

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL EDIFICIO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PARQUE SOLAR TEPUY

Tipo Sistematización Experiencia Laboral

DEIBY ALEJANDRO ARBOLEDA GARCÍA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Docente asignatura:
María Vilma García Buitrago

Docente Asesor
Claudia Lucia Cortés Cortés

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2026

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

RESUMEN

La presente monografía tiene como intención desarrollar la evaluación técnica y económica de un sistema fotovoltaico para el edificio O&M del Parque Solar Tepuy, ubicado en La Dorada, Caldas, con el fin de analizar la implementación de generación solar fotovoltaica como alternativa para el aprovechamiento de energías renovables y la disminución del consumo de energía eléctrica proveniente de la red.

La base para el desarrollo del trabajo se fundamenta en el análisis de la demanda energética del edificio, las condiciones de irradiación solar de la zona y los criterios técnicos y económicos requeridos para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos conectados a red. Además, se consideran aspectos relacionados con selección de equipos, pérdidas energéticas, generación eléctrica y normativa colombiana aplicable al sector energético.

En esta monografía se logra realizar la caracterización energética del edificio O&M, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y el análisis económico asociado a costos de inversión, operación y mantenimiento del proyecto. De igual forma, se desarrollan criterios de evaluación financiera mediante indicadores aplicables a proyectos de generación renovable.

Así mismo se mostrará la importancia de implementar sistemas fotovoltaicos en instalaciones industriales y operativas como estrategia para fortalecer la eficiencia energética, promover la sostenibilidad y fomentar el uso de fuentes no convencionales de energía dentro del sector eléctrico colombiano. Finalmente, se recomienda considerar en futuros estudios la integración de sistemas de almacenamiento energético y estrategias de gestión inteligente de la energía para optimizar el aprovechamiento del recurso solar.

Palabras clave: sistema fotovoltaico, energía solar, generación distribuida, irradiación solar, eficiencia energética, CAPEX, VPN, TIR, RETIE, Parque Solar Tepuy.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer de manera especial a todas las personas e instituciones que brindaron su apoyo durante el desarrollo de esta monografía.

A la empresa, por permitir el acceso a información técnica y operativa relacionada con proyectos solares fotovoltaicos, así como por el acompañamiento y la experiencia compartida en temas asociados a generación y almacenamiento energético. Su apoyo fue de gran importancia para fortalecer el desarrollo técnico del estudio.

A mi jefe del Área donde laboro, por brindarme la oportunidad de participar e involucrarme en proyectos asociados a parques solares, permitiéndome fortalecer mis conocimientos y adquirir experiencia en el campo de las energías renovables.

A la docente María Vilma García Buitrago, por su orientación académica, disposición y acompañamiento durante el proceso formativo y el desarrollo de la asignatura.

A la asesora Claudia Lucía Cortés Cortés, por su apoyo profesional, sus recomendaciones técnicas y el tiempo dedicado a la revisión y fortalecimiento de este documento.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que de alguna manera aportaron conocimientos, apoyo y motivación para llevar a cabo este proyecto y culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

ACRÓNIMOS

CAPEX Costo de inversión inicial del proyecto fotovoltaico.

COP Costo de operación y mantenimiento del sistema.

CREG Comisión de Regulación de Energía y Gas.

E Energía.

FV Fotovoltaico.

HSP Horas Sol Pico.

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IRENA Agencia Internacional de Energías Renovables.

NASA Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.

NTC Norma Técnica Colombiana.

O&M Operación y Mantenimiento.

PR Performance Ratio o factor de desempeño del sistema fotovoltaico.

RETIE Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

PRI periodo de retorno de la inversión.

TIR Tasa Interna de Retorno.

UPME Unidad de Planeación Minero Energética.

VPN Valor Presente Neto.

BOS Balance of System o componentes auxiliares del sistema fotovoltaico.

DC Corriente continua.

AC Corriente alterna.

MPPT Seguimiento de máxima potencia.

FC NETO Flujo de caja neto anual.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	MARCO TEÓRICO	8
2.1.	antecedentes de la investigación	8
2.2.	bases teóricas	12
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1.	Caracterización del potencial solar para el sistema propuesto	28
3.2.	Proyección de costo para la implementación del sistema de generación fotovoltaico	45
3.3.	Rentabilidad del sistema proyectado en generación fotovoltaica.....	55
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	61
	REFERENCIAS	63

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector energético enfrenta grandes desafíos asociados al crecimiento de la demanda eléctrica, la necesidad de optimizar los recursos naturales y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. En este contexto, las empresas del sector eléctrico desempeñan un papel fundamental en la generación, distribución y gestión eficiente de la energía, integrando tecnologías que permitan garantizar la confiabilidad del sistema y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental.

Empresas Públicas de Medellín (EPM) se ha consolidado como una de las organizaciones más importantes del sector energético en Colombia, destacándose por su liderazgo en la generación de energía, especialmente a partir de fuentes renovables como la hidráulica, y por su creciente participación en proyectos de energías alternativas como la solar fotovoltaica. Estas iniciativas responden a la necesidad global de diversificar la matriz energética y avanzar hacia modelos de producción más sostenibles.

La presente monografía se fundamenta en la experiencia laboral desarrollada durante once años en EPM, desempeñando funciones relacionadas con sistemas de generación hidráulica y proyectos asociados a sistemas solares. A partir de esta experiencia profesional, se analizan los procesos operativos, tecnológicos y técnicos involucrados en la generación de energía, así como la importancia de la integración de diferentes fuentes renovables para fortalecer la seguridad energética y mejorar la eficiencia de los sistemas eléctricos.

De esta manera, esta evaluación técnico-económica busca evidenciar la relación entre la formación académica y la práctica profesional en el sector energético, resaltando la importancia del conocimiento técnico aplicado en el desarrollo, operación y mantenimiento de sistemas de generación eléctrica, particularmente en tecnologías hidráulicas y solares que contribuyen al desarrollo sostenible.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El presente proyecto tiene como objetivo realizar la evaluación técnico–económica de un sistema de generación fotovoltaica para el edificio de operación y mantenimiento del parque solar Tepuy, ubicado en el municipio de La Dorada, departamento de Caldas. Esta propuesta busca atender parte de la demanda energética del edificio y, al mismo tiempo, contribuir a la reducción de los costos asociados al consumo de energía eléctrica.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

2. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo contiene el desarrollo de los antecedentes de la investigación, el marco teórico y la definición de términos básicos.

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los sistemas fotovoltaicos se han consolidado en las últimas décadas como una de las tecnologías más relevantes dentro del desarrollo de las energías renovables a nivel mundial. Su crecimiento ha sido impulsado por la necesidad de diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados a la generación convencional de electricidad. En este contexto, la energía solar fotovoltaica ha adquirido un papel estratégico debido a su capacidad para transformar de manera directa la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, aprovechando una fuente limpia, abundante y disponible en gran parte del planeta (International Energy Agency [IEA], 2023; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2023).

El desarrollo de esta tecnología ha mostrado avances significativos tanto en eficiencia como en reducción de costos. En sus primeras etapas, los sistemas fotovoltaicos se caracterizaban por presentar altos costos de instalación y aplicaciones limitadas, principalmente en sectores especializados como el aeroespacial. No obstante, el progreso en la fabricación de celdas solares, la optimización de materiales semiconductores y la producción a gran escala han permitido una reducción sustancial en los costos de los módulos, facilitando su adopción en sectores residenciales, comerciales e industriales (IRENA, 2023).

Desde el punto de vista técnico, los sistemas fotovoltaicos han evolucionado hacia configuraciones más eficientes, seguras y adaptables. Actualmente, estos sistemas están

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

compuestos por módulos solares, inversores, estructuras de soporte, sistemas de protección, cableado especializado y tecnologías de monitoreo. La incorporación de estos componentes ha permitido mejorar el desempeño global de las instalaciones y garantizar una mayor confiabilidad en la generación de energía eléctrica. Asimismo, los avances en sistemas de monitoreo han facilitado el seguimiento en tiempo real del rendimiento del sistema, optimizando las actividades de operación y mantenimiento (Masters, 2013; Messenger & Ventre, 2010).

En el ámbito global, la energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento acelerado debido a sus beneficios económicos y ambientales. Su implementación en cubiertas de edificaciones, plantas a gran escala y sistemas aislados ha demostrado su versatilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones geográficas y necesidades energéticas. Este crecimiento también ha sido impulsado por políticas públicas, incentivos gubernamentales y marcos regulatorios que promueven el uso de energías renovables, favoreciendo la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles (IEA, 2023).

Uno de los aspectos más relevantes en el desarrollo de los sistemas fotovoltaicos es su integración en edificaciones, conocida como generación distribuida. Esta modalidad permite aprovechar superficies disponibles, como techos y cubiertas, para la instalación de paneles solares, reduciendo las pérdidas por transmisión y contribuyendo a la eficiencia energética. Diversos estudios han demostrado que la generación distribuida no solo disminuye la dependencia de la red eléctrica convencional, sino que también optimiza los costos operativos y mejora la sostenibilidad de las infraestructuras (Kalogirou, 2014).

Adicionalmente, el estado del arte evidencia que el desempeño de los sistemas fotovoltaicos depende de factores como la irradiación solar, la temperatura ambiente, la orientación e inclinación de los módulos y las condiciones de sombreado. Por esta razón, el análisis del recurso solar y las condiciones ambientales del sitio son fundamentales para

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

garantizar un adecuado diseño y una óptima generación de energía. La utilización de herramientas de simulación y bases de datos meteorológicas ha permitido mejorar la precisión en la estimación del potencial energético de estos sistemas (Duffie & Beckman, 2013).

En términos económicos, los sistemas fotovoltaicos han alcanzado una mayor competitividad frente a las fuentes convencionales de generación eléctrica. La disminución de los costos de inversión, sumada a los beneficios derivados del ahorro energético, ha permitido que estos sistemas presenten periodos de recuperación cada vez más favorables. La evaluación financiera mediante indicadores como el retorno sobre la inversión (PRI), la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN) se ha convertido en una herramienta clave para determinar la viabilidad de estos proyectos (Brealey *et al.*, 2020).

Masdar City, en los Emiratos Árabes Unidos, es un referente mundial en el desarrollo de ciudades sostenibles. Dentro de este proyecto, el edificio sede de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) incorpora un sistema fotovoltaico integrado en su diseño arquitectónico, utilizando paneles solares en cubiertas y fachadas. Este sistema permite abastecer una parte significativa de la demanda energética del edificio, reduciendo su dependencia de la red eléctrica convencional. La integración se realizó considerando criterios de eficiencia energética, orientación solar y minimización de sombras, lo que optimiza el rendimiento del sistema. Este caso evidencia cómo los sistemas fotovoltaicos pueden integrarse desde la etapa de diseño arquitectónico, logrando edificaciones energéticamente eficientes y sostenibles (Kalogirou, 2014; IRENA, 2023).

