizando la operabilidad mediante la estandarización de sus parámetros de salida en corriente alterna

(AC). Las fichas técnica de los inversores están en el(Anexo C).

Tabla 5

Especificaciones técnicas de los inversores fotovoltaicos seleccionados

Parámetro	Growatt	Fronius
Modelo	MAC 30KTL3-XL2	Tauro ECO 50-3-D 208-220
Potencia Nominal CA	30 kW	50 kW
Máxima Potencia FV (DC)	45 kWp	75 kWp
Tensión de Salida L-L	220 V	220 V
Corriente Nominal CA	78.7 A	131.2 A
Número de MPPT	3	1 (Centralizado)
Eficiencia Máxima	98.8 %	97.2 %
Protección (IP)	IP66	IP65
Acople a Red (ESSA)	Directo	Directo

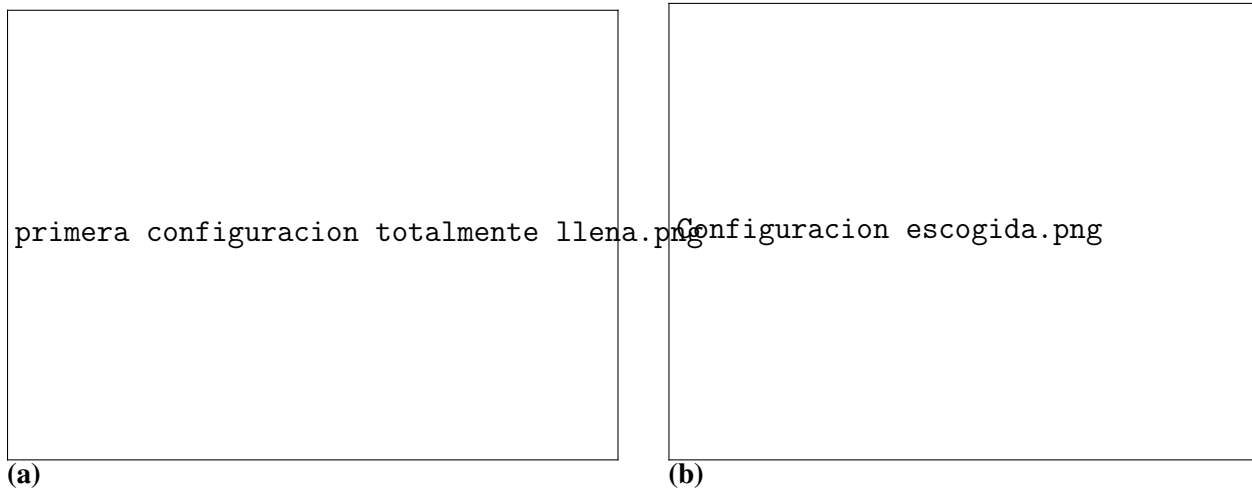
Nota. CA: Corriente Alterna. DC: Corriente Continua. FV: Fotovoltaico. MPPT: Seguidor del Punto de Máxima Potencia (Maximum Power Point Tracking). IP: Índice de Protección según norma IEC 60529. L-L: Tensión de línea a línea. ESSA: Empresa de Energía de Santander S.A. Ambos inversores cumplen con los requisitos de conexión a red establecidos por la Resolución CREG 174 de 2021.

4.2 Configuración del Arreglo Fotovoltaico

Para la configuración del arreglo fotovoltaico, el proceso de diseño inició determinando la cantidad máxima de módulos admisibles sobre la cubierta. A partir de este límite teórico, se optimizó la distribución espacial para garantizar la viabilidad de las labores de mantenimiento. En consecuencia, se dispusieron los paneles en orientación paisaje, estableciendo separaciones longitudinales de 90 cm y pasillos. En el (**Apéndice E**) se observa mejor como fuimos descartando caso por caso desde llenar completamente el area util hasta ir descartando configuraciones por estas tener menos potencia instalada.

Figura 7

Análisis comparativo de escenarios de distribución de módulos en cubierta.



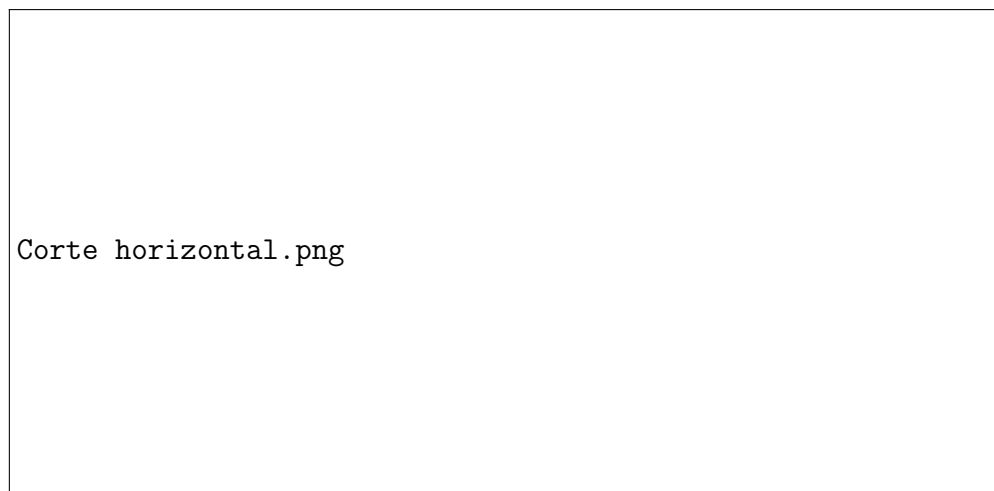
Configuracion totalmente llena.

Configuracion escogida.

Complementando la vista en planta, se desarrolló un corte transversal del arreglo fotovoltaico para analizar su disposición vertical. Como se observa en el perfil, los módulos se configuraron con un ángulo de inclinación de 8° . Adicionalmente, las estructuras de soporte se diseñaron con un escalonamiento progresivo en sus alturas, compensando la geometría del techo y mitigando las pérdidas por sombreado mutuo entre las filas.

Figura 8

Sección transversal del diseño de montaje y soportes estructurales



4.2.1 Topología de Conexión de los Paneles Eléctricos

La topología de conexión eléctrica de los paneles se estructuró a partir de los límites operativos del equipo de conversión (inversores). Para determinar la cantidad óptima de módulos conectados en serie por cadena (string), se estableció como restricción principal que la sumatoria del voltaje en circuito abierto (V_{oc}) de los módulos, ajustado a la temperatura mínima histórica del sitio, no debe exceder la tensión máxima de entrada en corriente continua (DC) soportada por el inversor. Asimismo, el arreglo en serie debe garantizar que el voltaje a máxima potencia (V_{mp}) permanezca dentro de la ventana operativa del seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).

Para garantizar el acople óptimo entre la capacidad de los módulos y las ventanas de tensión de los equipos de conversión, el arreglo fotovoltaico se sectorizó en tres subsistemas operativos. La topología final de conexión se define de la siguiente manera:

Tabla 6

Resumen de la configuración eléctrica y topología de los subarreglos.

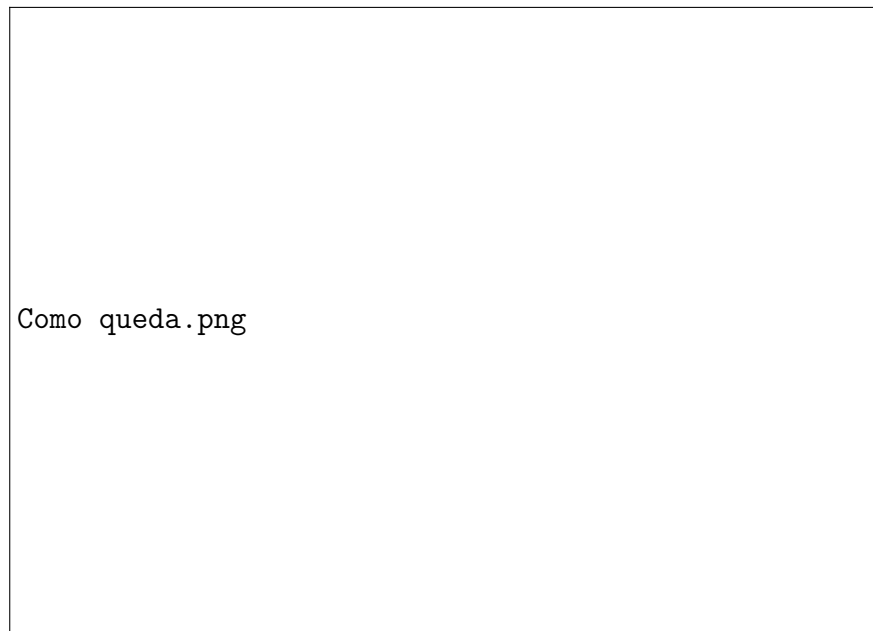
Subarreglo	Inversor	Cadenas	Módulos/Serie	Total Módulos
Sub-1	Fronius Tauro 50kW	5	15	75
Sub-2	Growatt 30kW (MPPT A)	3	11	33
Sub-3	Growatt 30kW (MPPT B)	1	10	10
Total	—	9	—	118
Potencia Total Instalada (DC): 86.14 kWp				

