

Diseño de un sistema fotovoltaico en la Escuela primaria del Instituto Técnico Aquileo Parra,
sede “Santa Barbara” del municipio de Barichara/Santander

Cindy Lorena Calderón Gómez y Fabian Orlando Lizarazo Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia

MBA. Magister en Dirección de Empresas

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

PhD. en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

A mis padres, Valentín y Lilia, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la responsabilidad y el amor. Su ejemplo de vida, su constancia y sacrificio han sido la base sólida sobre la cual he construido este logro. Este logro es de ustedes. A mi hermano Fernando, por sus consejos y palabras de aliento en los momentos difíciles. A mi hermano Jesús, que desde el cielo ha sido mi guía y fuerza silenciosa. Sé que ha estado conmigo en cada paso de este camino iluminándolo, dándome fortaleza. Siempre vivirás en mi corazón. A mi nona Elvira, por estar siempre pendiente de mí, por sus palabras llenas de amor.

Al Ingeniero Mecánico Yamith Vega, el amor de mi vida y compañero incondicional. Gracias por estar a mi lado en cada paso de este proceso, por tu amor, tu apoyo constante y tus palabras que siempre me devolvieron la calma. Gracias por sostenerme en los momentos más duros, por acompañar mis lágrimas y por recordarme con ternura y firmeza que si podía lograrlo. Tu presencia fue mi fuerza, mi refugio y mi inspiración. Este logro también es tuyo, porque sin ti, el camino habría sido mucho más difícil.

A la Universidad Industrial de Santander, Al magister Rolando Andrés Rincón, director de esta tesis, por su compromiso, orientación y dedicación durante toda la carrera. Al doctor Oscar Quiroga, codirector, por su acompañamiento, disposición y valiosos aportes durante el desarrollo de esta tesis. A todos mis profesores quienes con sus enseñanzas aportaron a mi formación como ingeniera. A cada una de las personas que, de alguna manera, hicieron parte de este proceso: gracias por estar, por creer en mí y por formar parte de este sueño.

Cindy Lorena Calderón Gómez

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a Dios y a la Virgen por permitirme culminar esta etapa tan importante en mi vida, sin ellos todo lo que es hoy en día difícilmente hubiera sucedido. A mi madre Sandra quien con su lucha constante y amor me enseñó a soñar y gracias a ella hoy estoy viviendo ese sueño hecho realidad, a mi padre Orlando quien, con su apoyo, enseñanzas, regaños y sobre todo esas sabias palabras guiaban mi caminar para ser quien soy hoy en día y de eso estoy muy agradecido, a mi hermana Laura quien muchas veces me sacaba una sonrisa cuando era lo único que necesitaba y que con su carisma me motivaba cada día para poder ser ese hermano del cual se sienta orgulloso. No me puede faltar a mi nonita Teresa quien un día soñaba con verme siendo todo un profesional y hoy estamos a un paso de ello; este logro va directo al cielo donde me cuida y me guía, hoy con mucho cariño y amor la recuerdo.

De igual manera agradecer a todas las personas que me acompañaron en este camino, quienes creían en mí y apoyaban día a día; a cada una de ellas les agradezco y les comparto este gran logro porque jugaron un papel muy importante en el transcurso de este proceso, Dios les bendiga y multiplique enormemente.

Al profesor Rolando y al profesor Quiroga quienes con sus grandes conocimientos guiaron y acompañaron este proceso para llegar a feliz término, este logro es gracias también a ustedes.

A la Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas a la enseñanza y al conocimiento, pues no lo voy a negar que desde corta edad era un sueño pertenecer a esta gran institución y hoy en día veo como ese sueño se convirtió en realidad.

Fabian Orlando Lizarazo Gómez

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Alcance y objetivos del proyecto	12
1.1 Alcance del proyecto.....	12
1.2 Objetivo General.....	12
1.3 Objetivos Específicos.....	12
2. Análisis de consumo energético y su sistema eléctrico	14
2.1 Análisis estructural inicial.....	14
2.2 Disponibilidad de conexión de AGPE	15
2.3 Consumo energético promedio de la institución.....	16
2.4 Análisis del sistema eléctrico actual	16
3. Dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico on_grid.....	18
3.1 Evaluación del recurso solar	18
3.2 Selección de componentes	19
3.3 Dimensionamiento de conductores	19
3.4 Selección de protecciones	21
3.5 Elementos complementarios	22
3.5.1 Acoples y conectores (lado DC)	22
3.5.2 Canalización y fijación de conductores	22
3.5.3 Estructura de soporte para los módulos	23
3.5.4 Etiquetas y rotulado de seguridad	23
3.6 Sistema de medida	23

3.7 Simulación en PVGIS	24
4. Diseño detallado y evaluación financiera del sistema fotovoltaico	25
4.1 Diseño detallado de la Ingeniería de los Sistemas fotovoltaicos	26
4.1.1 Ingeniería Civil _ Mecánica.....	26
4.1.2 Sistema Eléctrico	28
4.1.2.1 Planos eléctricos y de detalle.	28
4.1.3 Ingeniería Estructural.....	29
4.2 Tramites ante el operador de red.....	31
4.3 Análisis Financiero	32
4.3.1 Costo de la instalación del sistema fotovoltaico	33
4.3.2 Costos recurrentes del sistema fotovoltaico.....	34
4.3.3 Evaluación de Inversión, Financiamiento y Retorno	35
5. Conclusiones.....	38
6. Recomendaciones	39
Referencias bibliográficas.....	40

Lista de Figuras

Figura 1. Numeración paneles e inversor	27
Figura 2. Sistema de anclaje y soporte para los 16 paneles solares	27
Figura 3. Ruta del cableado desde el inversor hasta los paneles solares	29
Figura 4. Modelo en 3D de la instalación de los paneles solares	30

Lista de Tablas

Tabla 1. Importación y exportación de energía del sistema solar fotovoltaico	36
Tabla 2. Costos unitarios de energía: generación, transmisión y pérdidas.	36
Tabla 3. Factura del servicio de energía eléctrica sin el sistema fotovoltaico.....	36
Tabla 4. Factura del servicio de energía eléctrica con el sistema fotovoltaico.....	37

Glosario

CREG 174: es una regulación que establece las pautas para la autogeneración y la generación distribuida de energía. Esta resolución comenzó a aplicarse desde el 23 de noviembre de 2021.

CREG 038 del 2018: regula como pueden conectarse y operar los sistemas de autogeneración y la generación distribuida en las zonas no interconectadas de Colombia, establece los requisitos, procedimientos y derechos tanto para quienes generan su propia energía como para las empresas que distribuyen electricidad en estas zonas.

Eficiencia Energética: es la optimización del uso de la energía, buscando obtener el máximo rendimiento con el menor consumo posible.