En Estados Unidos la empresa Walmart ha desarrollado uno de los programas de integración de sistemas fotovoltaicos más grandes del mundo en el sector comercial. Este programa consiste en la instalación de sistemas solares en las cubiertas de sus tiendas, centros logísticos y edificios operativos, incluyendo áreas de almacenamiento y

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

mantenimiento. La estrategia de Walmart se basa en la generación distribuida, permitiendo que cada instalación produzca parte de su energía eléctrica y reduzca su consumo de la red. Estos sistemas han sido dimensionados en función de la demanda energética de cada edificio y las condiciones solares locales, logrando importantes ahorros económicos y reducciones en la huella de carbono. Este caso demuestra la escalabilidad de los sistemas fotovoltaicos y su aplicabilidad en edificaciones comerciales e industriales, consolidándose como una solución viable para grandes corporaciones (U.S. Department of Energy, 2020).

En Colombia, Empresas Públicas de Medellín (EPM) ha desarrollado proyectos de generación distribuida mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos en cubiertas de edificios administrativos y operativos. Estas instalaciones permiten aprovechar áreas disponibles en techos para generar energía limpia destinada al autoconsumo, reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional. La implementación de estos sistemas se enmarca en las estrategias de sostenibilidad de la empresa y de la política energética nacional, orientada a la integración de fuentes no convencionales de energía renovable. Este tipo de proyectos demuestra la viabilidad técnica de incorporar sistemas solares en edificaciones institucionales y de mantenimiento, optimizando el consumo energético y reduciendo costos operativos (UPME, 2021).

El Centro Comercial Arkadia ubicado en la ciudad de Medellín es uno de los referentes en Colombia en la implementación de sistemas solares en infraestructura comercial. Este proyecto incluye la instalación de paneles solares en la cubierta del edificio, con el objetivo de generar energía para el consumo interno del centro comercial. La integración del sistema fotovoltaico se realizó considerando la alta demanda energética del establecimiento y la disponibilidad de áreas en cubierta. Como resultado, se ha logrado reducir el consumo de energía de la red, mejorar la eficiencia energética del edificio y disminuir su impacto

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

ambiental. Este caso evidencia el potencial de la energía solar en el sector comercial colombiano (Celsia, 2022).

En la ciudad de Bogotá el Aeropuerto Internacional El Dorado ha implementado sistemas solares fotovoltaicos como parte de sus estrategias de sostenibilidad y eficiencia energética. Estas instalaciones se han integrado en cubiertas y zonas operativas del aeropuerto, permitiendo generar energía eléctrica para el funcionamiento de sus instalaciones. El proyecto busca reducir el consumo energético proveniente de fuentes convencionales y disminuir las emisiones de carbono asociadas a la operación aeroportuaria. Este tipo de iniciativas demuestra la aplicabilidad de los sistemas fotovoltaicos en infraestructuras de gran escala, incluyendo edificaciones de operación y mantenimiento (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020

2.2. BASES TEÓRICAS

Un sistema solar fotovoltaico está compuesto por módulos solares e inversores que trabajan de manera integrada para convertir la radiación solar en energía eléctrica utilizable. Dependiendo del uso final de la energía generada el sistema solar fotovoltaico puede requerir elementos adicionales como transformadores para subir o bajar la tensión. La correcta selección e integración de sus componentes es fundamental para garantizar un funcionamiento eficiente, seguro y confiable (Messenger & Ventre, 2010; Duffie & Beckman, 2013).

Módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos son dispositivos diseñados para convertir la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Están compuestos por múltiples celdas solares conectadas eléctricamente, generalmente fabricadas de silicio, que al recibir fotones generan una corriente eléctrica continua (DC) (Duffie & Beckman, 2013; Messenger

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

& Ventre, 2010). Los módulos fotovoltaicos se clasifican según sus componentes de fabricación en monocristalinos, policristalinos y de película delgada (Duffie & Beckman, 2013). Eléctricamente, los módulos se caracterizan por los siguientes parámetros: voltaje en circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), voltaje en máxima potencia (V_{mp}), corriente en máxima potencia (I_{mp}) y potencia máxima (P_{max}). Con los parámetros eléctricos se construyen las curvas características I–V y P–V con las cuales se calcula la Zona de máxima potencia (MPP) que permite conocer la potencia total de la instalación en voltaje DC (Messenger & Ventre, 2010).

Para tener en cuenta en el cálculo potencia máxima de los módulos hay Factores que afectan el rendimiento como: irradiación solar, temperatura, sombreado, inclinación y orientación (kalogirou, 2014).

Inversor

Un inversor solar es un dispositivo electrónico fundamental en los sistemas fotovoltaicos, encargado de convertir la corriente continua (DC) generada por los módulos solares en corriente alterna (AC), permitiendo así su utilización en equipos eléctricos convencionales o su inyección a la red eléctrica. Además de esta función principal de conversión, los inversores modernos incorporan sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), mecanismos de protección eléctrica y capacidades de monitoreo que optimizan el rendimiento y garantizan la seguridad del sistema. Su correcta selección y dimensionamiento es determinante para la eficiencia global de la instalación fotovoltaica, ya que influye directamente en la calidad de la energía suministrada y en la cantidad de energía aprovechada (Duffie, Beckman, & Blair, 2020; Messenger & Ventre, 2010; IEEE, 2021).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Los inversores solares se pueden clasificar según su escenario de aplicación en diferentes tipos: inversor central, inversor string, Microinversor e inversor híbrido (Messenger & Ventre, 2010) (Duffie *et al.*, 2020) (Masters, 2013) (IRENA, 2023).

Para determinar la compatibilidad entre el arreglo fotovoltaico y el inversor se deben de tener en cuenta los siguientes parámetros eléctricos según la normativa vigente: Potencia nominal AC, Potencia máxima del campo FV, Rango de tensión MPPT, Tensión máxima de entrada DC, Corriente máxima por entrada MPPT, Número de MPPT, Factor de potencia, Grado de protección IP y Compatibilidad con red o baterías (IEC, 2021; IEEE, 2021).

Dimensionamiento del sistema

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico constituye una etapa fundamental dentro del análisis técnico de proyectos de generación solar, ya que permite determinar la capacidad instalada, verificar la compatibilidad entre equipos y estimar la energía generada. Para ello, se emplean diversas relaciones matemáticas que describen el comportamiento eléctrico y energético del sistema, ampliamente abordadas en la literatura especializada en ingeniería fotovoltaica (Duffie *et al.*, 2020; Messenger & Ventre, 2010).

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico del edificio de Operación y Mantenimiento del Parque Solar Tepuy es necesario emplear diferentes ecuaciones técnicas asociadas al análisis energético, dimensionamiento del generador fotovoltaico, selección del inversor y configuración eléctrica del sistema. Estas expresiones permiten establecer de manera adecuada la capacidad requerida del sistema bajo condiciones reales de operación y son ampliamente utilizadas en el diseño de sistemas fotovoltaicos conectados a red (Duffie & Beckman, 2013).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Inicialmente, el consumo energético diario del sistema se determina mediante la Ecuación (1), la cual considera el consumo energético mensual sobre el PR:

$$E = E_{diaria}/PR \quad (1)$$

Donde E corresponde al consumo energético real requerido, PR es el factor de rendimiento global del sistema fotovoltaico (Messenger & Ventre, 2010).

A partir de la radiación promedio anual se obtiene la Hora Solar Pico (HSP), utilizada en el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico, mediante la Ecuación (2):

$$HSP = \frac{GHI\ 1 + GHI\ 2 + \dots}{12} \quad (2)$$

La Hora Solar Pico representa el número equivalente de horas diarias con irradiancia solar de $1000\ W/m^2$, parámetro fundamental para el cálculo de generación energética del sistema (Duffie & Beckman, 2013).

Para calcular el número de módulos se usa la ecuación (3).

$$\#módulos = \frac{E}{HSP * P_{nom}} \quad (3)$$

Posteriormente, para determinar el potencial solar del sitio de instalación, se calcula la radiación promedio anual mediante la Ecuación (4):

$$RP = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{12}}{12} \quad (4)$$

donde RP corresponde a la radiación promedio anual y R_n representa la radiación promedio mensual registrada para cada mes del año (IDEAM, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

La energía diaria producida por cada módulo fotovoltaico se calcula con la Ecuación (5):

$$E_{módulo} = HSP * P_{nom} \quad (5)$$

Donde $E_{módulo}$ representa la energía generada por el panel fotovoltaico durante un día y P_{nom} corresponde a la potencia nominal del módulo seleccionado bajo condiciones estándar STC (JA Solar Technology Co., Ltd., 2023).

El área superficial de cada módulo fotovoltaico se calcula mediante la Ecuación (6):

$$Área_{módulo} = L * A \quad (6)$$

donde L corresponde al largo y A al ancho del panel.

El área total requerida para la instalación del sistema se obtiene mediante la Ecuación (7):

$$A_{Total} = \#módulos * Área_{módulo} \quad (7)$$

Estas ecuaciones permiten determinar el espacio físico requerido para la instalación del generador fotovoltaico sobre la infraestructura disponible.

La potencia instalada total del generador fotovoltaico se calcula mediante la Ecuación (8):

$$P_{FV} = N * P_{nom} \quad (8)$$

donde P_{FV} corresponde a la potencia instalada en corriente continua y N representa el número total de módulos fotovoltaicos.

Para determinar la relación entre la potencia del generador fotovoltaico y la potencia del inversor se utiliza la Ecuación (9), donde P_{inv} *Sugerida*: es un aproximado de la potencia P_{FV} de inversores comerciales.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

$$Relación\ DC/AC = \frac{P_{FV}}{P_{inv}\ Sugerida} \quad (9)$$

Esta relación permite optimizar el aprovechamiento energético del sistema y mejorar el desempeño operativo del inversor bajo condiciones reales de irradiancia solar (Duffie & Beckman, 2013).