Nota. MPPT: Seguidor del Punto de Máxima Potencia (Maximum Power Point Tracking). Cada cadena (string) está compuesta por módulos ZNShine Solar de 730 Wp conectados en serie. La distribución en tres subarreglos obedece a la optimización de la ventana de tensión DC de cada inversor y a las restricciones físicas de la cubierta del Hotel Bari. DC: Corriente Continua. kWp: Kilovatio pico.

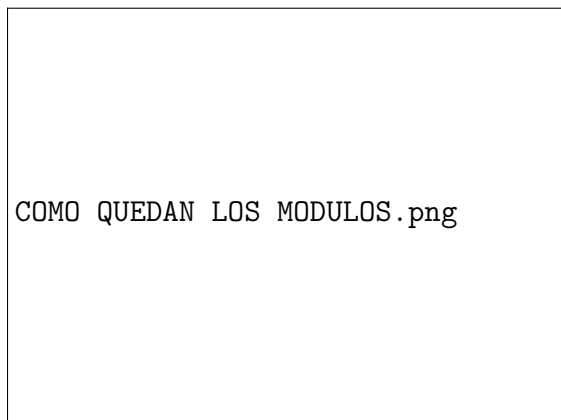
La disposición de estos subsistemas se ilustra a continuación.

Figura 9

Esquema de interconexión eléctrica de cadenas (strings) al inversor

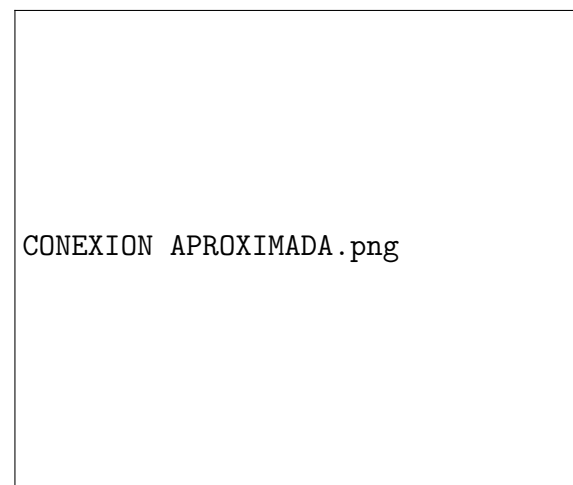
**Figura 10**

Distribución en planta y lógica de conexiones del campo fotovoltaico.



(a)

Vista en planta de la disposición espacial del arreglo fotovoltaico seleccionado.



(b)

Esquema de interconexión eléctrica y topología de los módulos fotovoltaicos.

En conclusión, la implementación de esta arquitectura asimétrica garantiza la operación eficiente de la capacidad máxima instalable sobre la cubierta, integrando la totalidad del campo solar compuesto por 118

módulos fotovoltaicos.

4.3 Cálculos Eléctricos y Memoria Técnica

Dimensionamiento de Conductores y Caída de Tensión. El diseño del sistema de canalizaciones y el dimensionamiento del cableado se realizó garantizando la capacidad de conducción de corriente (ampacidad) bajo las condiciones más severas de operación y temperatura, además de limitar la caída de tensión a los valores permitidos por el RETIE y la NTC 2050.

El esquema de cableado se divide en dos secciones principales de acuerdo con el tipo de energía transportada:

- **Conductores de Corriente Continua (Lado DC):** Para la interconexión de las cadenas de paneles desde la cubierta hasta la entrada de los inversores, se especifica el uso exclusivo de cable solar fotovoltaico (aislamiento XLPE/XLPO, libre de halógenos y resistente a los rayos UV), certificado para operar hasta 1800 V DC. Considerando que la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de los módulos ZNShine es de 18.51 A según las especificaciones de su fabricante, y aplicando el factor de seguridad normativo (1.25 por irradiancia continua \times 1.25 por protección térmica, tal como lo exige la Sección 690 de la norma NTC 2050), la corriente de diseño por cadena es de 28.87 A. Para soportar esta carga y contrarrestar el factor de corrección por alta temperatura en la cubierta (75°C operacionales, evaluado mediante las tablas de ampacidad de la NTC 2050), se seleccionó un conductor de sección transversal de 6 mm^2 . Esta selección garantiza una caída de tensión inferior al 1.5 % (cumpliendo a cabalidad con la regulación del RETIE), minimizando las pérdidas óhmicas y maximizando el rendimiento del arreglo.
- **Conductores de Corriente Alterna (Lado AC):** Para la evacuación de energía desde los inversores hacia el Tablero General Fotovoltaico (TGF) y su posterior inyección a la red de la edificación, se especificaron conductores de cobre trenzado con aislamiento THHN/THWN-2, diseñados para soportar 90°C .
 - **Circuito Inversor Growatt (30 kW):** Protegido por un interruptor de 100 A, se alambra con tres (3) fases y un neutro en calibre 2 AWG.

- **Circuito Inversor Fronius (50 kW):** Protegido por un interruptor de 175 A, se conectará mediante conductores de calibre 2/0 AWG.
- **Acometida General AC:** Para el enlace troncal entre el totalizador de 300 A y el punto de conexión en el cuarto eléctrico del hotel, se proyecta un arreglo de conductores en paralelo utilizando dos cables de 2/0 AWG de cobre trenzado con aislamiento THHN/THWN-2 por fase.

4.3.1 Protecciones

El dimensionamiento del sistema de protecciones se enfoca en resguardar los circuitos de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) mediante el uso de interruptores de corriente y dispositivos contra sobretensiones, en estricto cumplimiento con los parámetros de la NTC 2050 (Sección 690).

Protecciones en Corriente Continua (Lado DC). La protección del arreglo fotovoltaico se resuelve combinando las capacidades de hardware de los equipos de conversión y la integración de protecciones externas especializadas. Aunque los inversores incorporan seccionadores bajo carga, el esquema de seguridad para el lado DC exige componentes adicionales para el aislamiento y resguardo de los circuitos. Por ello, se contempla la instalación de fusibles fotovoltaicos de 30 A con sus respectivos portafusibles para la protección contra sobrecorrientes en las cadenas, acompañados de interruptores electromagnéticos (breakers) DC (certificados para operar hasta 1000 V, referencia Projoy), los cuales garantizan un seccionamiento manual seguro de las líneas.

Adicionalmente, para mitigar los riesgos asociados a descargas atmosféricas o transitorios de red, se especifica la instalación de Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS) externos Tipo II. Se implementará un supresor por cada Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en uso, sumando un total de cinco equipos de protección en corriente continua. La capacidad técnica de estos supresores se dimensionó de forma estricta según la tensión máxima en circuito abierto de cada subarreglo asociado a los inversores Fronius y Growatt, tal como se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7

Protecciones Lado DC y referencias comerciales.

Circuito / Inversor	Voltaje Máx.	Protección DC	Referencia Comercial
Inversor Fronius (1 MPPT)	742.5 V	1040 V - 40 kA	CLAMPER Solar 1040V 40kA (x1)
Inversor Growatt (4 MPPTs)	544.5 V	600 V - 40 kA	CLAMPER Solar 600V 40kA (x4)

Nota. DC: Corriente Continua. MPPT: Seguidor del Punto de Máxima Potencia. El voltaje máximo corresponde al V_{oc} del subarreglo ajustado a la temperatura mínima histórica del sitio. Los dispositivos CLAMPER seleccionados corresponden a Supresores de Sobretensión Tipo II, dimensionados con un margen de seguridad superior al voltaje máximo operativo de cada subarreglo, en cumplimiento de la Sección 690 de la NTC 2050. kA: Kiloamperios de capacidad de descarga nominal.