Energía Renovable: es aquella energía que proviene de fuentes naturales inagotables, ya sea por su gran cantidad o porque se regeneran de manera natural, ayudando a reducir la extracción de recursos como minerales, gases y combustibles fósiles.

NTC 2050: norma técnica colombiana basada en el National Electrical Code (NEC) cuyo objeto es la salvaguardia de las personas y de los bienes contra los riesgos que pueden surgir por el uso de la electricidad.

RETIE: reglamento técnico de instalaciones eléctricas es una normativa obligatoria en Colombia, expedida por el ministerio de minas y energía, que establece los requisitos técnicos y legales para garantizar la seguridad en las instalaciones eléctricas

Sistema Fotovoltaico: es una fuente de energía renovable, limpia y sostenible, ya que no produce emisiones contaminantes ni depende de recursos no renovables.

Resumen

Título: Título Diseño de un sistema fotovoltaico en la escuela primaria del Instituto Técnico Aquileo Parra, sede “Santa Barbara” del municipio de Barichara/Santander*

Autor: Cindy Lorena Calderón Gómez y Fabian Orlando Lizarazo Gómez**

Palabras Clave: Sistema Fovovoltaico, RETIE, CREG 174, NTC 2050, CREG 038, Eficiencia Energética y Energía Renovable.

Descripción:

Este proyecto presenta el diseño de un sistema fotovoltaico on-grid para la sede “Santa Bárbara” del Instituto Técnico Aquileo Parra, ubicada en Barichara, Santander. La institución tiene alto consumo de energía y como una solución innovadora que sea eficiente y sostenible. Se propone un sistema solar de 8,720 [kWp], que cumpla con normativas nacionales (CREG 038, CREG 174, NTC 2050 y RETIE), con el fin de reducir el consumo eléctrico, mejorar la eficiencia energética y brindar una herramienta educativa en energías renovables. El documento incluye el análisis del sistema actual, el diseño detallado, planos, trámites ante el operador de red y un análisis financiero del sistema y la rentabilidad.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia Especialista en gerencia de proyectos. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga PhD. En ingeniería

Abstract

Title: Design of a photovoltaic system in the primary school of the Aquileo Parra Technical Institute, “Santa Barbara” headquarters of the municipality of Barichara/Santander*

Author(s): Cindy Lorena Calderón Gómez y Fabian Orlando Lizarazo Gómez**

Key Words: Minimum Photovoltaic System, RETIE, CREG 174, NTC 2050, CREG 038, Energy Efficiency, Renewable Energy.

Description:

This project presents the design of an on-grid photovoltaic system for the "Santa Bárbara" campus of the Aquileo Parra Technical Institute, located in Barichara, Santander. The institution has high energy consumption and seeks an innovative, efficient, and sustainable solution. An 8,720 [kWp] solar system is proposed, complying with national regulations (CREG 038, CREG 174, NTC 2050, and RETIE), to reduce electricity consumption, improve energy efficiency, and provide an educational tool in renewable energy. The document includes an analysis of the current system, detailed design, plans, procedures with the grid operator, and a financial analysis of the system and its profitability.

* Degree work

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia Especialista en gerencia de proyectos. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga PhD. En ingeniería

Introducción

La sede Santa Bárbara del Instituto Técnico Aquileo Parra, ubicada en el municipio de Barichara, Santander, presenta un consumo energético considerable y una infraestructura eléctrica limitada, lo que se traduce en altos costos operativos y una baja eficiencia en el uso de la energía. Ante esta situación, surge la necesidad de implementar una solución técnica que permita optimizar los recursos disponibles, reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y mejorar las condiciones de prestación del servicio en la institución.

El proyecto se desarrolla en una institución educativa ubicada con coordenadas latitud 6.640° y longitud -73.222° y una elevación de 1327 msnm. El plantel cuenta con una superficie total de 5220 m² y está conformado por 14 salones de clase, una biblioteca, un restaurante escolar, baños, zonas comunes y una sala de informática, lo que implica una demanda energética constante a lo largo del día.

Este trabajo desarrolla el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a red, como una alternativa viable para cubrir parte de la demanda energética diaria de la escuela. A partir del análisis del consumo eléctrico, las condiciones estructurales del lugar y la evaluación del recurso solar disponible, se plantea un sistema capaz de operar bajo los parámetros técnicos y normativos exigidos en Colombia. La propuesta incluye la selección y dimensionamiento de los componentes del sistema, el diseño eléctrico, la simulación energética y la evaluación financiera del proyecto, con el fin de asegurar su viabilidad técnica, económica y operativa. Además de los beneficios económicos y ambientales, este sistema representa una oportunidad para fortalecer los procesos educativos en torno a las energías renovables y la sostenibilidad.

1. Alcance y objetivos del proyecto

1.1 Alcance del proyecto

Este proyecto se enfoca exclusivamente en el diseño de un sistema fotovoltaico para la Escuela Primaria del Instituto Técnico Aquileo Parra, sede Santa Bárbara, en el municipio de Barichara. Este sistema estará diseñado para satisfacer la demanda energética de las instalaciones internas de la institución, incluyendo las aulas de clase, la zona de comedores, la sala de profesores, la sala de cómputo y toda la iluminación general del plantel educativo. El objetivo es aprovechar el recurso solar garantizando el abastecimiento energético necesario para el autoconsumo de la institución.

Es importante destacar que este proyecto se limita exclusivamente a la fase de diseño, sin incluir la ejecución física del sistema fotovoltaico. No obstante, el diseño técnico detallado que se desarrollará servirá como base sólida para una futura instalación y operación eficiente del sistema.

1.2 Objetivo General

Diseñar un sistema fotovoltaico en la Escuela primaria del Instituto Técnico Aquileo Parra, sede “Santa Bárbara” del municipio de Barichara/Santander.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento de información del sistema eléctrico existente de la institución para evaluar el consumo energético y la necesidad de implementar el sistema fotovoltaico.
- Desarrollar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico “on grid”, determinando la capacidad optima de energía solar y seleccionando componentes adecuados para satisfacer las necesidades energéticas de la institución.
- Diseñar un sistema fotovoltaico detallado y análisis financiero considerando ahorros energéticos, retorno de inversión y evaluando la viabilidad económica del proyecto.

2. Análisis de consumo energético y su sistema eléctrico

Este capítulo presenta el análisis técnico inicial de la sede Santa Bárbara del Instituto Técnico Aquileo Parra, abordando el análisis estructural para la instalación del sistema fotovoltaico, la verificación de disponibilidad de conexión ante el operador de red, la caracterización del consumo energético institucional, y la evaluación del sistema eléctrico existente. Los resultados permiten establecer la viabilidad física, normativa y técnica para la implementación eficiente del sistema de generación solar. Este capítulo se presenta de forma detallada los cálculos e información en el anexo 1.