Posteriormente, la potencia real requerida del inversor se determina mediante la Ecuación (10):

$$P_{inv} = \frac{P_{FV}}{Relación\ DC/AC} \quad (10)$$

Para la configuración eléctrica del arreglo fotovoltaico se determina inicialmente el número mínimo de módulos conectados en serie mediante la Ecuación (11), donde V_{invmin} = Voltaje mínimo MPPT del inversor y V_{mp} = Voltaje de máxima potencia del módulo fotovoltaico:

$$mín\ N^{\circ}\ paneles\ serie = \frac{V_{invmin}}{V_{mp}} \quad (11)$$

Asimismo, el número máximo de paneles permitidos en serie se calcula mediante la Ecuación (12) donde V_{invmax} = Voltaje máximo de entrada del inversor V_{oc} = Voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico:

$$máx\ N^{\circ}\ paneles\ serie = \frac{V_{invmax}}{V_{oc}} \quad (12)$$

Esta ecuación, garantiza que el arreglo fotovoltaico opere dentro del rango MPPT y los límites eléctricos admisibles del inversor Huawei seleccionado (Huawei Technologies Co., Ltd., 2023).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El voltaje máximo de operación del string fotovoltaico se determina mediante la Ecuación (13), Donde $V_{máxop}$ = Voltaje máximo de operación del string fotovoltaico, $N^{\circ}paneles\ en\ serie$ = Número de módulos conectados en serie y V_{oc} = Voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico

$$V_{máxop} = N_{serie} * V_{oc} \quad (13)$$

Mientras que el voltaje mínimo de operación del arreglo se calcula mediante la Ecuación (14), Donde, $V_{mínop}$ = Voltaje mínimo de operación del string fotovoltaico y V_{mp} = Voltaje de máxima potencia del módulo.

$$V_{mínop} = N_{serie} * V_{mp} \quad (14)$$

El número de ramas o strings en paralelo requeridos para el sistema se calcula mediante la Ecuación (15):

$$N^{\circ}Ramas = \frac{N^{\circ}Paneles}{N^{\circ}Paneles_{serie}} \quad (15)$$

Para verificar la capacidad de corriente del inversor se utiliza la Ecuación (16), correspondiente a la corriente máxima de cortocircuito:

$$I_{cc} = N^{\circ}Ramas * I_{sc} \quad (16)$$

Finalmente, el número total de inversores requeridos para el sistema se determina mediante la Ecuación (17):

$$\#Inversores = \frac{P_{FV}}{P_{Inversor\ comercial}} \quad (17)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Con las anteriores ecuaciones, se da por finalizada la etapa de dimensionamiento del sistema fotovoltaico propuesto para el edificio O&M del Parque Solar Tepuy. Durante esta fase se realizará el análisis de la demanda energética, la estimación del consumo eléctrico, la determinación de la potencia requerida del sistema y la selección de los principales componentes necesarios para su implementación, tales como módulos fotovoltaicos, inversores y elementos asociados al balance del sistema (BOS). De igual manera, se consideraron variables técnicas y operativas como las horas solares pico, el Performance Ratio (PR) y las pérdidas propias de la operación real del sistema, permitiendo obtener un diseño técnicamente coherente y ajustado a las condiciones energéticas del proyecto.

Una vez definido el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico, se procede a realizar la estimación económica del proyecto mediante el cálculo del CAPEX (Capital Expenditure), el cual representa la inversión inicial necesaria para la implementación del sistema solar. Este análisis contempla los costos asociados a los principales equipos y actividades requeridas para la puesta en operación del sistema, incluyendo módulos fotovoltaicos, inversores, estructuras de soporte, elementos del balance del sistema (BOS), instalación y ingeniería. A partir de estas variables económicas, se emplean las ecuaciones correspondientes para determinar el costo total del proyecto, permitiendo establecer posteriormente indicadores financieros y criterios de viabilidad económica para la propuesta de generación fotovoltaica.

Para iniciar el cálculo del CAPEX, iniciamos con la Ecuación (18) corresponde al cálculo del costo total de los módulos fotovoltaicos y se expresa como:

$$C_{módulos} = N_{módulos} \times C_{unitario\ módulo} \quad (18)$$

Esta ecuación permite determinar el valor económico asociado a la adquisición de los paneles solares requeridos para el sistema fotovoltaico. El cálculo se realiza multiplicando

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

la cantidad total de módulos necesarios por el costo unitario de cada panel solar. Este componente representa una de las mayores participaciones dentro del costo total del proyecto, debido a que los módulos constituyen el elemento principal encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica (Duffie & Beckman, 2013).

La Ecuación (19) se utiliza para calcular el costo total de los inversores solares y se representa mediante:

$$C_{inversor} = N_{inv} \times C_{unitario\ inversor} \quad (19)$$

En esta expresión, el costo de los inversores se obtiene multiplicando la cantidad de inversores requeridos por el costo unitario de cada equipo. Los inversores son dispositivos fundamentales dentro del sistema fotovoltaico, ya que convierten la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna compatible con la red eléctrica y las cargas conectadas (Messenger & Ventre, 2010).

La Ecuación (20) corresponde al cálculo del costo de las estructuras metálicas utilizadas para soportar los módulos solares:

$$C_{estructura} = P_{FV} \times C_{estructura/kWp} \quad (20)$$

Esta ecuación relaciona la potencia instalada del sistema fotovoltaico con el costo específico de estructura por kilovatio pico instalado. Las estructuras metálicas garantizan la estabilidad mecánica de los paneles solares y permiten mantener la inclinación y orientación adecuadas para maximizar la captación de energía solar (Masters, 2013).

La Ecuación (21) permite estimar el costo del Balance of System (BOS):

$$C_{BOS} = P_{FV} \times C_{BOS/kWp} \quad (21)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El BOS incluye todos los componentes auxiliares necesarios para la operación segura y eficiente del sistema fotovoltaico, tales como protecciones eléctricas, cableado, canalizaciones, tableros eléctricos, conectores, sistemas de puesta a tierra y demás accesorios complementarios. El costo se calcula en función de la potencia instalada del sistema y del costo específico por kilovatio pico instalado (IRENA, 2023).

La Ecuación (22) se emplea para calcular los costos de instalación y montaje electromecánico del sistema fotovoltaico:

$$C_{instalación} = P_{FV} \times C_{inst/kWp} \quad (22)$$

Esta ecuación contempla los costos asociados a la mano de obra, instalación eléctrica, montaje de estructuras, conexión, configuración y puesta en marcha del sistema solar. El valor total depende de la capacidad instalada y del costo unitario de instalación por kilovatio pico (Duffie & Beckman, 2013).

La Ecuación (23) corresponde al subtotal económico del proyecto fotovoltaico:

$$C_{subtotal} = C_{módulos} + C_{inversor} + C_{estructura} + C_{BOS} + C_{instalación} \quad (23)$$

Mediante esta expresión se obtiene el costo parcial del proyecto antes de considerar los gastos asociados a ingeniería y legalización. El subtotal integra todos los costos directos relacionados con equipos, componentes auxiliares y actividades de instalación.

La Ecuación (24) permite calcular el costo de ingeniería, diseño y legalización del proyecto:

$$C_{ingeniería} = C_{subtotal} \times f_{ing} \quad (24)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

En esta ecuación, el costo de ingeniería se estima como un porcentaje del subtotal del proyecto. Este valor incluye actividades relacionadas con diseño eléctrico, supervisión técnica, estudios de conexión, trámites regulatorios y legalización ante entidades competentes (IRENA, 2023).

La Ecuación (25) representa el costo total de inversión inicial del sistema fotovoltaico, conocido como CAPEX:

$$C_{CAPEX} = C_{módulos} + C_{inversor} + C_{estructura} + C_{BOS} + C_{instalación} + C_{ingeniería} \quad (25)$$

Esta ecuación integra todos los costos directos asociados al diseño, adquisición, instalación y puesta en operación del sistema fotovoltaico. El CAPEX constituye uno de los indicadores más importantes dentro del análisis financiero del proyecto, debido a que permite posteriormente calcular parámetros de rentabilidad como el Valor Presente Neto (VPN), el Retorno sobre la Inversión (ROI), el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) (Masters, 2013).

Finalmente, la Ecuación (26) se utiliza para calcular el costo anual de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico:

$$C_{O\&M} = C_{CAPEX} \times f_{O\&M} \quad (26)$$

Este cálculo considera los gastos periódicos necesarios para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema durante su vida útil, incluyendo actividades de mantenimiento preventivo, limpieza de módulos, inspecciones eléctricas, monitoreo y reposición de componentes menores. Generalmente, este valor se estima como un porcentaje anual del CAPEX total del proyecto (IEA, 2023).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Para calcular la rentabilidad continuamos con la generación anual del sistema fotovoltaico corresponde a la cantidad de energía eléctrica que el sistema puede producir durante un año de operación Ecuación (27). Este cálculo depende de la potencia instalada del sistema fotovoltaico, las horas solares pico disponibles en el sitio, el factor de desempeño del sistema (PR) y las condiciones reales de operación (Duffie & Beckman, 2013; Masters, 2013).

$$E_{anual} = P_{FV} \times HSP \times PR \times 365 \quad (27)$$

El ahorro económico anual representa el beneficio financiero generado por la energía producida por el sistema fotovoltaico Ecuación (28), debido a la reducción del consumo de energía eléctrica proveniente de la red. Este parámetro se calcula multiplicando la energía anual generada por el sistema por la tarifa de energía eléctrica utilizada en el proyecto (Duffie & Beckman, 2013; Blank & Tarquin, 2018).

$$A_{anual} = E_{anual} \times T_{energía} \quad (28)$$

Donde:

- A_{anual} = ahorro económico anual [COP/año]
- E_{anual} = energía anual generada por el sistema [kWh/año]
- $T_{energía}$ = tarifa de energía eléctrica [COP/kWh]

Para calcular el flujo de efectivo neto anual Ecuación (29) corresponde al ahorro económico generado por el sistema fotovoltaico, descontando los costos asociados a operación y mantenimiento del sistema durante cada año de funcionamiento. Este indicador permite determinar el beneficio económico real obtenido por la implementación del sistema fotovoltaico proyectado (Duffie & Beckman, 2013; Blank & Tarquin, 2018).

$$FC_{neto} = A_{anual} - C_{O\&M} \quad (29)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Donde:

- FC_{neto} : flujo de caja neto anual $[COP/año]$.
- A_{anual} : ahorro económico anual generado por el sistema fotovoltaico $[COP/año]$.
- $C_{O\&M}$: costo anual de operación y mantenimiento $[COP/año]$.

Ahora bien, el valor presente Ecuación (30) permite determinar cuánto vale en el presente un flujo de dinero que será recibido en el futuro, considerando una tasa de descuento o tasa de interés. Este cálculo es fundamental para comparar económicamente los beneficios futuros del proyecto con la inversión inicial realizada (Castro & Mokate, 2003).

$$VP = \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (30)$$

Donde:

- VP : valor presente del flujo de efectivo $[COP]$.
- FC_t : flujo de efectivo en el periodo $t[COP]$.
- i : tasa de descuento o interés.
- t : número de años del proyecto.

Para calcular el valor acumulado Ecuación (31) corresponde a la suma progresiva de los valores presentes obtenidos para cada año del proyecto. Este indicador permite identificar el momento en el cual la inversión inicial es recuperada (Blank & Tarquin, 2018).

$$VA_t = VA_{t-1} + VP_t \quad (31)$$

Donde:

- VA_t : valor acumulado del año actual $[COP]$.
- VA_{t-1} : valor acumulado del año anterior $[COP]$.
- VP_t : valor presente del año evaluado $[COP]$.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

La Tasa Interna de Retorno Ecuación (32) representa la tasa de descuento para la cual el Valor Presente Neto del proyecto es igual a cero. Este indicador permite evaluar la rentabilidad financiera del sistema fotovoltaico (Castro & Mokate, 2003).

$$\sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (32)$$

Donde:

- CF_t : flujo de efectivo en el periodo t .
- n : número total de años del proyecto.
- TIR : tasa interna de retorno.