Protecciones en Corriente Alterna (Lado AC). La etapa de acople en corriente alterna se centraliza en un Tablero General Fotovoltaico (TGF), diseñado para operar a una tensión trifásica de 220 V. El dimensionamiento de los interruptores de corriente y los conductores de evacuación sigue la regla del 125 % de la corriente nominal para cargas continuas, la cual esta en la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (Sección 690). La Tabla 8, se presenta el cuadro de protecciones en alterna, incluyendo las referencias comerciales sugeridas para garantizar el cumplimiento RETIE.

Tabla 8

Protecciones Lado AC y referencias comerciales.

Circuito	Corriente Nom.	Protección AC	Referencia Comercial (Schneider Elec.)
Inversor Growatt	78.7 A	3x100 A	EasyPact CVS100F (TM100D)
Inversor Fronius	131.2 A	3x175 A	ComPacT NSX250F (Ajustado a 175 A)
Totalizador Gen.	209.9 A	3x300 A	ComPacT NSX400F (Micrologic 2.3)
Supresor AC	N/A	40 kA	Acti9 iPRD 40r (Tipo 2)

Nota. AC: Corriente Alterna. N/A: No aplica corriente nominal para dispositivos de protección contra sobretensiones. La corriente nominal de cada circuito fue dimensionada aplicando el factor del 125 % sobre la corriente nominal continua, según lo establece la Sección 690 de la NTC 2050. Los interruptores seleccionados corresponden a la línea industrial de Schneider Electric, certificados para operar en sistemas trifásicos a 220 V. El supresor Acti9 iPRD 40r corresponde a un Dispositivo de Protección contra Sobretensiones Tipo 2, instalado en el Tablero General Fotovoltaico (TGF). kA: Kiloamperios de capacidad de descarga nominal.

4.3.2 Puesta a tierra

Dado que el Hotel Bari ya cuenta con una infraestructura eléctrica, el enfoque del diseño fotovoltaico no es construir una malla de tierra aislada, sino crear una red equipotencial en la cubierta que se integre de forma sólida al sistema de puesta a tierra existente de la edificación; por ende, se debe llevar por una ruta independiente y conectarlo a la tierra del hotel.

Dado que el Hotel Bari ya cuenta con una infraestructura eléctrica, el enfoque del diseño fotovoltaico no es construir una malla de tierra aislada, sino crear una red equipotencial en la cubierta que se integre de forma sólida al sistema de puesta a tierra existente de la edificación. Por tal motivo, el conductor de protección debe seguir una ruta independiente y continua hasta su punto de acoplamiento con la tierra del edificio.

El esquema de protección se estructura a través de los siguientes lineamientos técnicos:

- **Equipotencialidad del Arreglo Fotovoltaico:** Las partes metálicas no conductoras de corriente del sistema deben estar rígidamente conectadas a tierra. Esto incluye los marcos de aluminio de los 118 módulos ZNShine y la totalidad de la estructura metálica elevada. Para evitar la corrosión galvánica entre el aluminio de los paneles y el cobre del conductor de tierra, se especifica el uso de clips de acero inoxidable (tipo WEEB) o terminales bimetálicos certificados en cada módulo.
- **Conductor de Puesta a Tierra de Equipos:** Se implementará un conductor de cobre desnudo trenzado de calibre 4 AWG, dimensionado en la Tabla 250-122 de la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (Tamaño mínimo de los conductores de puesta a tierra de equipos), la cual exige este calibre para circuitos protegidos por un dispositivo automático de sobrecorriente de 300 A. Este conductor enlazará de manera continua las filas de paneles, las carcasas metálicas de los inversores Fronius Tauro y Growatt MAC, y los encerramientos de los tableros eléctricos.
- **Derivación y Selección de los Supresores (DPS):** La selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS Tipo 2) se realizó garantizando que su tensión máxima de operación continua (U_c) sea superior al voltaje máximo de circuito abierto ($V_{oc_{max}}$) calculado para cada subarreglo. Bajo este criterio, se especificó un DPS de 1040 V para la entrada del inversor Fronius (742.5 V máximo operativo) y cuatro DPS de 600 V para las entradas del inversor Growatt (544.5 V máximo operativo), todos con una capacidad de descarga nominal de 40 kA. Los terminales de tierra de estos

cinco (5) DPS en corriente continua (CLAMPER) y el DPS de corriente alterna (Acti9) se conectarán directamente a la red equipotencial. Esto garantiza que la energía absorbida durante un pico transitorio se drene de manera segura e inmediata.

- **Interconexión al Nodo Principal:** El conductor troncal de puesta a tierra descenderá desde la cubierta mediante un recorrido independiente y continuo. Aunque descienda por la misma canalización de los alimentadores AC, no tendrá empalmes ni derivaciones intermedias en otros subtableros hasta conectarse de forma directa y sólida al Barraje Principal de Tierra (TMAC) ubicado en el cuarto eléctrico principal del hotel. Esta ruta exclusiva garantiza un único nivel de potencial de referencia para todo el edificio, proporcionando una vía segura de baja impedancia que evita diferencias de tensión peligrosas durante eventos de falla.

4.4 Datos Climatológicos y Recurso Solar

El emplazamiento del proyecto en la ciudad de Bucaramanga cuenta con condiciones climatológicas óptimas para el aprovechamiento de la energía solar. La viabilidad preliminar del sistema se comprobó mediante el análisis de datos satelitales extraídos de NASA POWER, los cuales indicaron una irradiación global promedio de $5.0\text{kwh/m}^2/\text{día}$ y normalizada de $4.3\text{kwh/m}^2/\text{día}$. Una vez verificada la factibilidad energética inicial, el análisis a detalle se ejecutó en PVsyst. Para esto, se utilizó Meteonorm 8.2, seleccionada por ser la base de datos meteorológica de mayor confiabilidad y resolución para el territorio latinoamericano.

Tabla 9

Datos meteorológicos mensuales suministrados por Meteonorm 8.2.

Mes	Irradiación horizontal global (kWh/m ² /día)	Irradiación difusa horizontal (kWh/m ² /día)	Temp. (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Turbidez Linke (-)	Humedad relativa (%)
Enero	5.26	2.19	25.8	2.30	3.164	67.3
Febrero	5.37	2.20	26.1	2.30	3.515	66.1
Marzo	5.06	2.65	26.6	2.19	3.777	66.2
Abril	5.34	2.72	26.5	2.20	3.706	68.2
Mayo	5.73	2.02	27.5	2.20	3.118	65.5
Junio	5.58	2.28	27.1	2.10	3.030	65.6
Julio	5.54	2.09	27.7	2.19	2.968	63.1
Agosto	5.41	2.00	28.2	2.30	3.186	61.0
Septiembre	5.11	2.34	28.0	2.30	3.260	61.3
Octubre	4.69	2.24	27.7	2.30	3.069	63.8
Noviembre	4.74	2.47	26.1	2.09	3.005	69.6
Diciembre	5.21	1.89	26.1	2.10	3.053	68.3
Año	5.25	2.26	27.0	2.20	3.238	65.5

Nota. Datos extraídos de la base de datos meteorológica Meteonorm 8.2 para la ubicación del Hotel Bari en Bucaramanga. La variabilidad de la irradiación horizontal global año a año es de 6.7%.

4.5 Simulación del Desempeño Energético PVsyst

Una vez establecidos los criterios de diseño físico y eléctrico del generador fotovoltaico, junto con el perfil de radiación solar del sitio, se ejecutó la simulación computacional del proyecto. Este proceso se desarrolló mediante el software PVsyst, ingresando la configuración exacta de los equipos y su disposición espacial para estimar el rendimiento energético del Hotel Bari. Los indicadores de viabilidad técnica arrojados por la simulación del escenario base —cuyo reporte detallado puede consultarse en el (Apéndice F)— se resumen a continuación:

Tabla 10

Indicadores principales de rendimiento energético (Resultados PVsyst).

Indicador de Desempeño	Valor Proyectado
Producción del sistema (Energía AC inyectada)	134 MWh/año
Producción específica	1554 kWh/kWp/año
Proporción de rendimiento (Performance Ratio - PR)	0.805
Producción normalizada	4.26 kWh/kWp/día
Pérdidas del conjunto (Arreglo DC)	0.80 kWh/kWp/día
Pérdidas del sistema (Conversión AC)	0.23 kWh/kWp/día

4.5.1 Balance Energético Mensual

En esta sección se detalla el comportamiento del sistema a lo largo del año, contrastando la irradiación disponible con la energía efectivamente inyectada a la red del Hotel Bari.