2.1 Análisis estructural inicial

Como parte del proceso de diagnóstico técnico, se realizó una inspección en sitio en la sede Santa Bárbara del Instituto Técnico Aquileo Parra, ubicada en el municipio de Barichara (Santander), con el objetivo de identificar la viabilidad física para la instalación del sistema fotovoltaico. La inspección permitió determinar una superficie total disponible de 176 [m²] en las cubiertas de los salones recientemente remodelados, la cual presenta condiciones estructurales y de exposición solar adecuadas para la instalación de módulos fotovoltaicos.

Del área identificada, se estableció que aproximadamente el 90 % es utilizable de forma efectiva, tras aplicar un factor de seguridad que considera restricciones estructurales, separación entre filas de módulos, zonas de acceso para mantenimiento, y presencia de elementos obstructivos. Las cubiertas seleccionadas poseen una inclinación de 15° y una orientación

adecuada para la captación de radiación solar, además de estar libres de sombreados durante el día, lo que favorece a un alto rendimiento energético del sistema.

El proyecto se desarrollará en una institución educativa con una extensión total de 5.220 m², localizada a una altitud de 1.336 msnm, en las coordenadas geográficas 6°38'24"N, 73°13'17"W. La infraestructura incluye 14 salones, biblioteca, sala de informática, restaurante, baños y zonas comunes, lo cual implica una demanda energética constante que será cubierta parcialmente mediante el sistema fotovoltaico propuesto (Anexo 1 se detalla el plano de planta de la institución).

2.2 Disponibilidad de conexión de AGPE

Se realizó la consulta de disponibilidad ante el operador de red ESSA S.A. E.S.P., con el propósito de verificar la viabilidad técnica de conexión del sistema fotovoltaico propuesto a la red eléctrica. Como resultado, se determinó que el transformador al que está vinculada la institución cuenta con una capacidad nominal de 30 [MVA], no tiene actualmente sistemas conectados bajo la modalidad de Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE). De acuerdo con lo establecido en la Resolución CREG 038 de 2018, se permite utilizar hasta el 50 % de la capacidad instalada del transformador para este tipo de conexión, lo que representa una disponibilidad efectiva de 15 [MVA] (se muestra de forma más detallada la información en el Anexo 1). Esto confirma la factibilidad técnica para la inyección de energía del sistema fotovoltaico a la red sin comprometer la operación del sistema eléctrico local.

2.3 Consumo energético promedio de la institución.

Con base en los recibos de consumo eléctrico suministrados por la Alcaldía Municipal y los datos proporcionados por el operador de red ESSA, se realizó un análisis de la demanda energética de la institución educativa Aquileo Parra, sede Santa Bárbara. Se determinó un consumo promedio mensual de 1.046 [kWh], correspondiente al mes de mayor exigencia, el cual fue tomado como base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, con el fin de garantizar la cobertura de la carga en condiciones críticas. Asimismo, se analizó la curva de carga diaria obtenida del perfil de consumo comercial, ya que esta tiene un comportamiento similar a la demanda propia de la institución y por este motivo se consideró tomar dicha curva para realizar el análisis, lo que permitió identificar un consumo promedio diario de 34,87 [kWh/día], información principal para el diseño y evaluación de la capacidad del sistema de generación solar (la información del consumo promedio mes se puede observar en el Anexo 1).

2.4 Análisis del sistema eléctrico actual

La institución educativa cuenta con una infraestructura eléctrica compuesta por un medidor principal trifásico tetrafilar (marca Rymel), del cual se derivan dos acometidas: una hacia un tablero de distribución bifásico que alimenta la mayoría de las cargas, incluida una bomba hidráulica de 2 [HP], y otra hacia un tablero monofásico que abastece salones y servicios sanitarios. Ambos tableros presentan condiciones técnicas adecuadas para la operación y permiten la integración del sistema fotovoltaico sin requerir intervenciones mayores, facilitada además por su proximidad a la zona prevista de instalación. Adicionalmente, se realizó los respectivos planos

eléctricos y arquitectónicos (Los planos eléctricos y arquitectónicos se pueden observar de manera detallada en el Anexo 2), ya que no se disponía de planos previos debido a la antigüedad de la infraestructura. Además, se identificó oportunidades de mejora como la ausencia de iluminación en áreas comunes (la información completa del sistema eléctrico se detalla en el Anexo 1).

3. Dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico on_grid

Este capítulo aborda el proceso de diseño técnico del sistema fotovoltaico conectado a red para la sede Santa Bárbara del Instituto Técnico Aquileo Parra, enfocándose en establecer un sistema eficiente y normativamente compatible. Se describen las consideraciones adoptadas en la evaluación del recurso solar, así como la selección y dimensionamiento de los principales componentes del sistema: módulos fotovoltaicos, inversor, conductores, protecciones eléctricas y elementos complementarios. Además, se presentan los resultados de simulación energética para validar el desempeño proyectado del sistema bajo condiciones reales. El análisis realizado permite asegurar que el diseño no solo responde a la demanda energética de la institución, sino que también cumple con estándares técnicos y regulatorios, sentando las bases para una implementación segura y confiable, los cálculos para el presente capítulo se pueden encontrar dentro del anexo 1.

3.1 Evaluación del recurso solar

Para evaluar la viabilidad técnica del sistema fotovoltaico en la sede Santa Bárbara, se realizó un análisis del recurso solar en Barichara utilizando datos históricos de irradiancia de la plataforma NASA POWER. Se determinó una irradiación promedio de 5.0717 [HSP], valor implementado para el dimensionamiento del sistema. El mes de menor radiación tomado fue de noviembre del 2023, el cual fue considerado como escenario crítico de diseño, asegurando el funcionamiento continuo del sistema en condiciones desfavorables (los datos de radiación por mes se pueden detallar en el anexo 1).

3.2 Selección de componentes

Se seleccionó el módulo JA Solar JAM72S30-545/MR (545 [W], eficiencia del 21%, tecnología monocristalina PERC) tras un análisis técnico-económico, considerando criterios de eficiencia, confiabilidad y rendimiento. Para satisfacer el consumo promedio diario de 34.87 [kWh/día] con un factor de eficiencia del sistema del 0.98, se estimó una energía generada de 34.17 [kWh/día]. Usando una irradiancia promedio de 5.0717 [HSP] y una performance ratio (pr) de 0.79, se calculó una capacidad instalada requerida de 8.39 [kWp], lo que implica la instalación de 16 paneles de 545 [W].