El Valor Presente Neto Ecuación (33) corresponde a la diferencia entre los ingresos descontados generados por el proyecto y la inversión inicial requerida para su implementación. Un VPN positivo indica que el proyecto es económicamente rentable (Castro & Mokate, 2003).

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + i)^t} - C_{CAPEX} \quad (33)$$

Donde:

- VPN : valor presente neto [COP].
- FC_t : flujo de efectivo anual [COP].
- i : tasa de descuento.
- n : vida útil del proyecto.
- C_{CAPEX} : inversión inicial total del proyecto [COP].

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) Ecuación (34) permite determinar el tiempo requerido para recuperar el capital invertido inicialmente en el proyecto fotovoltaico (Blank & Tarquin, 2018).

$$PRI = \frac{C_{CAPEX}}{FC_{neto}} \quad (34)$$

Donde:

- PRI : periodo de recuperación de la inversión [*años*].
- C_{CAPEX} : inversión inicial total [*COP*].
- FC_{neto} : flujo de caja neto anual [*COP/año*].

Con el planteamiento y desarrollo de las ecuaciones financieras anteriormente descritas, se establece la metodología necesaria para evaluar el comportamiento económico del sistema fotovoltaico propuesto. Estos cálculos permiten analizar la relación entre la inversión inicial, los costos de operación y los beneficios económicos asociados a la generación de energía solar durante la vida útil del proyecto. De esta manera, los indicadores financieros formulados constituyen una herramienta fundamental para determinar la viabilidad y conveniencia económica de la implementación del sistema fotovoltaico en el edificio O&M del Parque Solar Tepuy.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La solución del proyecto se desarrolla mediante la caracterización de la demanda energética del edificio O&M del Parque Solar Tepuy, el análisis del recurso solar disponible y el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico. Posteriormente, se realiza la evaluación económica y financiera del proyecto mediante indicadores como CAPEX, VPN, TIR y periodo de recuperación, permitiendo analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema fotovoltaico bajo las condiciones operativas del proyecto.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología anteriormente propuesta para el desarrollo del proyecto



Nota. Elaboración propia

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR PARA EL SISTEMA PROPUESTO

Las condiciones climáticas del parque solar Tepuy ubicado en el municipio de La Dorada, departamento de Caldas, constituyen un factor determinante en el dimensionamiento y desempeño de los sistemas fotovoltaicos, debido a su influencia directa sobre la disponibilidad del recurso solar y la eficiencia de los equipos. Esta región, localizada en el Magdalena Medio colombiano, presenta características típicas de clima tropical, con altos niveles de radiación solar, temperaturas elevadas y humedad significativa, lo que la posiciona como una zona con alto potencial para la generación de energía fotovoltaica (IDEAM, 2022; UPME, 2023).

Por otro lado, la temperatura ambiente promedio anual en La Dorada oscila entre 27 °C y 30 °C, con valores máximos que pueden alcanzar los 34 °C y mínimos cercanos a 22–24 °C. Estas condiciones térmicas influyen directamente en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, dado que el incremento de la temperatura de operación provoca una reducción en la potencia de salida, afectando los términos asociados a la potencia en corriente continua (P_{DC}) y, por ende, la potencia útil en corriente alterna (P_{AC}), definida en la Ecuación (6) (Duffie *et al.*, 2020; IDEAM, 2022).

En cuanto a la humedad relativa, esta presenta valores promedio entre el 70% y el 80%, alcanzando niveles cercanos al 85% durante periodos de alta precipitación. Este factor incide en la dispersión de la radiación solar, aumentando la componente difusa y reduciendo la radiación directa, lo cual puede influir en el desempeño del sistema y en los parámetros energéticos considerados (WMO, 2021; IDEAM, 2022).

Adicionalmente, la precipitación anual en la región se encuentra entre 2.000 y 3.000 mm/año, con picos en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, correspondientes a

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

las temporadas lluviosas características del clima tropical colombiano. Estas condiciones afectan la disponibilidad del recurso solar y pueden influir en la continuidad de la generación energética estimada mediante las (IDEAM, 2022).

Por su parte, la velocidad del viento en La Dorada es relativamente baja, con valores promedio entre 1,5 y 3 m/s. Este factor tiene una influencia limitada en el enfriamiento de los módulos fotovoltaicos, lo cual puede contribuir a mantener temperaturas elevadas en los paneles y afectar indirectamente la potencia generada, relacionada con las variables eléctricas descritas en la Ecuación (10) (NASA, 2023).

Las pérdidas en sistemas fotovoltaicos se distribuyen en diferentes componentes, cuyos valores típicos han sido ampliamente documentados en la literatura técnica. En este sentido, las pérdidas por efecto de temperatura se encuentran generalmente entre el 5% y el 10%, debido a la reducción de eficiencia de los módulos con el incremento de la temperatura de operación (Duffie & Beckman, 2013). Por su parte, las pérdidas por suciedad (*soiling*), asociadas a la acumulación de polvo y contaminantes sobre la superficie de los módulos, se estiman en un rango entre el 2% y el 5% (Messenger & Ventre, 2010).

Asimismo, las pérdidas en conductores eléctricos, derivadas del efecto Joule, suelen ubicarse entre el 1% y el 3%, dependiendo de las condiciones de diseño e instalación del sistema (IEA, 2023). En cuanto a las pérdidas en el inversor, estas se encuentran típicamente entre el 2% y el 5%, relacionadas con la eficiencia de conversión de corriente continua a corriente alterna (IRENA, 2023). Finalmente, las pérdidas por desajuste o *mismatch*, ocasionadas por variaciones entre módulos, se estiman entre el 1% y el 3% (Messenger & Ventre, 2010).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

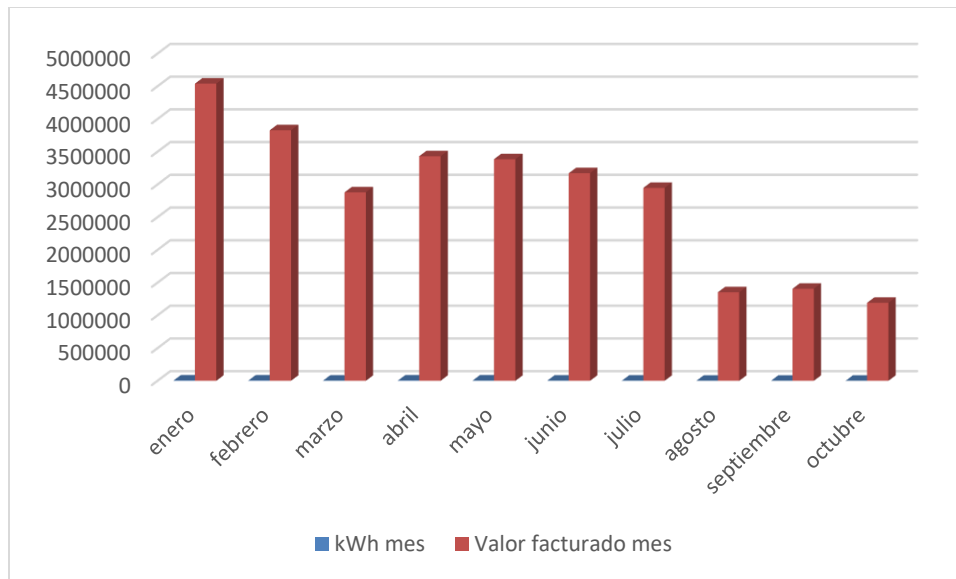
Finalmente, la cobertura nubosa en la zona es variable a lo largo del año, siendo moderada a alta durante las épocas lluviosas, lo que genera una disminución de la irradiancia directa (DNI) y un aumento de la irradiancia difusa (DHI). Este comportamiento afecta la forma en que la radiación es aprovechada por los módulos fotovoltaicos y, por tanto, incide en la estimación de la energía generada mediante la Ecuación (7) (IRENA, 2023).

Las condiciones climáticas de La Dorada evidencian un alto potencial para el desarrollo de sistemas fotovoltaicos, aunque es necesario considerar los efectos de la temperatura, la humedad, la precipitación y la variabilidad atmosférica en el desempeño real del sistema, especialmente en los parámetros energéticos y eléctricos previamente definidos en el modelo de cálculo.

El área disponible para la instalación es de 200 m², con una configuración en suelo, una inclinación de 5° y una orientación hacia el oeste. Adicionalmente, se considera un nivel de sombras del 2 %, lo cual indica una afectación mínima sobre la captación de radiación solar (Duffie & Beckman, 2013).

El dimensionamiento y análisis técnico–financiero del sistema fotovoltaico propuesto para el edificio de operación y mantenimiento del parque solar Tepuy ubicado en el municipio de La Dorada, Caldas, se desarrolla a partir de los datos de consumo energético, condiciones climáticas y parámetros técnicos de los equipos, siguiendo las relaciones matemáticas previamente definidas. A continuación, se presentan los datos de consumo energético del edificio del Operación y mantenimiento del parque solar Tepuy.

Figura 2 Costo mensual en \$ COP desde el mes de enero a octubre del año 2025



Nota. Elaboración propia con datos de consumos energéticos, datos de facturas de energía.

Se tienen datos de 10 meses facturados del año 2025, desde el mes de enero hasta el mes de octubre con consumos que se encuentran entre 4741 kWh y 1384kWh Figura 2 considerando un consumo mensual promedio de 3019 kWh y una energía diario de 100.63kWh

Para continuar con el análisis técnico del sistema fotovoltaico se presentan los parámetros técnicos de los módulos solares e inversores.

$$PR = \text{Performance Ratio}$$

$$PR = 0,80$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El valor del PR adoptado es técnicamente consistente con el comportamiento operativo de sistemas fotovoltaicos comerciales conectados a red, considerando las pérdidas asociadas a temperatura, inversores, conductores, suciedad y demás condiciones reales de operación. Asimismo, este criterio se encuentra alineado con lineamientos y estrategias de transición y eficiencia energéticas promovidos en Colombia mediante políticas nacionales como el (CONPES 4075, 2022).

Empezando con la Ecuación (1) para integrar las pérdidas se utiliza el parámetro denominado Performance Ratio (*PR*), el cual representa el factor de rendimiento global del sistema fotovoltaico. Para el caso del proyecto del edificio de Operación y Mantenimiento del Parque Solar Tepuy es 0.80.

El consumo energético real requerido del sistema se obtiene mediante la Ecuación (1)

$$E = \frac{100,63kWh}{0,80} \quad (35)$$

$$E = 125,7 kWh/día$$

Con el fin de compensar las pérdidas energéticas del sistema y garantizar el suministro eléctrico requerido por las cargas proyectadas en condiciones reales de operación.