A partir de la matriz de consumo, es posible observar cómo se comporta la dinámica entre el autoconsumo y las exportaciones. La Figura 9 y la Tabla 11 presentan la interacción mensual entre la curva de demanda energética del hotel y el perfil de generación del sistema fotovoltaico. El comportamiento operativo se enmarca dentro del esquema de Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE) con entrega de excedentes, regulado en Colombia por la Resolución CREG 174 de 2021. Se observa que una fracción significativa de la energía producida es absorbida de manera instantánea por las cargas de la edificación (autoconsumo), lo que representa el mayor beneficio económico al evitar la compra de energía a la tarifa plena del comercializador Ruitoque Energía. Adicionalmente, durante los periodos de alta irradiancia y baja ocupación térmica o lumínica del hotel, el sistema inyecta la energía sobrante a la red pública (energía exportada), la cual será sujeta a compensación en la facturación mensual, se observa en el (Apéndice G) y (Apéndice H).

Tabla 11

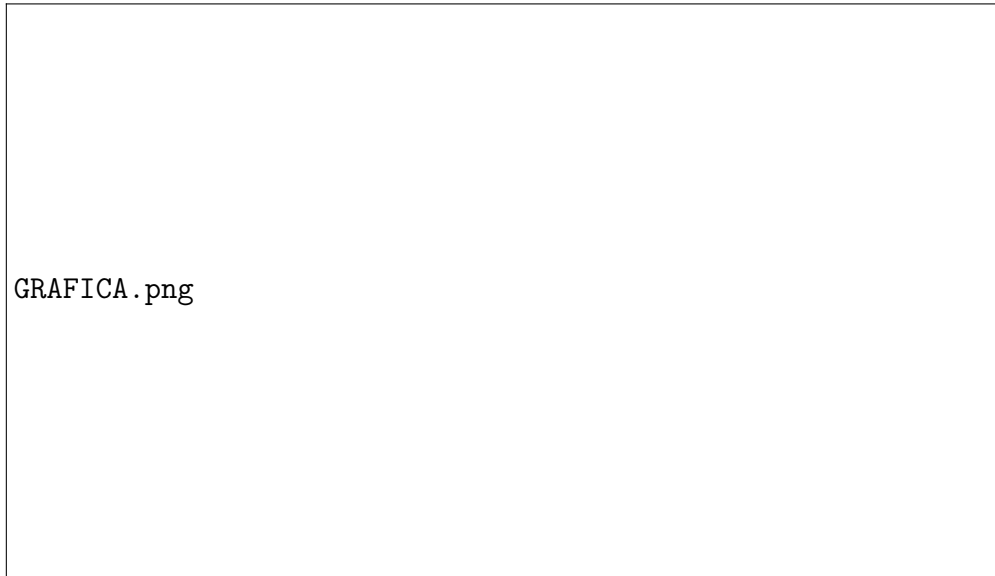
Balance mensual de energía del Hotel Bari: Consumo base, autoconsumo y excedentes exportados.

Mes	Consumo sin paneles (kWh/mes)	Autoconsumo (kWh/mes)	Energía exportada (kWh/mes)
Enero	26333.27	8743.06	3442.10
Febrero	24903.38	7395.30	3224.10
Marzo	28117.49	8335.86	2816.74
Abril	26109.73	8364.64	2730.73
Mayo	26039.39	8389.15	3484.59
Junio	25440.40	8251.77	2853.53
Julio	25256.72	8210.44	3154.51
Agosto	24788.58	7624.89	3646.01
Septiembre	20152.36	6453.85	4144.16
Octubre	21749.64	6584.82	3767.14
Noviembre	18756.80	6251.19	3929.60
Diciembre	18590.03	6316.14	5851.79

Nota. Valores obtenidos del cruce entre la matriz de consumo histórico del Hotel Bari y los resultados de la simulación en PVsyst. El autoconsumo corresponde a la fracción de energía generada absorbida directamente por las cargas de la edificación, mientras que la energía exportada representa los excedentes inyectados a la red de ESSA bajo el esquema AGPE regulado por la Resolución CREG 174 de 2021. Todos los valores están expresados en kWh/mes.

Figura 11

Comparativo de facturación eléctrica mensual: Escenario base vs. Sistema de autogeneración propuesto.



Como se observa en la figura 9, la implementación del sistema permite una reducción sustancial del consumo energético demandado a la red convencional. Esta disminución, representada por la curva de 'consumo con paneles', es el resultado directo de la fracción de energía absorbida por el autoconsumo (barras rojas), complementada por la inyección de excedentes (barras verdes)."

4.5.2 Análisis del Diagrama de Pérdidas

El flujo de energía desde los módulos hasta el punto de inyección presenta diversas mermas técnicas que fueron cuantificadas mediante la simulación. El análisis del diagrama de pérdidas permite identificar que la mayor reducción energética se debe al factor de temperatura en los módulos, con un impacto del 6.2%, lo cual es característico de las condiciones climáticas de Bucaramanga. No obstante, el diseño físico logró mitigar completamente las pérdidas por sombreado cercano a 0.0%. Otras pérdidas relevantes incluyen la eficiencia de conversión de los inversores (4.2%), el desajuste eléctrico (2.1%) y las pérdidas óhmicas en el cableado DC, las cuales se mantuvieron en un marginal 0.5% gracias a la selección del conductor de 6 mm². Se observa mejor en el **(Apéndice I)**

4.6 Evaluación del Impacto Ambiental

La implementación del sistema fotovoltaico en el Hotel Bari contribuye directamente a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de la huella de carbono de la edificación. Para cuantificar este beneficio ambiental de manera precisa y normativa, se toman como referencia los lineamientos técnicos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) establecidos en la reciente Resolución 000085 de 2026. Este acto administrativo oficializa la actualización de los factores de emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para proyectos de mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). De acuerdo con la normativa, para proyectos aplicables al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), específicamente referenciado a plantas de generación solar, el factor de emisión marginal se establece en 0.660 tCO₂eq/MWh. La reducción anual de emisiones de dióxido de carbono equivalente se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$RE_{anual} = E_{inyectada} \times FE_{MDL_Solar} \quad (4.1)$$

Donde:

- $E_{inyectada}$: Energía anual inyectada a la red proyectada por la simulación (134 MWh/año).
- FE_{MDL_Solar} : Factor de emisión marginal para proyectos solares (0.660 tCO₂eq/MWh).

Bajo este escenario de operación, el generador fotovoltaico evitará la emisión de 88.44 toneladas de CO₂ al año. Considerando un horizonte de vida útil de los paneles proyectado a 25 años, el ahorro ambiental total acumulado asciende a más de 2000 toneladas de CO₂.

Capítulo 5

Evaluación Económica y Financiera

5.1 Presupuesto Estimado de Implementación

El análisis financiero del proyecto fotovoltaico para el Hotel Bari requiere una estructuración detallada de las inversiones necesarias para su puesta en marcha y operación. Para este propósito, los costos se han clasificado en dos categorías fundamentales: los Gastos de Capital (CAPEX), que engloban la inversión

inicial en diseño, equipos, obras civiles y legalización; y los Gastos Operativos (OPEX), que proyectan el costo anual de mantenimiento para garantizar la vida útil y la eficiencia del sistema.

El proceso de cotización y consolidación se desarrolló en las siguientes etapas:

- **Determinación de Costos Directos (Sondeo de Mercado):** A partir de las cantidades de obra (BOM) arrojadas por la ingeniería de detalle (118 módulos, inversores, protecciones AC/DC, cableado y perfilería), se realizó una indagación comercial mediante la revisión de páginas web y catálogos en línea de distribuidores especializados de fácil acceso en el país. Esta consulta permitió establecer valores unitarios reales y actualizados, arrojando un subtotal de costos directos de \$186.919.441 .
- **Aplicación de Costos Indirectos (A.I.U.):** Para la ejecución de la obra (Instalación Total), se aplicó un factor A.I.U. del 21 % sobre los costos directos. Este porcentaje se desglosa normativamente en un 14 % para Administración (supervisión, logística de cuadrillas eléctricas e ingeniería), 2 % para Imprevistos y un 5 % de Utilidad para el contratista ejecutor.
- **Tratamiento Tributario y Exclusión de IVA:** En estricto cumplimiento de los incentivos de la Ley 1715 para proyectos de FNCE, los equipos y materiales principales se cotizaron asumiendo la exclusión del Impuesto sobre el Valor Agregado (IVA). Por consiguiente, y de acuerdo con la normativa tributaria para contratos A.I.U., el IVA del 19 % se liquidó única y exclusivamente sobre el rubro de Utilidad (\$1.750.410), optimizando sustancialmente la carga fiscal del proyecto.
- **Rubros Complementarios:** Finalmente, al costo de instalación (\$ 227.948.259) se integraron rubros de cotización externa e independiente: el diseño de ingeniería (\$11.4M), los trámites documentales y de legalización (Certificación RETIE, gestión UPME y derechos de conexión ESSA por \$5.93M), y la adecuación estructural para los paneles solares, la cual fue de \$150.000.000.