- La topología del sistema contempla 2 strings de 8 módulos en serie cada uno
- Tensión por string: 397.6 V (Voc) y 334.4 V (Vmp)
- Corriente por string: 13.03 A

Se seleccionó el inversor Growatt MIN 10000TL-X2 (10 kW, 3 MPPT, 16 A por MPPT, conexión AC bifásica), conectado con los dos strings en MPPT 1 y 2, dejando el MPPT 3 disponible para expansión. El diseño cumple con los requisitos del RETIE y la NTC 2050, asegurando seguridad, eficiencia operativa y posibilidad de escalabilidad futura. (Los cálculos y forma más detallada de la selección de los componentes se encuentran en el Anexo 1).

3.3 Dimensionamiento de conductores

En cuanto a selección de conductores a implementar para la instalación fotovoltaica se basó en criterios técnicos como la capacidad de corriente, la distancia de los tramos y el cumplimiento del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Para el caso de estudio se utilizaron conductores de cobre tipo THHN/THWN, adecuados para canalización en ductos y condiciones

de humedad. Para la acometida bifásica desde el poste hasta el nuevo tablero fotovoltaico ya se encuentra instalada y conformada por conductores #8 AWG Cu. Las salidas hacia los tableros principales internos de igual manera cuentan con conductores #8 AWG Cu ya instalados y verificados en cuanto a caída de tensión y capacidad de carga.

Para el lado DC, se seleccionó un conductor de calibre #10 AWG Cu tipo PV Wire, apto para instalaciones fotovoltaicas expuestas al exterior. Este conductor fue dimensionado para una corriente de diseño de 17.11 [A], obtenida al aplicar un factor de seguridad de 125% sobre la corriente nominal del string, la caída de tensión resultante fue de solo 0.25 [V] equivalente a 0.075% cumpliendo así estándares normativos ya nombrados anteriormente que nos dice que no se debe superar el <3% (Para cálculos de selección de conductores ir al Anexo 1).

En el lado AC, que va desde la salida del inversor hasta el tablero fotovoltaico, se consideró una distancia de 22 metros (44 metros ida y vuelta) y una corriente de salida del inversor de 41.7 [A]. Siguiendo las normativas previamente mencionadas, se aplicó un factor de corrección del 125%, lo que llevó a una corriente de diseño de 52.13[A]; para finalmente optar por un conductor #6 AWG Cu THWN-2, con capacidad de 65 [A] el cual cumple con los requisitos de capacidad y caída de tensión permitida (los cálculos de la selección de los conductores se encuentran en el Anexo 1).

Ahora bien, cabe resaltar la importancia del conductor a tierra para el sistema, en este caso se seleccionó un conductor que va desde las estructuras metálicas, el inversor y el tablero al sistema de tierra de la institución, siendo un conductor #8 AWG Cu tipo THWN-2, cumpliendo así normativas vigentes para sistemas de hasta 60 [A]. Importante destacar que este conductor no requiere cálculo de regulación, ya que solo conduce corriente en caso de falla y no durante la

operación normal de sistema; su elección se basa en criterios de seguridad eléctrica y capacidad de corriente de falla.

3.4 Selección de protecciones

Para la garantizar la seguridad y el cumplimiento normativo del sistema fotovoltaico propuesto, se realizó la selección de protecciones eléctricas tanto en el lado de corriente continua como el lado de corriente alterna siguiendo las recomendaciones del Código Eléctrico Nacional (NEC 2020, artículos 690.8 y 690.9), el Reglamento Técnico de Instalaciones eléctricas (Retie 2024).

En el lado de corriente continua, comprendido entre los paneles solares y el inversor, se definieron fusibles por string, este diseño con dos string debido a que el arreglo fotovoltaico cuenta con dos strings se optó por considerar fusibles tipo Gpv DE 15 [A] por cada string, calculado a partir de la corriente de cortocircuito del módulo, multiplicada por un factor de seguridad (125%), además de la instalación de un DPS tipo 2 para DC con tensión nominal de 600 Vdc adecuado para sobretensiones producidas por descargas atmosféricas o conmutaciones. Además, se incluye un seccionador bipolar para corriente continua, con capacidad de corte mínima de 600Vdc o corriente nominal de 20 [A] este con el objetivo de realizar tareas de mantenimiento de manera segura.

Además, para el lado de corriente alterna, desde la salida del inversor hasta el tablero fotovoltaico, se consideró la selección de un interruptor termomagnético bifásico de 60 [A] esto en base a la corriente de salida del inversor 41.7 [A] incluyendo el factor del 125% exigido por el NEC para sistema de generación; también un DPS tipo 2 para 240 Vca bifásico para proteger los equipos frente a sobretensiones de la red pública.

Como dato menos importante se utilizan interruptores termomagnéticos de 30 [A] para las salidas hacia los tableros existentes, ya que a la fecha se encuentran instalados con conductor #8 AWG Cu.

3.5 Elementos complementarios

Además de la correcta selección de los conductores y protecciones eléctricas, un sistema fotovoltaico conectado a red requiere de una serie de componentes adicionales que garantizan su seguridad, durabilidad, funcionalidad y cumplimiento normativo. A continuación, se describen los principales elementos considerados para el diseño de este sistema.

3.5.1 Acoples y conectores (lado DC)

Se emplean conectores tipo MC4 estándar en sistemas fotovoltaicos, para garantizar una conexión segura, resistente a la intemperie (grado de protección IP67) y capaz de manejar las corrientes típicas del arreglo. Se estimaron 8 pares de conectores MC4 (16 unidades) para la conexión de los dos strings y su llegada al inversor.

3.5.2 Canalización y fijación de conductores

Para proteger los cables tanto del lado DC como del lado AC, se seleccionaron tuberías tipo PVC o EMT, dependiendo de si la instalación es subterránea o superficial, y si se encuentra en ambientes internos o expuestos al sol. En tramos donde los conductores ingresan al inversor o a cajas eléctricas, se contemplan prensaestopas o pasacables, los cuales garantizan el sellado contra humedad y polvo.

3.5.3 Estructura de soporte para los módulos

Dado que los paneles se instalarán sobre una cubierta inclinada a 15° con tejas de barro, se consideró una estructura metálica (en aluminio o acero galvanizado) con sistema de anclaje tipo *clamp* y tornillería de acero inoxidable. Este tipo de fijación permite una instalación segura sin perforar o dañar la cubierta; este ítem se detallará en el capítulo 4.

3.5.4 Etiquetas y rotulado de seguridad

En cumplimiento con el RETIE, se contempla la señalización adecuada del sistema con rótulos tales como:

- Peligro: Tensión DC
- Sistema fotovoltaico conectado a red
- Desconectar antes de intervenir

Estos elementos garantizan la seguridad del personal técnico y permiten identificar claramente la infraestructura fotovoltaica.