Para determinar la Hora Solar Pico (HSP) Tabla 1 del proyecto se emplearon datos meteorológicos estimados para el municipio de La Dorada, Caldas, obtenidos a partir de bases de datos climáticas de NASA POWER, UPME e IDEAM, las cuales proporcionan información de irradiación horizontal global promedio mensual para la zona de estudio.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Tabla 1. Variables meteorológicas promedio del sitio de instalación del sistema fotovoltaico en La Dorada, Caldas

Mes	Irradiación horizontal global (kWh/m ² ·día)	Irradiación difusa horizontal (kWh/m ² ·día)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Turbidez Linke (-)	Humedad relativa (%)
Enero	5.1	1.82	27.6	2.1	5.12	74.5
Febrero	5.25	1.95	28.1	2.3	5.35	72.8
Marzo	5	2.15	28.7	2.4	5.6	75.2
Abril	4.9	2.32	29.1	2	5.88	77.4
Mayo	4.75	2.4	29.4	1.85	6.05	79.1
Junio	4.85	2.28	29.2	1.95	5.92	78.6
Julio	5.05	2.1	29.3	2.05	5.7	76.4
Agosto	5	2.18	29	1.98	5.55	77.2
Septiembre	4.7	2.36	28.8	1.7	5.48	80.3
Octubre	4.6	2.42	28.4	1.6	5.3	82.1
Noviembre	4.75	2.08	27.9	1.75	5.18	81
Diciembre	4.95	1.86	27.7	2	5.1	76.8

Nota. Elaboración propia con datos de datos meteorológicos promedios usados para el análisis del recurso solar y condiciones climáticas del proyecto fotovoltaico del edificio de Operación y Mantenimiento (O&M) del Parque Solar Tepuy, ubicado en La Dorada, Caldas. Información adaptada de bases de datos satelitales y atlas de radiación solar utilizados para evaluación de sistemas fotovoltaicos.

A partir de los valores anteriores Tabla (1) se calcula con la Ecuación (4) el promedio anual de irradiación global, correspondiente a las Horas Sol Pico del sitio:

$$HSP = \frac{5,10 + 5,25 + 5,00 + 4,90 + 4,75 + 4,85 + 5,05 + 5,00 + 4,70 + 4,60 + 4,75 + 4,95}{12} \quad (36)$$

$$HSP = 4,91$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Seleccionando un valor práctico de diseño:

$$HSP \approx 5h$$

Para calcular el número de módulos fotovoltaicos requeridos por el sistema se utiliza la Ecuación (5), para el proyecto fotovoltaico del edificio de Operación y Mantenimiento del Parque Solar Tepuy, se selecciona el módulo fotovoltaico JA Solar modelo JAM72D30-545/MB Tabla 2 comercial con potencia nominal de: $P_{nom} = 545W = 0,545kW$

Tabla 2 Parámetros mecánicos del módulo fotovoltaico JA Solar JAM72D30-545/MB

Parámetros Mecánicos Del Módulo Fv	Valor
Marca del panel	JA Solar
Modelo	JAM72D30-545/MB
Tipo de celda	Monocristalina
Número de celdas	144 (6×24)
Dimensiones	2278 × 1134 × 35 mm
Peso	28.6 kg
Tamaño sección transversal del cable	4 mm ²
Conector	MC4 compatible
Caja de conexión	IP68, 3 diodos

Nota. Elaboración propia con datos tomados de la ficha técnica del módulo JA Solar JAM72D30-545/MB (JA Solar, 2023).

Tabla 3. Parámetros eléctricos en STC del módulo fotovoltaico JA Solar JAM72D30-545/MB

Parámetros Eléctricos En Stc Del Módulo Fv	Valor
Potencia máxima nominal [W]	545
Voltaje de circuito abierto Voc [V]	49.75
Voltaje de máxima potencia Vmpp [V]	41.8
Corriente de corto circuito Isc [A]	13.93
Corriente de máxima potencia Impp [A]	13.04
Eficiencia del módulo [%]	21.3
Tolerancia de potencia	0 ~ +5 W

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Nota. Elaboración propia con datos tomados de la ficha técnica del módulo JA Solar JAM72D30-545/MB (JA Solar, 2023).

Tabla 4. Coeficientes de temperatura y condiciones STC del módulo fotovoltaico JA Solar JAM72D30-545/MB

Parámetros Eléctricos En Stc Del Módulo Fv	Valor
Coeficiente de temperatura de Isc	+0.045 %/°C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.275 %/°C
Coeficiente de temperatura de Pmáx	-0.350 %/°C
STC	Irradiancia 1000 W/m², temperatura de celda 25 °C, AM1.5G

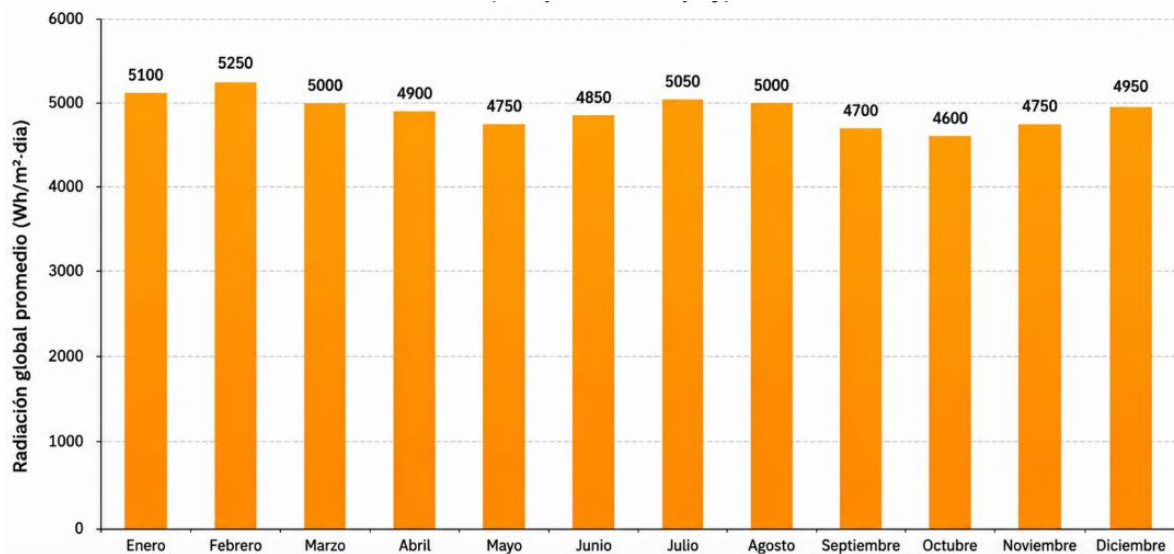
Nota. Elaboración propia con datos tomados de la ficha técnica del módulo JA Solar JAM72D30-545/MB (JA Solar, 2023).

Para calcular el número de módulos se usa la Ecuación (3)

$$\#módulos = \frac{125,7}{5,0 * 0,545} \quad (37)$$

$$\#módulos = 46$$

Figura 3. Radiación global promedio mensual para el proyecto fotovoltaico en La Dorada, Caldas



Nota. Elaboración propia con datos de La radiación global promedio corresponde a la energía solar incidente diaria sobre una superficie horizontal. Los valores se expresan en Wh/m²·día y su equivalente en kWh/m²·día. Información adaptada para el análisis del recurso solar del proyecto fotovoltaico del edificio O&M del Parque Solar Tepuy, ubicado en La Dorada, Caldas.

Para el cálculo de radiación promedio anual RP se usa la Ecuación (4), con los datos de la Figura 3.

$$RP = \left(\frac{5100+5250+5000+4900+4750+4850+5050+5000+4700+4600+4750+4950}{1000} \right) \quad (38)$$

$$RP = 58,90$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	05
			Fecha	11-06-2025

La energía generada por un módulo fotovoltaico durante las Horas Sol Pico se calcula con la Ecuación (5) mediante:

$$E_{módulo} = 46 * 545W \quad (39)$$

$$E_{módulo} = 25070Wh/día$$

Equivalente a:

$$E_{módulo} = 25kWh/día$$

Para el cálculo del área requerida para el emplazamiento y de acuerdo con la ficha técnica del módulo JA Solar JAM72D30-545/MB, las dimensiones del panel corresponden a: Largo: $L = 2.278m$ y un Ancho: $A = 1.134m$

El área superficial de cada módulo se calcula mediante la ecuación (6):

$$Área_{módulo} = 2,278 * 1,1348 \quad (40)$$

$$Área_{módulo} = 2,583m^2$$

Con esta información se calcula el área total requerida para la instalación de los módulos con la ecuación (7):

$$A_{Total} = 46 * 2,5838 \quad (41)$$

$$A_{Total} = 119m^2$$

Por consiguiente, el sistema fotovoltaico requiere aproximadamente: $119m^2$ de superficie disponible para la instalación del campo solar, se cuenta con un área de $200m^2$.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Para calcular la potencia nominal del inversor se parte de la potencia instalada del campo fotovoltaico, primero se calcula la potencia total DC con la Ecuación (8):

Entonces:

$$P_{FV} = 46 * 0,545 \quad (42)$$

$$P_{FV} = 25,07 \text{ kWp}$$

Se selecciona inversor de potencia $P_{inv \text{ sugerido}} = 25 \text{ kW}$ Comercial Tabla (5)

Tabla 5. Características técnicas del inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5

Parámetro	Valor
Modelo	Huawei SUN2000-25KTL-M5
Tipo de inversor	On-grid trifásico
Potencia nominal AC	25 kW
Potencia máxima aparente AC	27,5 kVA
Potencia máxima DC recomendada	37,5 kWp
Voltaje máximo DC	1.100 V
Voltaje de arranque	200 V
Rango de voltaje MPPT	200 – 1.000 V
Voltaje nominal DC	600 V
Corriente máxima por MPPT	30 A
Número de MPPT	2
Número de entradas por MPPT	2
Frecuencia nominal	60 Hz
Voltaje nominal AC	220 V / 380 V / 480 V
Tipo de conexión	Trifásica
Factor de potencia	0,8 adelantado – 0,8 atrasado
Grado de protección	IP66
Método de enfriamiento	Convección natural
Temperatura de operación	-25 °C a 60 °C
Dimensiones aproximadas	640 × 530 × 270 mm

Nota. Elaboración propia con datos tomados de la ficha técnica Huawei SUN2000-5KTL-M1 (JA Solar, 2023).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Para calcular la *Relación DC/AC* se usa la Ecuación (9):

$$Relación\ DC/AC = \frac{25,07}{25} \quad (43)$$

$$Relación\ DC/AC = 1$$

1.0 – 1.2 es el Rango recomendado y más utilizado

Para calcular la potencia del inversor se usa la ecuación (10)

$$P_{inv} = \frac{25,07}{1} \quad (44)$$

$$P_{inv} = 25kW$$

Para determinar el número mínimo y máximo de módulos fotovoltaicos a usar y que pueden conectar en serie y paralelo, se utiliza las siguientes condiciones:

El número mínimo de módulos en serie se calcula mediante la ecuación (11), para el inversor H Huawei SUN2000-25KTL-M1 se tiene los valores: $V_{inv\min} = 200V$ Y para el módulo JA Solar JAM72D30-545/MB un valor de: $V_{mp} = 41,80V$

$$mín\ N^{\circ}\ de\ paneles\ en\ serie = \frac{200V}{41.80V} \quad (45)$$

$$mín\ N^{\circ}\ de\ paneles\ en\ serie = 4,78$$

Por lo tanto:

$$mín\ N^{\circ}\ de\ paneles\ en\ serie \approx 5$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Para calcular el número máximo de módulos en serie se calcula mediante la ecuación (12), para el inversor Huawei SUN2000-5KTL-M1Tabla 5 $V_{inv\max} = 1100V$ y para el módulo JA Solar: $V_{oc} = 49.75V$

$$\text{máx } N^{\circ} \text{ de paneles en serie} = \frac{1100V}{49,75V} \quad (46)$$

$$\text{máx } N^{\circ} \text{ de paneles en serie} = 22,11$$

Por lo tanto:

$$\text{máx } N^{\circ} \text{ de paneles en serie} \approx 22$$

Con base en los resultados anteriores, el rango permitido de módulos fotovoltaicos conectados en serie para el proyecto corresponde a:

$$5 \leq N^{\circ} \text{ de paneles en serie} \leq 22$$

Este rango garantiza que el arreglo fotovoltaico opere dentro de los límites eléctricos permitidos por el inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5 Tabla 5, evitando condiciones de sobretensión o funcionamiento fuera del rango MPPT bajo diferentes condiciones climáticas y operativas del sistema.

La verificación de la selección en el diseño del sistema fotovoltaico del edificio de Operación y Mantenimiento del Parque Solar Tepuy se optó por configurar 9 *paneles en serie* para el inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5 Tabla (5), esta configuración se selecciona debido a que permite operar adecuadamente dentro del rango MPPT del inversor y garantiza compatibilidad eléctrica con el módulo fotovoltaico JA Solar JAM72D30-545/MB Tabla (3).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El voltaje máximo de operación del arreglo fotovoltaico se calcula mediante la Ecuación (13), Sustituyendo los valores del proyecto:

$$V_{máxop} = 9 * 49,75V \quad (47)$$

$$V_{máxop} = 447 V$$

Este valor se encuentra dentro del límite máximo permitido por el inversor Huawei:

$$V_{invmax} = 1100V$$

De igual manera, el voltaje mínimo de operación del arreglo se calcula mediante la Ecuación (14), Sustituyendo:

$$V_{mínop} = 9 * 41,80V \quad (48)$$

$$V_{mínop} = 376 V$$

Este valor se encuentra dentro del rango MPPT del inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5:

$$200V \leq MPPT \leq 1000V$$

Por lo tanto, la configuración seleccionada de:

9 módulos en serie

Garantiza un funcionamiento adecuado del sistema fotovoltaico, permitiendo que el inversor opere dentro de sus límites eléctricos y optimizando el seguimiento del punto de máxima potencia bajo las condiciones climáticas del municipio de La Dorada, Caldas.

Para calcular el número de ramas o strings en paralelo se utiliza la ecuación (15), Como en el diseño se seleccionaron $N^{\circ} \text{ Paneles}_{Serie} = 9$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Entonces:

$$N^{\circ} \text{ de Ramas} = \frac{46}{9} \quad (49)$$

$$N^{\circ} \text{ de Ramas} = 5$$

Por lo tanto, se requieren aproximadamente:

$$N^{\circ} \text{ de Ramas} \approx 5 \text{ ramas o strings}$$

Para la verificación de esta selección, La corriente máxima de cortocircuito por rama corresponde a la corriente de cortocircuito del módulo JA Solar Tabla (3):

$$I_{sc} = 13,93A$$

Si se conectan 2 ramas por MPPT, la corriente de cortocircuito por MPPT será según la ecuación (16):

$$I_{cc} = 2 * 13,93A \quad (50)$$

$$I_{cc} = 27,8A$$

El inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5 Tabla (5), soporta aproximadamente:

$$I_{MPPT \max} = 30A$$

La corriente está dentro del parámetro del inversor

Para calcular el Número de inversores y la potencia total del campo fotovoltaico se utiliza P_{FV} , Luego, el número de inversores requeridos se calcula mediante la ecuación (17):

$$\#inversores = \frac{25,07kW}{25kW} \quad (51)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

$$\#inversores = 1$$

Por lo tanto, se selecciona:

$$\#inversores \approx 1$$

En consecuencia, para el proyecto se recomienda un inversor Huawei SUN2000-25KTL-M5 Tabla (5) de 25 kW, el cual resulta adecuado para una potencia fotovoltaica instalada de 25.07 kWp.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Tabla 6. Resumen de parámetros y resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico del edificio O&M – Parque Solar Tepuy

Parámetro	Valor
Consumo energético diario	100.63 kWh/día
Performance Ratio (PR)	0.8
Consumo energético real (E)	125.7 kWh/día
Hora Solar Pico (HSP)	5 h
Radiación promedio anual	4.91 kWh/m ² ·día
Marca del módulo FV	JA Solar
Modelo del módulo FV	JAM72D30-545/MB
Potencia nominal del módulo	545 W
Voltaje Vmp	41.80 V
Corriente Imp	13.04 A
Voltaje Voc	49.75 V
Corriente Isc	13.93 A
Eficiencia del módulo	21.30%
Número total de módulos	46
Potencia instalada DC	25.07 kWp
Área por módulo	2.58 m ²
Área total requerida	119 m ²
Marca del inversor	Huawei
Modelo del inversor	SUN2000-25KTL-M5
Potencia nominal del inversor	25 kW
Rango MPPT	200 – 1000 V
Voltaje máximo DC	1100 V
Eficiencia máxima del inversor	98.40%
Relación DC/AC	1
Número de ramas en paralelo	1
Corriente máxima por MPPT	27.8 A
Número de inversores requeridos	1

Nota. Elaboración propia con base en el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico del proyecto Parque Solar Tepuy y datos técnicos de JA Solar y Huawei.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

3.2. PROYECCIÓN DE COSTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

Una vez realizado el dimensionamiento del sistema fotovoltaico Tabla (6), se procede a desarrollar la proyección de costos asociada a su implementación, con el fin de evaluar su viabilidad económica. Este análisis incluye la estimación de la inversión inicial requerida, así como los costos de operación y mantenimiento.

La proyección económica se fundamenta en los parámetros técnicos previamente definidos en el apartado anterior y se resumen en la Tabla (6), permitiendo establecer un costo específico por unidad de potencia instalada. Adicionalmente, se consideran los beneficios económicos derivados de la generación de energía, representados en el ahorro por consumo eléctrico, lo cual constituye un factor determinante en la evaluación de rentabilidad del proyecto.

Para efectos de cálculo técnico–económico, se asume un valor razonable y comercialmente coherente según Tabla (6):

Tabla 7. Precio comercial aproximado del módulo fotovoltaico JA Solar JAM72D30-545/MB en Colombia

Concepto	Valor aproximado (COP)
Precio comercial	900.000

Nota. Elaboración propia con datos de valores comerciales aproximados para módulos fotovoltaicos monocristalinos JA Solar de 545 W (JA Solar, 2023) en el mercado colombiano durante 2025–2026. Los precios pueden variar según distribuidor, cantidad adquirida, tasa de cambio, transporte e impuestos.

$$C_{\text{unitario módulo}} = 900.000 \text{ COP}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Por lo tanto, el sistema usara:

$$N_{\text{módulos}} = 46$$

El costo total de módulos sería según la Ecuación (18) y datos de la Tabla (7):

$$C_{\text{módulos}} = 46 \times 900.000 \text{ COP} \quad (52)$$

$$C_{\text{módulos}} = 41.400.000 \text{ COP}$$

Para calcular el costo del inversor se una la Ecuación (19), usando un valor promedio de la tabla (8)

Tabla 8. Precio comercial aproximado de inversores solares on-grid en Colombia

Referencia aproximada	Potencia	Precio aproximado (COP)
Huawei SUN2000-25KTL-M5	25 kW	22.000.000

Nota. Elaboración propia con valores comerciales aproximados para inversores solares trifásicos on-grid en Colombia durante 2025–2026. Los precios pueden variar según proveedor, tasa de cambio, importación, garantía y disponibilidad comercial.

Para efectos de cálculo técnico–económico de tu proyecto, un valor comercial razonable sería según Tabla (8).

$$C_{\text{unitario inversor}} = 22.000.000 \text{ COP}$$

Considerando el Huawei SUN2000-25KTL-M5 de una potencia de $P_{\text{inv}} = 25 \text{ kW}$ y un

$$N_{\text{inv}} = 1$$

Aplicación en la Ecuación (19)

$$C_{\text{inversor}} = 1 \times 22.000.000 \quad (53)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

$$C_{\text{inversor}} = 22.000.000 \text{ COP}$$

Los costos asociados a las estructuras metálicas del sistema fotovoltaico fueron estimados a partir de valores comerciales promedio del mercado colombiano para proyectos solares conectados a red de mediana escala. Estos costos incluyen elementos como perfilera de aluminio anodizado, estructuras galvanizadas, sistemas de fijación, anclajes, tornillería inoxidable y accesorios mecánicos necesarios para el montaje de los módulos solares. En Colombia, el costo comercial de estructuras fotovoltaicas para cubiertas industriales y sistemas comerciales normalmente oscila entre 800.000 y 1.200.000 COP/kWp instalado, dependiendo del tipo de cubierta, condiciones mecánicas, configuración del sistema y proveedor seleccionado. Estos valores son coherentes con referencias internacionales de costos para sistemas fotovoltaicos comerciales reportadas por la International Renewable Energy Agency (IRENA) y estudios técnicos de sistemas de generación fotovoltaica (IRENA, 2023; Masters, 2013).

Tabla 9. Rango comercial de estructuras fotovoltaicas en Colombia

Tipo de estructura	Rango comercial aproximado
Estructura en suelo	1.000.000 COP/kWp

Nota. Elaboración propia con valores aproximados obtenidos a partir de referencias comerciales de integradores fotovoltaicos y costos promedio reportados en proyectos solares comerciales en Colombia.