En la Tabla 12 se detalla el presupuesto estimado para la ejecución del proyecto. Como es posible observar, los componentes de mayor peso financiero en el CAPEX son la instalación de los equipos y la obra civil requerida para la elevación de la estructura solar. De igual manera, el presupuesto integra los costos de legalización ante el Operador de Red (ESSA) y la gestión de incentivos de la Ley 1715 ante la UPME, rubros estrictamente necesarios para viabilizar la rentabilidad del sistema. Para una revisión exhaustiva de las cotizaciones base, los precios unitarios y el flujo de caja, se remite al lector al **(Apéndice J)**.

Tabla 12

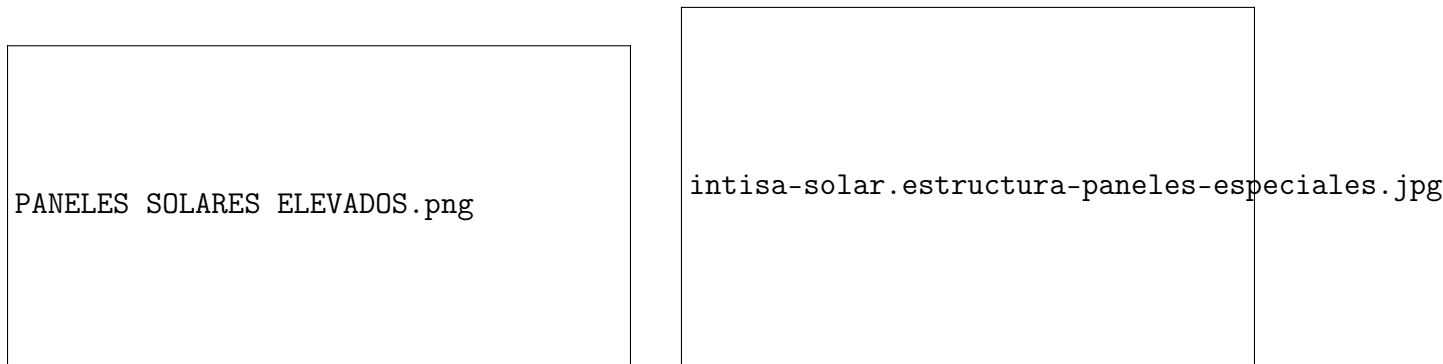
Presupuesto estimado de implementación (CAPEX) y operación anual (OPEX).

Descripción del Rubro	Costo (COP)
Costos de Capital (CAPEX)	
Diseño del sistema	\$ 11,400,000
Instalación total (equipos y mano de obra)	\$ 227,948,259
Adecuación estructural de la cubierta	\$ 150,000,000
Certificación RETIE	\$ 2,740,000
Trámites de conexión ante Operador de Red (ESSA)	\$ 2,050,000
Gestión de documentos incentivos Ley 1715 (UPME)	\$ 1,140,000
Total Inversión Inicial (CAPEX)	\$ 395,278,259
Costos Operativos Anuales (OPEX)	
Limpieza de módulos (4 intervenciones anuales)	\$ 2,800,000
Imprevistos	\$ 900,000
Inspección eléctrica y mantenimiento (2 intervenciones anuales)	\$ 2,300,000
Seguro todo riesgo anual	\$ 1,823,586.07
Monitoreo del sistema	\$ 600,000
Total Operación Anual (OPEX)	\$ 8,423,586.07

Nota. Valores expresados en pesos colombianos (COP) a precios del año 2026. El CAPEX corresponde a la inversión inicial total requerida para la puesta en marcha del sistema, incluyendo equipos, obra civil y trámites de legalización ante la UPME y la ESSA. El OPEX refleja los costos anuales recurrentes proyectados para mantener el sistema operando en condiciones óptimas durante su vida útil de 25 años. Los rubros de certificación RETIE y conexión ante el Operador de Red son requisitos obligatorios para la habilitación del sistema como Autogenerador a Pequeña Escala (AGPE) bajo la Resolución CREG 174 de 2021. COP: Peso Colombiano. CAPEX: Capital Expenditure (Gastos de Capital). OPEX: Operational Expenditure (Gastos Operativos).

Figura 12

Modelos de estructuras de soporte y soluciones de montaje para sistemas elevados.



La implementación física del arreglo exige una infraestructura especializada, tal como se referencia en los modelos de la Figura 12. Dada la necesidad de sobrepasar los cuartos de máquinas y muros perimetrales que proyectan sombras críticas sobre el área útil, se diseñó una estructura metálica elevada tipo pórtico. El anclaje de este sistema no se realiza mediante fijación mecánica directa sobre la placa del techo —lo cual representaría un riesgo grave de filtraciones para el hotel— sino a través de un sistema de lastres o zapatas superficiales en hormigón. Esta solución estructural, aunque representa una inversión considerable en el gasto de capital (CAPEX), es el único mecanismo viable para instalar la capacidad requerida de 118 módulos y garantizar la vida útil de la cubierta existente.

5.2 Evaluación Financiera y Ahorro Proyectado

La viabilidad financiera del proyecto se fundamenta en la mitigación del gasto operativo asociado al consumo de energía eléctrica de la red pública. Para estructurar este análisis y determinar la tarifa proyectada para el año 2026, se estableció la siguiente metodología de cálculo: se partió de la base de datos de facturación histórica consolidada del año 2025 suministrada por el comercializador Ruitoque Energía; dado que el Hotel Bari tiene la capacidad de negociar energía en bloque bajo la figura de 'usuario no regulado', se aplicó un factor de ajuste de 0.846 (15.4% de descuento) sobre esta tarifa base. Posteriormente, para trasladar estos valores al año de inicio de operación (2026), se aplicó un incremento del 4%, correspondiente a la proyección promedio del índice de Precios al Consumidor (IPC), también el mes de marzo se tomó como el valor de la factura de abril.

Este mismo incremento del 4% se definió como la tasa de escalonamiento anual para el costo de la energía en el modelo de flujo de caja a 25 años. Finalmente, la tarifa estructurada discrimina el costo base del kWh, el cargo por comercialización y el impacto de la contribución de solidaridad aplicable al sector comercial.

En la Tabla 13 se consolida la proyección del gasto anual. El análisis contrasta el escenario base (consumo histórico sin intervención) frente al escenario propuesto (operación con el arreglo fotovoltaico de 86.1 kWp). Los resultados demuestran una reducción contundente en la facturación mensual, logrando un ahorro global en el primer año de operación equivalente al 46.71 % del costo total de energía, lo que se traduce en una liquidez adicional significativa para la administración del hotel. No obstante, este margen de ahorro presentará un decrecimiento a lo largo del horizonte de evaluación, como consecuencia directa de la tasa de degradación natural de los módulos fotovoltaicos, la cual se proyecta en una pérdida de eficiencia del 1 % anual. Lo cual se traduce que en el año 25 el porcentaje de ahorro solo llega al 36.7% una reducción del 21.4% como se observa (**Apéndice G**).