3.6 Sistema de medida

El sistema de medición para la instalación fotovoltaica cumplirá la normativa colombiana vigente (Resolución CREG 174 de 2021, CREG 030 de 2014, RETIE); al ser un sistema de autogeneración a pequeña escala conectado a la red, se implementará un medidor bidireccional que permita medir la energía consumida como la inyectada siendo esto fundamental ya que actualmente se encuentra un medidor unidireccional sin posibilidad de este manejo por ello la necesidad de este nuevo medidor.

Se propone instalar un medidor electrónico trifásico ISKRA MT174, con lectura en cuatro cuadrantes, precisión clase 1.0 y protocolos de comunicación estándar (RS-485 e IEC 62056-21), compatible con redes de baja tensión (208/120V). El medidor se ubicará en el punto de frontera comercial para que el operador (ESSA) pueda verificar consumo y generación. También la instalación será realizada por personal calificado, siguiendo normativa y su legalización se hará conforme a los procedimientos del operador.

3.7 Simulación en PVGIS

Como parte del proceso se realizó una simulación empleando la plataforma PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), herramienta desarrollada por la Comisión Europea que permite calcular la producción energética de sistemas solares con base en datos climatológicos reales.

Los parámetros ingresados en PVGIS fueron los siguientes:

- Base de datos meteorológicos: PVGIS-ERA5 (2005-2003).
- Tecnología de los módulos: Silicio Cristalino.
- Potencia pico instalada: 8.72 [kWp] (16 módulos de 545 [W]).
- Pérdidas del sistema estimadas: 21%.
- Inclinación del sistema: 15°.
- Azimut: 0° (orientación hacia el sur).
- Posición de montaje: Tejado inclinado.

En base a estos parámetros, se obtuvo una producción energética anual estimada de 11,279.6 [kWh], lo cual representa un rendimiento adecuado para cubrir el 71.89% de la demanda energética del colegio. Estos resultados permiten validar el diseño técnico del sistema propuesto y sirven como base para el comparativo de generación contra demanda del proyecto en estudio (para observar la simulación detallada ir al Anexo 3).

4. Diseño detallado y evaluación financiera del sistema fotovoltaico

En este capítulo se presenta el diseño detallado de la ingeniería requerida para la implementación del sistema fotovoltaico, cubriendo aspectos civiles, mecánicos, eléctricos y estructurales. Se realiza un análisis de la estructura física que soportará los paneles solares, asegurando que la cubierta existente pueda resistir las cargas adicionales y las condiciones ambientales sin comprometer su integridad. Así mismo, se desarrolla el diseño de la conexión eléctrica del sistema con la red interna de la institución, garantizando el cumplimiento de las normativas vigentes para un funcionamiento seguro, eficiente y confiable. El objetivo es ofrecer una solución integral que asegure tanto la estabilidad mecánica como la operatividad eléctrica del sistema durante toda su vida útil proyectada.

Por otra parte, el capítulo incluye un análisis financiero donde se evalúan los costos asociados a la instalación y operación del sistema fotovoltaico. Este estudio considera la inversión inicial necesaria para la adquisición, transporte, instalación y puesta en marcha de los componentes, así como los costos recurrentes vinculados con la operación, mantenimiento y administración del sistema. También se contemplan aspectos logísticos, mano de obra especializada y provisiones para imprevistos, brindando una panorámica realista y completa de los recursos económicos requeridos.

Finalmente, se aborda la viabilidad económica del proyecto mediante la evaluación de diferentes escenarios financieros, incluyendo alternativa de financiamiento y el impacto del ahorro en el consumo energético. A partir de la construcción de flujos de caja proyectados, se estima el

retorno de la inversión y el tiempo necesario para recuperar el capital inicial. Este análisis demuestra la sostenibilidad y los beneficios económicos a mediano y largo plazo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones sobre la implementación del sistema fotovoltaico en la institución.

4.1 Diseño detallado de la Ingeniería de los Sistemas fotovoltaicos

4.1.1 Ingeniería Civil _ Mecánica

La planimetría de la estructura mecánica en cubierta fue desarrollada con base en un sistema de montaje AutoSolar, diseñado para instalaciones fotovoltaicas sobre cubiertas inclinadas con teja de barro. Este sistema está compuesto por rieles de aluminio anodizado de 2.5 metros de longitud, fabricados para soportar cargas uniformemente distribuidas y ofrecer resistencia a la corrosión; clamps tipo U Falcat (intermedios) y clamps tipo F Falcat (finales), que garantizan una fijación mecánica segura de los módulos fotovoltaicos sobre los rieles; soportes específicos para teja de barro, diseñados para adaptarse a cubiertas sin generar perforaciones invasivas ni afectar la integridad del techo; y conectores de puesta a tierra, los cuales aseguran la continuidad eléctrica entre los componentes metálicos de la estructura, cumpliendo con los requisitos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) para la protección contra contactos indirectos. Previo a la instalación del sistema, se recomienda realizar una verificación estructural de la cubierta, con el fin de asegurar que la estructura existente tenga la capacidad mecánica suficiente para soportar el peso adicional del sistema fotovoltaico, considerando las cargas estáticas, dinámicas (como viento y sismo) y térmicas, de acuerdo con lo establecido en la NSR-10 y demás normas técnicas aplicables.

La instalación cuenta un total de 16 módulos fotovoltaicos, los cuales estarán dispuestos con orientación sur e inclinación de 15° , optimizando la captación de radiación solar según las condiciones geográficas del sitio. La disposición y numeración de los paneles e inversor puede observarse en las figuras 1 y 2, donde el inversor fotovoltaico está ubicado a 1.8 metros sobre el nivel del piso, instalado bajo la cubierta para protegerlo de la exposición directa a condiciones climáticas. En el anexo 4 se visualiza de forma detallada los planos de la estructura.

Figura 1.

Numeración paneles.

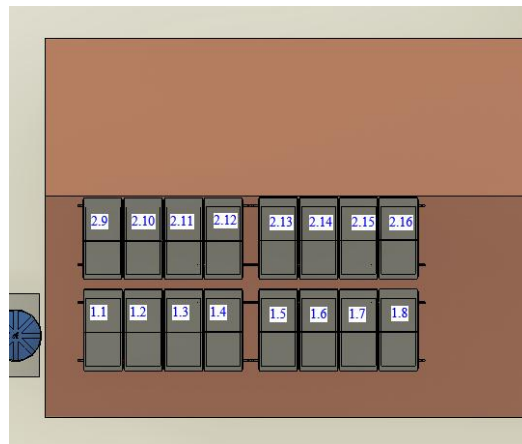
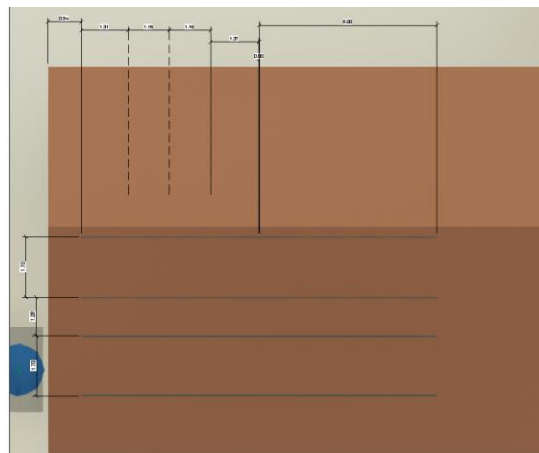


Figura 2.