Tomando el valor de $C_{\text{estructura/kWp}} = 1.000.000 \text{ COP/kWp}$ Tabla (9) que es un valor establecido a partir de referencias comerciales utilizadas en proyectos fotovoltaicos conectados a red de mediana escala en Colombia y contempla los principales elementos requeridos para el soporte mecánico de los módulos solares. Dentro de estos componentes

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

se incluyen estructuras de aluminio anodizado, perfilera galvanizada, tornillería inoxidable, anclajes, sistemas de fijación y parte de la mano de obra asociada al montaje mecánico de la estructura. Asimismo, este costo considera las condiciones típicas de instalación sobre cubierta para sistemas solares comerciales, garantizando estabilidad estructural, resistencia mecánica y adecuada fijación de los módulos fotovoltaicos durante la vida útil del proyecto. Para el costo total de estructura se usa la Ecuación (20).

$$C_{estructura} = 25 \times 1.000.000 \quad (54)$$

$$C_{estructura} = 25.000.000 \text{ COP}$$

La Ecuación (21) permite calcular el costo correspondiente al Balance of System (BOS) Tabla (10) del sistema fotovoltaico proyectado para el edificio de Operación y Mantenimiento (O&M) del Parque Solar Tepuy. El BOS agrupa todos los componentes auxiliares requeridos para garantizar la correcta operación, protección y conexión del sistema fotovoltaico a la red eléctrica. Dentro de estos elementos se incluyen cableado DC y AC, protecciones eléctricas AC/DC, tableros eléctricos, conectores MC4, canalizaciones, sistema de puesta a tierra, sistemas de monitoreo y demás accesorios complementarios necesarios para la instalación del sistema solar (IRENA, 2023), Para el presente proyecto se consideró una potencia instalada de 25,07 kWp

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Tabla 10. Rangos comerciales aproximados del Balance of System (BOS) para sistemas fotovoltaicos en Colombia

Componente BOS	Rango comercial aproximado
Cableado DC/AC	200.000 – 350.000 COP/kWp
Protecciones AC/DC	250.000 – 450.000 COP/kWp
Tableros eléctricos	200.000 – 400.000 COP/kWp
Conectores MC4 y accesorios	50.000 – 120.000 COP/kWp
Canalizaciones	150.000 – 300.000 COP/kWp
Sistema de puesta a tierra	120.000 – 250.000 COP/kWp
Sistema de monitoreo	80.000 – 180.000 COP/kWp
Costo BOS total promedio	1.200.000 – 1.800.000 COP/kWp

Nota. Elaboración propia con valores corresponden a costos comerciales promedio en proyectos fotovoltaicos comerciales conectados a red en Colombia durante 2025–2026. Los costos pueden variar según capacidad instalada, calidad de componentes, proveedor, condiciones de montaje y especificaciones técnicas del sistema.

Asimismo, se adoptó un costo comercial promedio del BOS equivalente a $C_{BOS/kWp} = 1.500.000 \text{ COP/kW}$ según Tabla (10).

Este valor representa costos comerciales promedio en sistemas fotovoltaicos comerciales conectados a red en Colombia durante 2025–2026.

Tomando los valores de la Tabla (10) en la Ecuación (21)

$$C_{BOS} = 25 \times 1.500.000 \quad (55)$$

$$C_{BOS} = 37.500.000 \text{ COP}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Para determinar los valores de costo instalación se toma de referencia la Tabla (11).

Tabla 11. Rangos comerciales aproximados de costos de instalación fotovoltaica en Colombia

Concepto de instalación	Rango comercial aproximado
Mano de obra electromecánica	300.000 – 500.000 COP/kWp
Montaje de estructuras metálicas	150.000 – 300.000 COP/kWp
Conexiónado eléctrico AC/DC	200.000 – 350.000 COP/kWp
Configuración y puesta en marcha	100.000 – 200.000 COP/kWp
Transporte y logística básica	80.000 – 180.000 COP/kWp
Costo total instalación promedio	800.000 – 1.300.000 COP/kWp

Nota. Elaboración propia con valores corresponden a rangos comerciales promedio en sistemas fotovoltaicos comerciales conectados a red en Colombia durante 2025–2026. Los costos incluyen mano de obra especializada, montaje electromecánico, conexiónado eléctrico, configuración, pruebas y puesta en marcha del sistema fotovoltaico.

La Ecuación (22) permite calcular los costos asociados a la instalación y montaje electromecánico Tabla (11) del sistema fotovoltaico proyectado para el edificio de Operación y Mantenimiento (O&M) del Parque Solar Tepuy. Este costo contempla actividades relacionadas con mano de obra especializada, montaje de estructuras metálicas, instalación de módulos solares, conexiónado eléctrico AC/DC, configuración del inversor, pruebas operativas y puesta en marcha del sistema fotovoltaico (Duffie & Beckman, 2013).

Para el presente proyecto se determinó una potencia instalada de: $P_{FV} = 25 \text{ kWp}$ asimismo, se adoptó un costo comercial promedio de instalación fotovoltaica Tabla (11) equivalente a $C_{inst/kWp} = 1.000.000 \text{ COP/kWp}$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Reemplazando los valores en la ecuación (22)

$$C_{instalación} = 25 \times 1.000.000 \quad (56)$$

$$C_{instalación} = 25.000.000 \text{ COP}$$

La Ecuación (23) permite calcular el subtotal económico del sistema fotovoltaico proyectado para el edificio de Operación y Mantenimiento (O&M) del Parque Solar Tepuy. Este subtotal corresponde a la suma de todos los costos directos asociados Ecuaciones (18,19,20,21,22) a los principales componentes y actividades necesarias para la implementación del sistema solar, incluyendo módulos fotovoltaicos, inversores, estructuras metálicas, Balance of System (BOS) e instalación electromecánica Tabla (10).

Reemplazando los valores en la ecuación (23):

$$C_{subtotal} = 41.400.000 + 22.000.000 + 25.000.000 + 37.500.000 + 25.000.000 \quad (57)$$

$$C_{subtotal} = 150.900.000 \text{ COP}$$

Para obtener el f_{ing} , valor utilizado para los costos de ingeniería y legalización del sistema fotovoltaico se obtiene a partir de porcentajes comerciales promedio empleados en proyectos solares fotovoltaicos conectados a red de mediana escala. En estudios técnico-económicos y proyectos de ingeniería fotovoltaica, los costos asociados a diseño eléctrico, elaboración de memorias técnicas, planos, supervisión técnica, estudios de conexión, gestión documental, legalización y trámites regulatorios suelen representar entre el 3% y el 8% del subtotal económico del proyecto, dependiendo del nivel de complejidad, capacidad instalada y requerimientos normativos (IRENA, 2023).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El valor considerado representativo y técnicamente coherente para sistemas fotovoltaicos comerciales instalados sobre cubierta en Colombia. Este porcentaje contempla actividades relacionadas con diseño eléctrico, revisión normativa RETIE y NTC 2050, supervisión técnica, memorias de cálculo, documentación técnica y procesos de legalización del sistema fotovoltaico ante las entidades correspondientes.

Tabla 12. Rangos comerciales aproximados de costos de ingeniería fotovoltaica en Colombia

Concepto de ingeniería	Rango comercial aproximado
Diseño eléctrico y memorias técnicas	1% – 2% del subtotal
Supervisión técnica	1% – 3% del subtotal
Estudios y documentación técnica	0,5% – 1,5% del subtotal
Legalización y trámites regulatorios	0,5% – 1% del subtotal
Costo total ingeniería promedio	3% – 8% del subtotal

Nota. Elaboración propia con valores corresponden a rangos comerciales promedio en proyectos fotovoltaicos comerciales conectados a red en Colombia durante 2025–2026.

En este caso se asume un valor de $f_{ing} = 5\%$ Tabla (12) sobre el valor $C_{subtotal}$ Ecuación (23)

La Ecuación (24) permite calcular el costo de ingeniería, diseño y legalización del proyecto:

$$C_{ingeniería} = 150.900.000 \times 5\% \quad (58)$$

$$C_{ingeniería} = 7.545.000 \text{ COP}$$

La Ecuación (25) permite calcular el costo total de inversión inicial del sistema fotovoltaico, conocido como CAPEX (*Capital Expenditure*). Este indicador representa la inversión económica requerida para la implementación completa del sistema solar fotovoltaico proyectado para el edificio de Operación y Mantenimiento (O&M) del Parque Solar Tepuy.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

El CAPEX integra todos los costos directos asociados al suministro de equipos, estructuras metálicas, Balance of System (BOS), instalación electromecánica, ingeniería, diseño y legalización del sistema fotovoltaico (Masters, 2013).

Reemplazando los valores en la Ecuación (25):

$$C_{CAPEX} = 150.900.000 + 7.545.000 \quad (59)$$

$$C_{CAPEX} = 158.445.000 \text{ COP}$$

Tabla 13. CAPEX total del sistema fotovoltaico proyectado

Concepto	Valor (COP)
Costo módulos fotovoltaicos	41.400.000
Costo inversor solar	22.000.000
Costo estructuras metálicas	25.000.000
Costo BOS eléctrico	37.500.000
Costo instalación y montaje	25.000.000
Ingeniería y legalización	7.545.000
CAPEX total	158.445.000

Nota. Elaboración propia con datos del CAPEX total incluye costos de suministro de equipos, estructuras metálicas, BOS, instalación electromecánica, ingeniería y legalización del sistema fotovoltaico.

Para calcular el $C_{O\&M}$ Se usa la Ecuación (26), este determina la operación y el mantenimiento anual.

$$C_{O\&M} = 158.445.000 \times 1,5\% \quad (60)$$

$$C_{O\&M} = 2.376.675 \text{ COP}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Tabla 14. Resumen de valores técnicos y económicos obtenidos para el sistema fotovoltaico proyectado del Parque Solar Tepuy

Parámetro	Valor
Número de módulos fotovoltaicos	46
Precio unitario módulo	900.000 COP
Costo total módulos	41.400.000 COP
Número de inversores	1
Precio del inversor	22.000.000 COP
Costo estructura por kWp	1.000.000 COP/kWp
Costo total estructuras	25.000.000 COP
Costo BOS por kWp	1.500.000 COP/kWp
Costo total BOS	37.500.000 COP
Costo instalación por kWp	1.000.000 COP/kWp
Costo total instalación	25.000.000 COP
Costo ingeniería y legalización	7.545.000 COP
CAPEX total	158.445.000COP
Costo anual O&M	2.376.675 COP/año

Nota. Elaboración propia con valores económicos fueron estimados con base en referencias comerciales promedio utilizadas en sistemas fotovoltaicos comerciales conectados a red en Colombia durante 2025–2026.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

3.3. RENTABILIDAD DEL SISTEMA PROYECTADO EN GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

El análisis de costos del sistema fotovoltaico permite cuantificar la inversión inicial requerida y estimar los beneficios económicos asociados a la generación de energía. A partir de esta información, se determinan indicadores financieros claves como el periodo de recuperación de la inversión (PRI), el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), los cuales permiten evaluar la rentabilidad del sistema a lo largo de su vida útil.

Estos indicadores se calculan considerando los costos del ciclo de vida del sistema, incluyendo la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento y los costos de reposición, así como los ahorros económicos generados por la reducción en el consumo de energía eléctrica de la red.