Tabla 13*Reducción proyectada del pago eléctrico mensual.*

Mes	Costo kWh	Costo Com. kWh	Precio Sin Paneles	Precio Con Paneles	Precio Contribución	Precio Contribución P.
Ene	\$ 761.15	\$ 4.75	\$ 20,043,658.46	\$ 10,785,241.64	\$ 27,058,938.92	\$ 14,554,348.80
Feb	\$ 785.08	\$ 4.90	\$ 19,551,222.12	\$ 11,229,916.16	\$ 26,394,149.86	\$ 15,154,853.47
Mar	\$ 754.43	\$ 4.71	\$ 21,212,606.18	\$ 12,812,048.33	\$ 28,637,018.34	\$ 17,291,619.80
Abr	\$ 788.81	\$ 4.93	\$ 20,595,642.12	\$ 11,856,944.65	\$ 27,804,116.86	\$ 16,002,166.43
May	\$ 791.54	\$ 4.94	\$ 20,611,227.84	\$ 11,229,916.24	\$ 27,825,157.59	\$ 15,154,357.34
Jun	\$ 799.02	\$ 4.99	\$ 20,327,391.60	\$ 11,468,272.67	\$ 27,441,978.67	\$ 15,477,183.81
Jul	\$ 762.37	\$ 4.76	\$ 19,254,965.44	\$ 10,605,690.90	\$ 25,994,203.35	\$ 14,312,425.44
Ago	\$ 783.44	\$ 4.89	\$ 19,420,276.04	\$ 10,608,092.38	\$ 26,217,372.65	\$ 14,314,680.41
Sep	\$ 769.13	\$ 4.80	\$ 15,499,817.68	\$ 7,368,455.95	\$ 20,924,753.87	\$ 9,940,447.65
Oct	\$ 768.83	\$ 4.80	\$ 16,721,803.39	\$ 8,780,983.87	\$ 22,574,434.57	\$ 11,847,996.73
Nov	\$ 766.53	\$ 4.79	\$ 14,377,682.62	\$ 6,592,601.40	\$ 19,409,871.53	\$ 8,893,427.11
Dic	\$ 767.18	\$ 4.79	\$ 14,261,901.70	\$ 4,954,943.59	\$ 19,253,567.29	\$ 6,679,359.77
TOTAL ANUAL			\$ 221,878,195.19	\$ 118,293,107.78	\$ 299,535,563.50	\$ 159,622,866.76
Porcentaje de Ahorro con Contribución:						46.71 %
Precio de kWh promedio por paneles:						\$ 557.66

Nota. Valores expresados en pesos colombianos (COP) a precios del año 2026. El “Costo kWh” corresponde a la tarifa base negociada por el Hotel Bari bajo la figura de usuario no regulado (descuento del 15.4 % sobre la tarifa de Ruitoque Energía), proyectada con un incremento anual del 4 % equivalente al IPC estimado. El “Costo Com. kWh” es el cargo fijo por comercialización. “Precio Sin Paneles” refleja la facturación mensual histórica del escenario base; “Precio Con Paneles” es la facturación proyectada tras descontar el autoconsumo y la compensación de excedentes por medición neta. Las columnas “Precio Contribución” y “Precio Contribución P.” incorporan el cargo de solidaridad aplicable al sector comercial sobre cada escenario respectivamente. COP: Peso Colombiano. IPC: Índice de Precios al Consumidor. kWh: Kilovatio hora.

5.3 Análisis de Indicadores de Rentabilidad (TIR, VPN, Payback)

Para evaluar la viabilidad financiera en el horizonte de vida útil del sistema (25 años), se estructuró el flujo de caja neto y acumulado. En una primera fase analítica, se proyectan los ingresos por ahorro energético y los egresos por operación y mantenimiento (OPEX) frente a la inversión inicial (CAPEX), sin contemplar aún los beneficios tributarios del Estado. Esto permite establecer una línea base de rentabilidad pura del

diseño tecnológico. A continuación, se presentan los flujos para el escenario de inversión optimizada. Exclusivamente equipos fotovoltaicos, sin refuerzo de cubierta y el escenario integral incluyendo la elevación de los paneles solares. Como se observa en el (Apéndice K) .

Tabla 14

Proyección de flujo de caja a 25 años: Escenario sin adecuación estructural de cubierta.

Año	0	1	2	4	5	12	25
CAPEX	-\$ 245,278,259	0	0	0	0	0	0
OPEX	0	-\$ 8,423,586	-\$ 8,760,530	-\$ 9,475,389	-\$ 9,854,404	-\$ 12,967,724	-\$ 21,592,213
AHORRO	0	\$ 139,912,697	\$ 144,054,113	\$ 152,708,330	\$ 157,228,497	\$ 192,846,162	\$ 281,774,664
TOTAL	-\$ 245,278,259	\$ 131,489,111	\$ 135,293,583	\$ 143,232,942	\$ 147,374,093	\$ 179,878,438	\$ 260,182,451
PAYBACK	-\$ 245,278,259	-\$ 113,789,148	\$ 21,504,435	\$ 303,944,540	\$ 451,318,633	\$ 1,609,289,487	\$ 4,478,322,550

Nota. Valores expresados en pesos colombianos (COP). Este escenario contempla únicamente la inversión en equipos fotovoltaicos sin incluir la adecuación estructural de la cubierta (CAPEX de \$245,278,259). El OPEX crece anualmente a una tasa del 4 % equivalente al IPC proyectado. El AHORRO refleja la reducción en la facturación eléctrica generada por el autoconsumo y la compensación de excedentes, escalando también al 4 % anual junto con la tarifa energética. El PAYBACK acumulado indica la recuperación de la inversión entre el año 1 y el año 2 de operación. Se presentan años representativos del horizonte de evaluación (0, 1, 2, 4, 5, 12 y 25). COP: Peso Colombiano. CAPEX: Gastos de Capital. OPEX: Gastos Operativos.

Tabla 15

Flujo de caja proyectado a 25 años: Escenario con elevación de paneles.

Año	0	1	2	4	5	12	25
CAPEX	-\$ 395,278,259	0	0	0	0	0	0
OPEX	0	-\$ 8,423,586	-\$ 8,760,530	-\$ 9,475,389	-\$ 9,854,404	-\$ 12,967,724	-\$ 21,592,213
AHORRO	0	\$ 139,912,697	\$ 144,054,113	\$ 152,708,330	\$ 157,228,497	\$ 192,846,162	\$ 281,774,664
TOTAL	-\$ 395,278,259	\$ 131,489,111	\$ 135,293,583	\$ 143,232,942	\$ 147,374,093	\$ 179,878,438	\$ 260,182,451
PAYBACK	-\$ 395,278,259	-\$ 263,789,148	-\$ 128,495,565	\$ 153,944,540	\$ 301,318,633	\$ 1,459,289,487	\$ 4,328,322,550

Nota. Valores expresados en pesos colombianos (COP). Este escenario contempla la inversión integral del proyecto, incluyendo la adecuación estructural de la cubierta para la elevación de los paneles . Los rubros de OPEX y AHORRO son idénticos al escenario base dado que la capacidad instalada de 86.1 kWp no varía entre escenarios.

Para concluir el análisis económico, se consolidaron los indicadores de rentabilidad del proyecto bajo el escenario de inversión optimizado. Estos valores permiten determinar la viabilidad del sistema fotovoltaico para el Hotel Bari desde la perspectiva de creación de riqueza y eficiencia del capital.

Tabla 16

Resumen comparativo de Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) sin incentivos.

Indicador Financiero	Escenario Base (Solo Paneles)	Escenario Integral (+ elevación)
Inversión Inicial (CAPEX)	-\$ 245,278,259	-\$ 395,278,259
Tasa Interna de Retorno (TIR)	56.49 %	36.00 %
Valor Presente Neto (VPN)	\$ 1,024,867,325.21	\$ 874,867,325.21

Nota. Valores expresados en pesos colombianos (COP) sin incorporar los beneficios tributarios establecidos en la Ley 1715 de 2014. El VPN fue calculado con una tasa de descuento del 12 %, correspondiente al costo de oportunidad del capital (WACC) estimado para el sector hotelero colombiano. La TIR representa la tasa de rentabilidad intrínseca del proyecto bajo un horizonte de evaluación de 25 años.

5.4 Evaluación de Incentivos Tributarios y Fiscales

El proyecto fotovoltaico para el Hotel Bari se acoge a los beneficios contemplados en el marco legal colombiano para promover la gestión eficiente de la energía y el uso de fuentes no convencionales (FNCE). El aprovechamiento de estos incentivos es un factor determinante en la optimización del flujo de caja y el incremento de la rentabilidad financiera. A continuación, se describen los cuatro incentivos aplicados al proyecto:

Tabla 17

Matriz de beneficios tributarios aplicables según la Ley 1715 de 2014.