Sistema de anclaje y soporte para los 16 paneles solares.



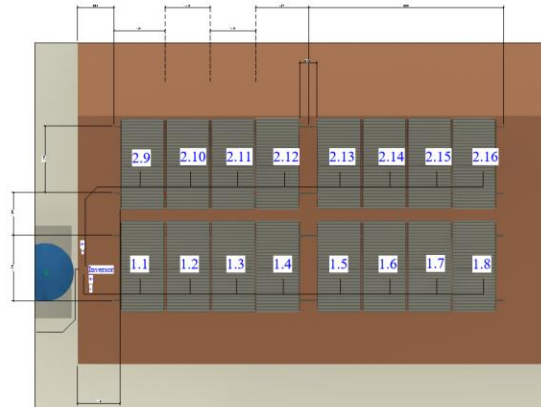
4.1.2 Sistema Eléctrico

El sistema fotovoltaico se conectará a la red eléctrica interna de la institución educativa mediante un inversor de conexión a red, que sincroniza la energía generada con la red local. El análisis realizado indica que la conexión puede realizarse directamente al transformador existente, dado que actualmente no hay otros sistemas conectados a esta red de la AGPE. Este estudio, se detallado en el capítulo 2, confirma la viabilidad de una conexión directa sin la necesidad de transformadores adicionales, cumpliendo estrictamente con los requerimientos establecidos en el RETIE y las disposiciones regulatorias de la CREG 038 y 174 para auto generadores a pequeña escala.

4.1.2.1 Planos eléctricos y de detalle. Se elaboraron planos unifilares y de detalle que describen la configuración eléctrica del sistema fotovoltaico, desde los módulos hasta el punto de interconexión con la red interna de la institución. Los planos incluyen el tendido de cables de corriente continua (DC) desde los 16 paneles solares conectados en dos Sting de 8 paneles cada uno y luego conectados en paralelo hacia el inversor como se muestra en la figura 3, este plano se observa a detalle en el Anexo 5.

Figura 3.

Ruta del cableado hasta los paneles solares.



Se incluye el cableado de corriente alterna (AC) desde la salida del inversor hasta el tablero de distribución, se especificaron las canalizaciones, protecciones eléctricas, seccionadores y puesta a tierra, de acuerdo con las normativas RETIE y NTC 2050.

Además, se elaboró el diagrama unifilar de la instalación del sistema fotovoltaico hasta los tableros donde se distribuyen para la institución, donde se detalla el calibre del conductor a implementar en desde los paneles hasta los tableros. También se explica los tableros de distribución a donde va cada circuito de ellos, teniendo en cuenta la información obtenida en el capítulo 3 para la sección de conductores y protecciones del sistema. Este diagrama se observa de manera mucho más detallada en el Anexo 6.

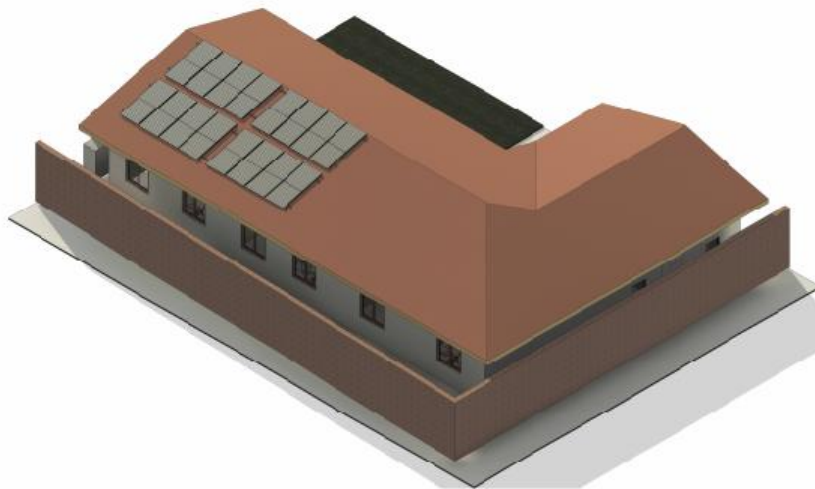
4.1.3 Ingeniería Estructural

El análisis estructural de la cubierta donde se instalará el sistema fotovoltaico es importante para garantizar la integridad mecánica y la seguridad de la instalación. Se debe evaluar la capacidad de carga de la estructura existente antes de instalar el sistema fotovoltaico, la cual está compuesta por una cubierta inclinada con tejas de barro tradicionales soportadas sobre cerchas metálicas y

elementos de madera. El sistema de montaje seleccionado es de tipo Autosolar, con anclajes no invasivos compatibles con cubiertas de teja de barro, se verifico el peso de cada panel siendo este de 27.8 [kg] el cual estará sobre los rieles de aluminio anodizado como fue explicado anteriormente como se observa en la figura 4. La resistencia de los elementos estructurales se encuentra dentro del rango admisible según los esfuerzos calculados para una estructura en teja, sin embargo, se recomienda durante la vida útil del sistema realizar inspecciones visuales periódicas y mantenimiento preventivo en los puntos de apoyo, el cumplimiento de los criterios estructurales garantiza viabilidad física de la implementación del sistema fotovoltaico propuesto, minimizando riesgos de colapso o afectaciones en la infraestructura educativa.

Figura 4.

Modelo en 3D de la instalación de los paneles solares.



4.2 Tramites ante el operador de red

Para la instalación y conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica del operador de red ESSA, es necesario presentar una serie de documentos que permitan el análisis, evaluación y aprobación técnica del proyecto. El proceso inicia con la entrega de un formulario de solicitud de interconexión, documento oficial mediante el cual se formaliza el trámite para la conexión del sistema fotovoltaico a la red.

Además, es indispensable adjuntar una memoria técnica del proyecto que describa detalladamente el sistema, incluyendo las especificaciones técnicas de todos sus componentes, la capacidad instalada, el esquema general de conexión, la ubicación del sistema y las características operativas relevantes. Este documento se puede observar en el Anexo 7 de forma más detallada.

Asimismo, se deben presentar planos eléctricos y estructurales que muestren con claridad el diseño del sistema, detallando el tendido de cables, las protecciones eléctricas, los dispositivos de desconexión y puesta a tierra, así como los elementos estructurales relacionados con la instalación física de los módulos fotovoltaicos y demás equipos. Estos planos permiten verificar la viabilidad técnica y la seguridad de la instalación.