En este contexto, la evaluación de la rentabilidad permite establecer la viabilidad económica del sistema fotovoltaico y su conveniencia dentro del esquema operativo del proyecto. Para empezar a calcular la rentabilidad del sistema se empieza usando la Ecuación (27) la cual permite determinar la energía anual que genera el sistema.

$$E_{anual} = 25 \times 5,0 \times 0,80 \times 365 \quad (61)$$

$$E_{anual} = 36.500 \text{ kWh/año}$$

De esta manera se puede determinar el ahorro anual que genera el sistema dependiendo del valor del kWh promedio que se obtuvo con el valor facturado y kWh mes, se usa la Ecuación (28)

$$A_{anual} = 36.500 \times 932 \quad (62)$$

$$A_{anual} = 34.018.000 \text{ COP/año}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

De igual forma, el flujo de efectivo anual se obtiene a partir del ahorro económico generado por la energía producida, descontando el costo anual de operación y mantenimiento ecuación (29).

$$FC_{neto} = 34.018.000 - 2.376.675 \quad (63)$$

$$FC_{neto} = 31.641.325 \text{ COP/año}$$

En la Tabla 15 se describe el análisis financiero realizado para el sistema fotovoltaico proyectado, a partir de los datos económicos del proyecto. Se considera una inversión inicial de 158.445.000 COP, un flujo de efectivo neto anual de 31.641325 COP/año y una tasa de interés del 5,90 % y un periodo de evaluación de 25 años.

Para calcular el valor presente (VP) ecuación (30) y el valor acumulado (VA) Ecuación (31), se integrarán los valores en la Tabla 15, estas Ecuaciones se deben de aplicar por año.

Tabla 15 Cuadro resumen del retorno de inversión. Fuente: Elaboración propia.

Año	Flujos de efectivo	Valor presente	Valor acumulado
0	-\$ 158.445.000,00	-\$ 158.445.000,00	-\$ 158.445.000,00
5	\$ 31.641.325,00	\$ 19.646.773,38	-\$ 38.499.483,83
10	\$ 31.641.325,00	\$ 12.198.417,52	\$ 35.974.074,94
15	\$ 31.641.325,00	\$ 7.574.122,64	\$ 82.891.851,44
20	\$ 31.641.325,00	\$ 4.703.042,44	\$ 112.044.931,47
25	\$ 31.641.325,00	\$ 2.915.826,63	\$ 128.907.887,48

Nota. La evaluación financiera se realizó considerando una tasa de descuento del 5,90 %, una vida útil del sistema fotovoltaico de 25 años y un flujo de caja neto anual constante de 31.641.325 COP. Fuente: elaboración propia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Con los valores presentados en la Tabla 15 se observa el comportamiento de los beneficios económicos generados por el sistema fotovoltaico a lo largo del horizonte de evaluación. El Valor Presente (VP) permite determinar el equivalente actual de los ahorros futuros esperados, incorporando el efecto del valor del dinero en el tiempo mediante la tasa de descuento seleccionada.

Por su parte, el Valor Acumulado (VA) muestra la evolución progresiva de dichos beneficios a medida que transcurren los años de operación del sistema, permitiendo identificar el momento en que los ahorros acumulados compensan la inversión inicial y comienzan a generar beneficios económicos netos para el proyecto.

La TIR es el punto en el que los ingresos futuros del proyecto compensan exactamente la inversión inicial con estos valores, la TIR calculada para un periodo de evaluación de 25 años Ecuación (32):

$$TIR = 19\%$$

La TIR obtenida fue del 19 %, superando la tasa de descuento utilizada en la evaluación. Este resultado evidencia que el sistema fotovoltaico presenta una rentabilidad favorable y que los beneficios económicos generados durante su operación justifican la inversión realizada.

El VPN de la inversión se calcula con la Ecuación (33):

$$VPN = 128.907.000 \text{ COP}$$

Lo que representa un valor presente positivo. Este resultado indica que la inversión genera un retorno superior al capital inicialmente invertido, lo que permite considerar el proyecto como una propuesta financieramente atractiva.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Finalmente, el PRI se calcula con Ecuación (34).

$$PRI = \frac{158.445.000}{31.645.325} \quad (64)$$

$$PRI = 5 \text{ años}$$

El tiempo estimado para recuperar la inversión es de 5 años. Esto indica que, una vez transcurrido este periodo, los ahorros generados por la energía producida por el sistema comenzarían a representar un beneficio económico directo para la operación del edificio. Teniendo en cuenta la vida útil esperada de los equipos, el resultado se considera favorable para el proyecto

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de los indicadores financieros permiten evidenciar el comportamiento económico del sistema fotovoltaico propuesto para el edificio O&M del Parque Solar Tepuy.

El análisis realizado muestra que la inversión inicial puede ser recuperada mediante los ahorros generados por la producción de energía solar, reflejando un Valor Presente Neto (VPN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la tasa de descuento considerada.

De igual manera, el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) obtenido resulta favorable frente a la vida útil esperada del sistema, lo que permite disponer de un amplio periodo de generación de beneficios económicos posteriores a la recuperación del capital invertido.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura para proyectos fotovoltaicos de autoconsumo, donde la reducción de los costos de operación y la estabilidad en la generación energética contribuyen significativamente a la rentabilidad de la inversión (Blank & Tarquin, 2018; IRENA, 2023).

En conjunto, los indicadores evaluados muestran que la alternativa fotovoltaica propuesta constituye una solución técnicamente viable y económicamente atractiva para contribuir a la sostenibilidad energética y financiera de la instalación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Tabla 16 Cuadro resumen de la evaluación económica.

Parámetro	Resultado
Potencia instalada del sistema	25 kWp
Horas solares pico (HSP)	5,0 h/día
Performance Ratio (PR)	0,80
Energía anual generada por el SFV	36.500 kWh/año
Tarifa de energía	932 COP/kWh
Ahorro económico anual	34.018.000 COP/año
Costo anual O&M	2.376.675 COP/año
Flujo de caja neto anual	31.641.325 COP/año
CAPEX total	158.445.000 COP
Vida útil del proyecto	25 años
Tasa de descuento	5,90 %
Tasa Interna de Retorno (TIR)	19%
Valor Presente Neto (VPN)	128.907.000 COP
Periodo de Recuperación (PRI)	5 años

Nota. Fuente: Elaboración propia. El Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) fueron calculados considerando una vida útil del sistema de 25 años, una inversión inicial de 158.445.000 COP y un flujo de caja neto anual de 31.541325 COP. Fuente: elaboración propia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El desarrollo de este trabajo permite realizar la evaluación técnica y económica de un sistema fotovoltaico para el edificio O&M del Parque Solar Tepuy, evidenciando que la implementación de generación solar contribuye al aprovechamiento de los recursos energéticos renovables y a la disminución del consumo de energía eléctrica proveniente de la red. Los resultados obtenidos muestran que el sistema fotovoltaico dimensionado presenta condiciones adecuadas de operación para suplir parte de la demanda energética del edificio, considerando las condiciones climáticas y de irradiación solar características de la zona de La Dorada, Caldas.

Durante el desarrollo del estudio fue posible caracterizar la demanda energética del edificio O&M, identificando que los sistemas de climatización representan la mayor participación dentro del consumo total de energía eléctrica. Este análisis permitió establecer el perfil de carga del sistema y definir los criterios necesarios para el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico, teniendo en cuenta las condiciones reales de operación del edificio.

A partir de los cálculos realizados, se determinó una potencia instalada aproximada de $25,07 \text{ kWp}$, conformada por 46 módulos fotovoltaicos de 545 W y un inversor de 25 kW. Asimismo, el análisis técnico desarrollado evidencia que las condiciones de irradiación solar de la región permiten un adecuado aprovechamiento de la energía solar para aplicaciones de generación fotovoltaica conectada a red.

En cuanto al análisis económico, se estimó un CAPEX total aproximado de $158.445.000 \text{ COP}$, incluyendo costos asociados a módulos, inversor, estructuras, BOS, instalación e ingeniería. Desde el punto de vista financiero, el análisis realizado permite evidenciar que el sistema fotovoltaico proyectado presenta condiciones favorables de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

viabilidad económica, considerando indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Retorno de la Inversión (PRI) y el periodo de recuperación de la inversión. Los resultados obtenidos muestran que el ahorro energético generado durante la operación del sistema permite recuperar la inversión inicial y generar beneficios económicos a lo largo de la vida útil del proyecto.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten establecer una base técnica y económica para la posible implementación de un sistema fotovoltaico en el edificio O&M del Parque Solar Tepuy. La metodología desarrollada puede ser utilizada como referencia para futuras ampliaciones del sistema o para la evaluación de otras edificaciones con características de consumo similares. Asimismo, los resultados obtenidos constituyen un punto de partida para estudios posteriores relacionados con el seguimiento de la generación energética real del sistema, el análisis de su desempeño operativo y la comparación entre la producción estimada y la producción efectiva durante su vida útil. De esta manera, se fortalece la toma de decisiones orientadas al aprovechamiento de fuentes de energía renovable y a la reducción de los costos asociados al consumo de energía eléctrica.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

REFERENCIAS

Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of corporate finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

Celsia. (2022). *Energía solar para empresas en Colombia*. <https://www.celsia.com/>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). *Política de transición energética: Estrategia para la modernización y transformación sostenible del sector energético (CONPES 4075)*. Consejo Nacional de Política Económica y Social. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/4075.pdf>

Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind* (5th ed.). Wiley.

IDEAM. (2022). *Datos climatológicos de Colombia*. <https://www.datos.gov.co/browse?category=Ambiente+y+Desarrollo+Sostenible&publisher=IDEAM>

IEEE. (2021). *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003): IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces*. IEEE. <https://standards.ieee.org/>

IEC. (2021). *IEC 62109-1: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems*. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

International Energy Agency (IEA). (2023). *Renewables 2023*.

<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS). (2023).

Trends in photovoltaic applications 2023. <https://iea-pvps.org/>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable power generation*

costs in 2023. <https://www.irena.org/>

JA Solar Technology Co., Ltd. (2023). *JAM72D30-545/MB photovoltaic module datasheet*.

<https://www.jasolar.com>

Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.).

Academic Press.

Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems* (2nd ed.). Wiley.

Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic systems engineering* (3rd ed.). CRC

Press.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). *NASA POWER Data Access*

Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/>

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2020). *Estrategias de sostenibilidad*

del Aeropuerto El Dorado. <https://www.aerocivil.gov.co>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2021). *Integración de energías*

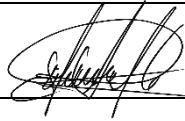
renovables en Colombia. <https://www.upme.gov.co/>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2023). *Atlas de radiación solar de Colombia*. <https://www.upme.gov.co/>

U.S. Department of Energy. (2020). *Commercial solar adoption and case studies*. <https://www.energy.gov/>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	05
		Fecha	11-06-2025

FIRMA ESTUDIANTES	
FIRMA ASESORES	
FECHA ENTREGA: _____	