Incentivo	Descripción Técnica
Deducción de Renta	Deducción del 50 % de la inversión en la declaración de renta (máximo 15 años).
Exclusión de IVA	Exención del 19 % de IVA en la compra de equipos y servicios de montaje.
Depreciación Acelerada	Tasa de depreciación anual del activo de hasta el 33.33 %.
Arancel Cero	Exención de gravámenes arancelarios para equipos importados.

Nota. Beneficios reglamentados por la Ley 1715 de 2014 y modificados por la Ley 2099 de 2021 para proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). IVA: Impuesto al Valor Agregado.

La integración de estos beneficios fiscales optimiza la dinámica financiera del proyecto. El ahorro en impuestos (particularmente la deducción especial de renta) actúa como un escudo fiscal que inyecta liquidez indirecta durante los primeros cinco años de operación. Para cuantificar este impacto, se reestructuraron los flujos de caja incorporando el rubro de 'Ahorro Incentivo', lo cual acelera el periodo de recuperación del capital (Payback) y mejora el Valor Presente Neto.

Tabla 18*Flujo de caja con Incentivos (Escenario Solo Paneles).*

Año	0	1	2	4	5	12	25
CAPEX	-\$ 245,278,259	0	0	0	0	0	0
EXCLUSIÓN IVA	\$ 26,786,500	0	0	0	0	0	0
OPEX	0	-\$ 8,423,586	-\$ 8,760,530	-\$ 9,475,389	-\$ 9,854,404	-\$ 12,967,724	-\$ 21,592,213
AHORRO ENERGÍA	0	\$ 139,912,697	\$ 144,054,113	\$ 152,708,330	\$ 157,228,497	\$ 192,846,162	\$ 281,774,664
AHORRO INCENT.	0	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	0	0
TOTAL NETO	-\$ 218,491,759	\$ 139,136,322	\$ 142,940,795	\$ 150,880,153	\$ 155,021,304	\$ 179,878,438	\$ 260,182,451
PAYBACK	-\$ 218,491,759	-\$ 79,355,437	\$ 63,585,358	\$ 361,319,886	\$ 516,341,190	\$ 1,674,312,045	\$ 4,543,345,107

Nota. Valores en COP. La Exclusión de IVA (\$26,786,500) se aplica en el año 0 reduciendo la inversión efectiva. El Ahorro Incentivo corresponde a la deducción especial de renta de la Ley 1715 y opera durante los primeros 5 años. La recuperación de la inversión ocurre entre el año 1 y el año 2. COP: Peso Colombiano. CAPEX: Gastos de Capital. OPEX: Gastos Operativos.

Tabla 19*Flujo de caja con Incentivos (Escenario con Adecuación de Techo).*

Año	0	1	2	4	5	12	25
CAPEX	-\$ 395,278,259	0	0	0	0	0	0
EXCLUSIÓN IVA	\$ 26,786,500	0	0	0	0	0	0
OPEX	0	-\$ 8,423,586	-\$ 8,760,530	-\$ 9,475,389	-\$ 9,854,404	-\$ 12,967,724	-\$ 21,592,213
AHORRO ENERGÍA	0	\$ 139,912,697	\$ 144,054,113	\$ 152,708,330	\$ 157,228,497	\$ 192,846,162	\$ 281,774,664
AHORRO INCENT.	0	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	\$ 7,647,212	0	0
TOTAL NETO	-\$ 368,491,759	\$ 139,136,322	\$ 142,940,795	\$ 150,880,153	\$ 155,021,304	\$ 179,878,438	\$ 260,182,451
PAYBACK	-\$ 368,491,759	-\$ 229,355,437	-\$ 86,414,642	\$ 211,319,886	\$ 366,341,190	\$ 1,524,312,045	\$ 4,393,345,107

Nota. Valores en COP. Escenario integral que incluye la adecuación estructural de la cubierta (\$150,000,000 adicionales al CAPEX base). Los rubros de OPEX, Ahorro Energía y Ahorro Incentivo son idénticos al escenario solo paneles. La recuperación de la inversión se desplaza al periodo entre el año 2 y el año 4. COP: Peso Colombiano. CAPEX: Gastos de Capital. OPEX: Gastos Operativos.

Tabla 20

Resumen comparativo final de Rentabilidad con Incentivos Tributarios.

Indicador Financiero	Escenario Base (Solo Paneles)	Escenario Integral (+ Techo)
Inversión Inicial Real (Año 0)	-\$ 218,491,759.31	-\$ 368,491,759.31
Tasa Interna de Retorno (TIR)	66.15 %	40.06 %
Valor Presente Neto (VPN)	\$ 1,079,220,311.20	\$ 929,220,311.20

Nota. Valores en COP incorporando los beneficios tributarios de la Ley 1715 de 2014. La inversión inicial real descuenta la Exclusión de IVA aplicada en el año 0. El VPN fue calculado con una tasa de descuento (WACC) del 12 % sobre un horizonte de 25 años. COP: Peso Colombiano. VPN: Valor Presente Neto. TIR: Tasa Interna de Retorno. WACC: Weighted Average Cost of Capital.

5.5 Plan de Implementación y Gestión de Riesgos

El plan de implementación establece la ruta crítica para la materialización del sistema de autogeneración fotovoltaica en el Hotel Bari. Este proceso no solo define las fases técnicas de ejecución, sino que integra los protocolos de mitigación de riesgos exigidos por el RETIE y la normatividad laboral colombiana, garantizando la seguridad del personal y la integridad de la infraestructura existente.

5.5.1 Análisis y Mitigación de Riesgos (Fase Previa)

Antes de iniciar cualquier intervención física, es obligatorio estructurar la Matriz de Riesgos Eléctricos (RETIE, Artículo 9) y los protocolos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). Los riesgos prioritarios identificados y sus medidas de control son:

- **Riesgo Eléctrico (Contacto Directo, Indirecto y Arco Eléctrico):** Mitigado mediante la aplicación de las 5 Reglas de Oro durante los empalmes en el Tablero General, el uso estricto de EPP dieléctrico, y la desconexión secuencial de los seccionadores DC antes de manipular los conectores MC4 de las cadenas de paneles.
- **Trabajo en Alturas y Caídas al Vacío:** El montaje de la estructura metálica elevada representa el riesgo mecánico más crítico. Se controlará mediante la instalación de líneas de vida certificadas, puntos de anclaje fijos, uso de arneses de cuerpo entero y cumplimiento estricto de la Resolución 4272 de 2021.

- **Caída de Objetos (Riesgo a Terceros):** Dado que el hotel colinda con la vía pública (Cra. 38), se establecerá un cerramiento perimetral inferior (Zona Cero) durante el izaje de las vigas metálicas, módulos e inversores mediante grúa telescópica.

5.5.2 Fase 1: Obras Preliminares y Adecuación Civil

Esta fase contempla la preparación de la cubierta y la construcción de la infraestructura de soporte para superar los obstáculos arquitectónicos.

- **Izaje y Acopio de Materiales:** Traslado seguro de la perfilería, los 118 módulos ZNShine y los equipos de conversión hasta la cubierta, distribuyendo las cargas estáticas para no afectar las placas del hotel.
- **Adecuación Estructural Elevada:** Construcción, soldadura y anclaje de la estructura metálica. Se debe verificar rigurosamente la nivelación, la aplicación de recubrimientos epóxicos anticorrosivos y la resistencia mecánica ante cargas de viento.

5.5.3 Fase 2: Instalación Mecánica y Equipotencialización

Una vez liberada la estructura, se procede con la fijación de los componentes de generación y el aseguramiento de la red equipotencial, paso fundamental para la certificación RETIE.

- **Montaje de Módulos:** Fijación de los paneles bifaciales sobre los rieles de aluminio, respetando los 8° de inclinación y garantizando los pasillos técnicos 90cm.
- **Sistema de Equipotencialidad:** Para eliminar cualquier diferencia de potencial (voltaje de paso o contacto), se instalarán clips de acero inoxidable (tipo WEEB) o arandelas bimetálicas dentadas entre los marcos de aluminio anodizado de los 118 módulos y la perfilería de soporte.
- **Malla de Continuidad y Resistencia Estructural:** Toda la estructura metálica elevada, los rieles y las carcasas de los inversores se enlazarán firmemente mediante un conductor de cobre desnudo trenzado calibre 4 AWG. Aunque la corriente de falla en el lado de corriente continua (DC) es reducida (aprox. 18.5 A por cadena), se especifica este calibre robusto por tres factores críticos de seguridad: garantiza la resistencia mecánica ante condiciones de intemperie, asegura la capacidad térmica para soportar un eventual cortocircuito proveniente del lado de corriente alterna (AC) en las carcasas de

los equipos, y proporciona una sección transversal adecuada para canalizar de forma segura los picos de energía derivados de descargas atmosféricas.