Es necesario también aportar certificados que acrediten el cumplimiento normativo del sistema, asegurando que éste responde a lo establecido en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y en las resoluciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG 038 y 174) para autogeneradores a pequeña escala. La certificación garantiza que el proyecto cumple con los requisitos técnicos y legales correspondientes.

La documentación debe incluir la información del responsable técnico, generalmente un ingeniero electricista, encargado del diseño, supervisión y ejecución del proyecto, certificando que

la instalación se realizó conforme a las normativas y estándares de seguridad. Además, se debe presentar el acta de inspección o aprobación técnica emitida por el operador ESSA, documento que valida que la instalación ha sido revisada y aprobada, y que el sistema fotovoltaico se encuentra en condiciones óptimas para su conexión segura a la red eléctrica.

Este conjunto integral de documentos permite al operador de red evaluar el proyecto desde todas las perspectivas técnicas y normativas, asegurando una interconexión segura, eficiente y conforme a la regulación vigente, lo que contribuye a la sostenibilidad y éxito en la implementación del sistema fotovoltaico.

4.3 Análisis Financiero

En el análisis financiero se presenta una evaluación integral de los costos involucrados en la instalación y operación del sistema fotovoltaico. Este estudio considera tanto la inversión inicial necesaria para la adquisición, transporte e instalación de todos los componentes, como los gastos recurrentes asociados a la operación, mantenimiento y administración del sistema durante su vida útil proyectada. Se contemplan también aspectos relacionados con la logística, mano de obra especializada y la previsión de posibles imprevistos que puedan surgir durante la ejecución del proyecto.

Adicionalmente, el análisis aborda la viabilidad económica del proyecto mediante la evaluación de diferentes escenarios financieros, incluyendo opciones de financiamiento y el impacto del ahorro generado en el consumo energético. Se construyen flujos de caja que permiten estimar el retorno de la inversión y el tiempo requerido para recuperar el capital inicial, mostrando la sostenibilidad y los beneficios económicos a mediano y largo plazo que el sistema aportará a la

institución. En conjunto, esta evaluación proporciona una base sólida para la toma de decisiones en cuanto a la implementación del sistema fotovoltaico. La plantilla utilizada para este análisis fue proporcionada por el profesor Manuel Ortiz Ortiz es de su autoría.

4.3.1 Costo de la instalación del sistema fotovoltaico

Se realizó un análisis detallado de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico, considerando aspectos técnicos y económicos asociados a su adquisición, transporte, instalación y puesta en funcionamiento. En el Anexo 8 se presenta el desglose de cada elemento especificando el valor unitario teniendo en cuenta tanto el suministro como la instalación.

Durante la elaboración del presupuesto se incluyeron los costos de mano de obra calificada, que contempla la participación de un ingeniero encargado y una cuadrilla técnica de apoyo. Asimismo, se consideraron los gastos asociados a herramientas, accesorios complementarios y logística, tales como transporte y materiales menores necesarios para garantizar una correcta instalación.

El valor total estimado para la instalación del sistema es de \$47.000.197 COP. Este monto incluye un porcentaje del 10 % correspondiente a gastos administrativos generales del proyecto, así como una reserva del 4 % destinada a cubrir posibles imprevistos o ajustes durante la ejecución. Se adicionó también un 3 % correspondiente a la utilidad del contratista y el 19 % del impuesto al valor agregado (IVA) aplicado sobre el valor total. Esta estimación representa la inversión inicial de capital necesaria para la implementación del sistema fotovoltaico. En el anexo 9 se observa a detalle el costo de la instalación con las cantidades de cada elemento y su respectivo valor.

4.3.2 Costos recurrentes del sistema fotovoltaico

Durante los 25 años de operación proyectada del sistema solar fotovoltaico, se ha estimado un costo operativo acumulado de \$45.012.926 COP, correspondiente a las actividades necesarias para garantizar su funcionamiento eficiente, seguro y conforme con la normativa vigente. Este análisis considera componentes de administración, mantenimiento, operación técnica, legalización del sistema y reposición de equipos.

El mantenimiento técnico incluye actividades preventivas y correctivas anuales, así como inspecciones bianuales en cumplimiento del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Estas labores están destinadas a conservar la integridad del sistema y a prevenir fallas que afecten la generación de energía. Para ello se asigna una inversión total de \$17.500.000 COP.

La gestión administrativa comprende la coordinación de los mantenimientos, revisión de reportes de generación, actualización documental, seguimiento técnico y atención a requerimientos de la comercializadora de energía (ESSA). Esta labor tiene asignado un presupuesto de \$6.000.000 COP durante 25 años.

En cuanto a la operación del sistema, se contempla la limpieza periódica de los módulos fotovoltaicos y la supervisión del rendimiento general del sistema. Estas acciones, nos ayudan a mantener niveles óptimos de eficiencia, y evita que generen pérdidas por suciedad, tienen un costo estimado de \$7.750.000 COP.

Los aspectos legales asociados al sistema abarcan la legalización inicial del proyecto, incluyendo la firma de los diseños por un ingeniero electricista, la inspección técnica de obra y los trámites ante el operador de red. Estos costos se han estimado en \$1.300.000 COP.

Finalmente, se ha considerado un fondo para la reposición de componentes críticos que, debido a su vida útil o exposición, requieren ser reemplazados durante el periodo de operación.

Esto incluye el inversor (con vida útil aproximada de 12 años), fusibles, protecciones, conectores, estructuras menores y posibles imprevistos técnicos. Para esto se ha previsto un presupuesto de \$12.462.926 COP. En el anexo 10, se encuentra detalladamente cada costo y la cantidad de veces que se debe realizar cada ítem.

4.3.3 Evaluación de Inversión, Financiamiento y Retorno

Se evaluó la inversión total requerida para la instalación del sistema solar fotovoltaico, la cual es de \$47.000.197,05 COP. Esta inversión se analizó bajo un esquema de financiamiento mediante crédito para proyecto de estructura energética, considerando una tasa de interés anual del 15% y un plazo de pago de 10 años, resultando en una cuota mensual estimada de \$587.502,46 COP.

El análisis económico contempla el ahorro generado en el consumo mensual de energía eléctrica de la institución, el cual actualmente representa un gasto promedio de \$1.184.435 COP. Con la implementación del sistema solar fotovoltaico, este valor se reduciría a \$501.340 COP, generando un ahorro mensual estimado de \$683.095 COP. En un tiempo de vida útil del sistema de 25 años, este sistema permitiría alcanzar un ahorro acumulado de \$204.928.614 COP.