5.5.4 Fase 3: Instalación Eléctrica

Abarca el tendido, conexión y protección de los circuitos de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC).

- **Tendido de Corriente Continua (DC):** Conexión en serie de las 9 cadenas de paneles (strings) utilizando cable solar fotovoltaico de 6mm^2 , enrutados bajo tubería hermética hasta los supresores de sobretensión (DPS Tipo II) y las entradas de los inversores.
- **Montaje de Equipos de Conversión:** Instalación mural de los inversores Fronius Tauro Eco (50 kW) y Growatt MAC (30 kW) respetando las distancias de despeje térmico del fabricante.
- **Tendido AC y Puesta a Tierra Final:** Alambrado desde los inversores hasta el Tablero General Fotovoltaico (TGF) utilizando conductores de cobre trenzado con aislamiento THHN/THWN-2 en calibres 2/0 AWG y 2 AWG. Finalmente, el conductor troncal de equipotencialidad, especificado como un cable de cobre desnudo trenzado calibre 4 AWG proveniente de la cubierta, descenderá por la tubería de forma continua e independiente hasta conectarse sólidamente al Barraje Principal de Tierra (TMAC) del hotel.

5.5.5 Fase 4: Pruebas, Puesta en Marcha y Legalización

La fase final certifica la seguridad de la instalación y habilita el sistema como Autogenerador a Pequeña Escala (AGPE).

- **Pruebas Pre-operacionales (Commissioning):** Verificación de continuidad de la red equipotencial, medición de aislamiento (Megger) en conductores, medición de resistencia de puesta a tierra y pruebas de tensión de circuito abierto (V_{oc}).
- **Certificación RETIE:** Inspección visual, documental y de pruebas por parte de un organismo acreditado por el ONAC, culminando con la emisión del dictamen de conformidad.
- **Trámite ante Operador de Red (ESSA) y Energización:** Presentación del dictamen RETIE, solicitud formal de cambio de medidor a bidireccional y, finalmente, cierre de interruptores para iniciar la

inyección de excedentes bajo la Resolución CREG 174.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- De los resultados que se obtuvieron mediante PVsyst se proyecta una inyección anual a la red cercana a los 134 MWh, que mantiene un performance ratio (PR) de 0.805. Con este volumen de generación, se espera una reducción del 46.71 % en el valor de la factura de energía eléctrica para el primer año y una reducción del 36.7 % para el año 25 al implementar el proyecto, lo cual libera una cifra significativa de los altos costos operativos del Hotel.
- El impacto ambiental del diseño pretende la mitigación de 88.44 toneladas de CO2 anual. Con esta cifra, el proyecto cumple con los factores de emisión marginal definidos por la UPME (Resolución 0085 de 2026), esto entrega a la administración un sólido argumento comercial enfocado a la sostenibilidad.
- Al integrar el CAPEX con los incentivos tributarios de la Ley 1715, se ratifica la viabilidad financiera del proyecto. Para el Escenario Integral, que contempla la adecuación estructural de la cubierta con una inversión inicial de \$395.278.259, el modelado financiero proyecta una TIR del 40,06 % y un VPN de \$929.220.311. Un periodo de recuperación de la inversión (payback) cercano a los 3 años resulta altamente competitivo para una infraestructura diseñada para operar durante 25 años.

6.2 Recomendaciones

- Para mantener el PR de 0.805 que se estima en los cálculos, es de vital importancia un esquema riguroso de mantenimiento preventivo. Se tiene previsto, al menos, cuatro ciclos de limpieza anuales para evitar que la acumulación de material degrade la eficiencia de captación térmica y lumínica en la superficie de los módulos fotovoltaicos.
- El seguimiento operativo debe anclarse obligatoriamente a las plataformas de los inversores Fronius y Growatt. Monitorear los strings de forma continua es la única manera de identificar fallas prematuras,

sombras atípicas o caídas súbitas en la curva de generación antes de que terminen afectando el ahorro proyectado para cada mes.

- A nivel mecánico y eléctrico, se tienen previstas inspecciones semestrales sobre la estructura elevada y la red de equipotencialidad. El foco de revisión debe estar en los clips de sujeción de acero inoxidable, si estos llegan a sufrir corrosión galvánica pierden continuidad con los marcos de aluminio y el arreglo quedaría desprotegido ante posibles fallas a tierra.
- Toda evaluación de riesgos por descargas atmosféricas (apantallamiento) del edificio deberá actualizarse bajo los parámetros del RETIE previo a la obra, ya que al sumar una estructura metálica en la cubierta se altera la captación de la edificación. Por ello, se debe recalcular la coordinación de aislamiento para garantizar que cualquier corriente transitoria viaje de forma segura hacia la malla principal de tierra.
- Desde la perspectiva gerencial, se sugiere dirigir el financiamiento del CAPEX a través de las “líneas de crédito verde”. Al tratarse de un sistema de autogeneración limpia, la banca comercial en Colombia ofrece tasas preferenciales que permiten cubrir el costo de los equipos y la obra civil, sin asfixiar la liquidez a corto plazo del establecimiento.
- Finalmente, la nueva infraestructura no debe verse únicamente como una solución técnica, sino como un activo estratégico de mercadeo. Al exhibirse las certificaciones o desplegarse campañas de publicidad sobre la implementación de energías renovables en las instalaciones del Hotel Bari, esto representará una ventaja competitiva importante frente a un nicho de turismo que cada vez exige mayor responsabilidad ambiental.
- El análisis financiero identifica que la adecuación de la cubierta representa una carga crítica dentro del CAPEX del proyecto. Adicionalmente, dado que el diseño estructural propone una elevación de los paneles a 7.82 metros, las labores rutinarias de limpieza y mantenimiento se tornan significativamente peligrosas desde la perspectiva de seguridad industrial. En caso de que la estructura elevada resulte inviable técnicamente en la etapa de ejecución, se recomienda evaluar la posibilidad de remodelar la cubierta para transformarla en un piso transitable y funcional. Sin embargo, esta alternativa queda supeditada a que el presupuesto de obra no comprometa los indicadores financieros establecidos: la

Tasa Interna de Retorno (TIR) no debe ser inferior al 15 % y el periodo de recuperación (Payback) no debe superar los 7 años. Ante un escenario donde los costos excedan estos umbrales, la administración del hotel deberá determinar si la creación de un espacio adicional para el servicio a huéspedes justifica estratégicamente la inversión extra. De lo contrario, la recomendación definitiva consiste en prescindir de la elevación estructural y realizar la instalación a nivel de cubierta. Si bien esto implicaría asumir pérdidas energéticas por sombreado o una reducción en el número de módulos, el ahorro drástico en la inversión inicial garantizará que el proyecto mantenga márgenes de rentabilidad altamente atractivos.

Referencias Bibliográficas

- Bakhsh, S., Zhang, W., Ali, K., & Oláh, J. (2024). Strategy towards sustainable energy transition: The effect of environmental governance, economic complexity and geopolitics. *Energy Strategy Reviews, 50*, 101330.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2018). Resolución CREG 030 de 2018 por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021a). Resolución CREG 135 de 2021 por la cual se modifica y adiciona la Resolución CREG 030 de 2018.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021b). Resolución CREG 174 de 2021 por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional y se dictan otras disposiciones.
- Condorí, A. F. (2025). Energía solar fotovoltaica, una alternativa positiva para el cambio renovable. *Económicas Habla, (5)*, 62-64.
- Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
- Congreso de la República de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021 por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Norma Técnica Colombiana NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano*. ICONTEC.
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)* [Resolución 90708 de 2013].
- Ministerio del Trabajo. (2021). Resolución 4272 de 2021 por la cual se establecen los requisitos mínimos de seguridad para el desarrollo de trabajo en alturas.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2026). Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project [Langley Research Center. Accedido en: 2026]. <https://power.larc.nasa.gov/>

PVsyst SA. (2024). PVsyst Photovoltaic Software (Ver. 7.4). <https://www.pvsyst.com>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2026). Resolución UPME 0085 de 2026.

Valentin Software. (2024). PV*SOL premium (Ver. 2024). <https://valentin-software.com>