El cálculo del ahorro mensual se realizó con base en una plantilla proporcionada por el profesor Germán Osma Pinto en la asignatura de Generación de Energía, la cual permite analizar el comportamiento tarifario considerando el precio de bolsa más reciente de un mes completo. Para este estudio, se utilizó el mes de marzo como referencia. Asimismo, se evaluó el tipo de energía exportada según la normativa vigente, determinando que el sistema generará excedentes tipo 1, los cuales fueron incorporados al modelo para estimar el nuevo valor de la factura energética mensual y los ingresos por energía entregada a la red. El estudio se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 1.*Importación y exportación de energía del sistema solar fotovoltaico.*

Costo unitario	\$	984.65	\$/kWh
Generación (G)	\$	403.9	\$/kWh
Transmisión (T)	\$	56.03	\$/kWh
Distribución (D)	\$	292.11	\$/kWh
Restricciones (R)	\$	14.46	\$/kWh
Pérdidas (P)	\$	85.91	\$/kWh
Comercialización (C)	\$	132.23	\$/kWh

Tabla 2.*Costos unitarios de energía: generación, transmisión y pérdidas.*

Importacion total	396.448699	kWh/mes
Exportacion total	360.4270364	kWh/mes
Excedentes Tipo I	83834.86481	kWh/mes
Excedentes Tipo II	0	kWh/mes
Créditos de energía	83834.86481	kWh/mes
Excedentes Tipo II	0	kWh/mes

Tabla 3.*Factura del servicio de energía eléctrica sin el sistema fotovoltaico.*

Factura de servicio de energía NO AGPE			
Consumo de activa	\$	\$	1,029,943.90
Comercialización AGPE	\$		-
Compra AGPE	\$		-
Subtotal	\$	\$	1,029,943.90
Imp. Alumbrado público	\$	\$	154,491.59
Total	\$	\$	1,184,435.49

Tabla 4.

Factura del servicio de energía eléctrica con el sistema fotovoltaico.

Factura de servicio de energía AGPE		
Consumo de activa	\$	\$ 390,363.21
Comercialización AGPE	\$	\$ 52,422.41
Compra AGPE	\$	\$ -
Subtotal	\$	\$ 442,785.62
Imp. Alumbrado público	\$	\$ 58,554.48
Total	\$	\$ 501,340.10
<hr/>		
Ahorro mensual \$	\$	683,095.38

Con base en estos datos, se elaboró un flujo de caja anual, el cual evidencia un saldo positivo de \$1.147.115 COP desde el primer año de operación, lo que demuestra la viabilidad financiera del proyecto. El análisis también estima un período de recuperación de la inversión (payback) de aproximadamente 6 años, dentro de una vida útil proyectada del sistema de 25 años, lo cual implica 19 años adicionales de beneficios económicos netos para la institución educativa. Los detalles específicos de este análisis se presentan en el Anexo 11, donde se incluye la tabla correspondiente con los flujos financieros del proyecto.

5. Conclusiones

El diseño del sistema fotovoltaico “on-grid” para la sede Santa Bárbara estableció una solución viable, eficiente y segura para cubrir una proporción significativa de la demanda energética diaria de la institución. De igual manera el sistema diseñado tiene una capacidad de 8.72 [kWp] compuesto por 16 módulos de 545 [Wp] cada uno, el cual logra cubrir aproximadamente el 71.89% del consumo eléctrico anual de la institución. Esta cobertura representa una reducción significativa en la dependencia energética de la red convencional, lo que se traduce en menores costos operativos, mejor aprovechamiento de los recursos naturales y una mayor estabilidad energética para el funcionamiento de las actividades escolares.

En términos económicos, el análisis financiero demuestra que la instalación del sistema fotovoltaico es una inversión rentable para la institución. El estudio estimó un ahorro promedio mensual de \$683.095 COP y un retorno de inversión (payback) de aproximadamente 6 años. A lo largo de su vida útil proyectada de 25 años, el sistema permitirá un ahorro acumulado superior a \$204 millones COP. Este resultado se obtuvo considerando una estructura de financiamiento realista, con una tasa de interés del 15% y costos de operación y mantenimiento detalladamente estimados. Así, el proyecto no solo es factible técnicamente, sino también sostenible desde el punto de vista económico.

Adicionalmente, este trabajo aporta un valor significativo en el ámbito educativo y social, ya que la implementación del sistema no solo mejora las condiciones operativas de la escuela, sino que también constituye una herramienta pedagógica concreta para fomentar el conocimiento y la apropiación de tecnologías limpias por parte de los estudiantes, docentes y comunidad.

6. Recomendaciones

Para asegurar un rendimiento óptimo del sistema fotovoltaico durante toda su vida útil, se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo anual que contemple la limpieza periódica de los módulos, la inspección del estado físico de las estructuras de soporte, la verificación de conexiones eléctricas, y la revisión del funcionamiento del inversor y protecciones. Estas acciones son esenciales para prevenir pérdidas por suciedad, corrosión o deterioro de componentes, y permiten anticiparse a posibles fallas operativas.

Dado que el sistema está diseñado bajo la modalidad de autogeneración a pequeña escala (AGPE) conectada a red, es indispensable iniciar de manera anticipada los trámites técnicos y regulatorios ante el operador de red, en este caso ESSA S.A. E.S.P. Esto incluye la presentación del formulario de interconexión, la memoria técnica del proyecto, los planos eléctricos y estructurales firmados por un ingeniero electricista, y los certificados de cumplimiento del RETIE. Además, es necesario contar con un medidor bidireccional aprobado por el operador y legalizar el sistema a través de una inspección técnica.

El diseño propuesto contempla la posibilidad de expansión del sistema fotovoltaico gracias a que el inversor seleccionado (Growatt MIN 10000TL-X2) dispone de un tercer MPPT libre, el cual permite conectar un string adicional en caso de que la demanda energética de la institución aumente o se disponga de recursos adicionales en el futuro. Por tanto, se recomienda mantener esta capacidad de crecimiento como una alternativa estratégica en la planificación a mediano y largo plazo.

Referencias bibliográficas

Electrificadora de Santander S.A. (ESSA). (Año). Normas para sistemas de autogeneración a pequeña escala. <https://www.essa.com.co>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2024). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Resolución 90708 <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/36017/RETIE.pdf>

Autosolar. Tienda online de kits y paneles solares en Colombia. <https://autosolar.co/>

National Aeronautics and Space Administration. NASA. <https://power.larc.nasa.gov/>

Comisión de regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 174 de 2021. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm

Comisión de regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 038 de 2018. <https://celco.com.co/docs/resolucion-creg-038-de-2018/>

National Fire Protection Association. (2020). *Código Eléctrico Nacional (NEC) 2020* (Ed. en español). NFPA. Sección 690: Sistemas fotovoltaicos.