



**UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE LA INDUSTRIA MINERO ENERGÉTICA**

**PROPUESTA TÉCNICA
PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
EN LA PLANTA DE ECOPETROL EN EL MUNICIPIO DE VILLETA,
CUNDINAMARCA-COLOMBIA**

**AUTOR
JUAN CARLOS PABÓN PICÓN**

BOGOTÁ, COLOMBIA

JULIO DE 2020
UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE PROYECTOS INDUSTRIA MINERO
ENERGÉTICA

PROPUESTA TÉCNICA
PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
EN LA PLANTA DE ECOPETROL EN EL MUNICIPIO DE VILLETA,
CUNDINAMARCA-COLOMBIA

JUAN CARLOS PABÓN PICÓN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE PROYECTOS INDUSTRIA MINERO-
ENERGÉTICA

Director (a):
CARLOS JOSÉ CASTRILLÓN VALENCIA

Modalidad:
TRABAJO DIRIGIDO

BOGOTÁ, COLOMBIA
JULIO DE 2020

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Notas de Aceptación:

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Firma director del trabajo de grado

Bogotá D.C. (Colombia) Día _____ Mes _____ Año _____

DEDICATORIA

*A mi familia, por todo
su apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	16
ABSTRACT.....	17
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. Antecedentes del problema	19
1.1.1. Contexto ambiental del problema	19
1.1.2. Contexto Internacional.....	20
1.1.3. Contexto nacional	27
1.1.4. Contexto legal	28
1.2. Planteamiento del problema de investigación.....	33
1.2.1. Pregunta general.....	35
1.2.2. Preguntas específicas	36
2 OBJETIVOS	37
2.1. Objetivo general.....	37
2.2. Objetivos específicos.....	37
3 JUSTIFICACIÓN	38
4 MARCO DE REFERENCIA	41
4.1. Consideraciones básicas	41
4.1.1. ¿Qué es la energía solar?.....	41
4.1.2. Radiación solar en la Tierra	41
4.1.3. Cantidad de radiación solar.....	41
4.1.4. Sistema fotovoltaico	42
4.2. Tipologías de infraestructuras de sistemas solares fotovoltaicos.....	42
4.2.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos	42
4.3. Componentes de un de sistema solar fotovoltaico y sus especificaciones técnicas	46
4.3.1. Panel solar fotovoltaico o generador fotovoltaico	46
4.3.2. Inversor fotovoltaico de conexión a red.....	50
4.3.3. Centro de transformación.....	54

4.3.4.	Estructura de soporte.....	57
4.4.	Determinar las necesidades de consumo	58
4.5.	Diseño del sistema solar fotovoltaico de la planta de Ecopetrol en Villeta	58
4.5.1.	Distribución de paneles, orientación e inclinación	58
4.5.2.	Determinar la radiación solar en horas solar pico (HSP).....	58
4.5.3.	Condiciones estándar de medida de los paneles solares	59
4.5.4.	Dimensionamiento del inversor	59
4.5.5.	Matriz Fotovoltaica.....	59
4.5.6.	Perdidas y eficiencias del sistema	59
4.6.	Evaluación financiera y ambiental del proyecto	60
4.7.	Evaluación ambiental.....	61
5	MARCO INSTITUCIONAL	62
5.1.	La organización.....	62
5.2.	La estrategia corporativa	62
5.3.	Transición energética	63
6	DISEÑO METODOLÓGICO.....	66
6.1.	Método de investigación	66
6.2.	Diseño de la investigación.....	67
6.3.	Recopilación de información	68
7	DESARROLLO DEL PROYECTO	70
7.1.	Diagnóstico.....	70
7.1.1.	Trabajo de Campo	70
7.1.2.	Recolección de datos para determinar las necesidades de energía a satisfacer.....	71
7.2.	Tipología planteada para el proyecto	73
7.2.1.	Componentes tecnológicos.....	74
7.2.1.1.	Módulos fotovoltaicos de la marca Solar World SW 165.....	74
7.2.1.2.	Inversor.....	75
7.2.1.3.	Cajas de conexionado	76

7.3.	Diseño de la propuesta del sistema solar fotovoltaico	77
7.3.1.	Matriz fotovoltaica	79
7.3.1.1.	Determinar la carga anual	79
7.3.1.2.	Distribución de paneles, orientación e inclinación.....	80
7.3.1.3.	Diseño de perfiles de acero en cubierta verde	82
7.3.1.4.	Determinar la radiación solar en horas solar pico (HSP)	87
7.3.1.5.	Condiciones estándar de medida de los paneles solares	87
7.3.1.6.	Dimensionamiento del inversor	88
7.3.1.7.	Numero de paneles que soportara cada inversor	88
7.3.1.8.	Número de paneles máximo para conectar en serie en cada inversor	88
7.3.1.9.	Número de paneles mínimo para conectar en serie en cada inversor.....	89
7.3.1.10.	Número de paneles máximo para conectar en paralelo en cada inversor	91
7.3.1.11.	Paneles por conectar en la matriz fotovoltaica	92
7.3.1.12.	Corriente de corto circuito del inversor	94
7.3.1.13.	Pérdidas y eficiencias del sistema.....	94
7.3.1.14.	Protecciones de maniobra y seccionamiento	96
7.3.1.15.	Dimensionado del cable.....	96
7.3.2.	Simulación del sistema solar fotovoltaico	97
7.4.	Evaluación financiera y ambiental.....	100
7.4.1.	Evaluación financiera.....	100
7.4.1.1.	Costos estimados inversión del proyecto	100
7.4.1.2.	Beneficios económicos del proyecto	101
7.4.2.	Evaluación ambiental.....	103
7.4.3.	Limitaciones del proyecto	104
7.4.4.	Cronograma.....	105
7.4.5.	Análisis de resultados.....	105
7.4.5.1.	Análisis resultados Comparativos de Energía	105
7.4.5.2.	Análisis resultados financieros	107
7.4.5.3.	Análisis resultados Ambientales	108
7.4.6.	Plan de intervención.....	108

7.4.6.1.	Plan de acción.....	109
8	CONCLUSIONES	110
9	RECOMENDACIONES	112
10	BIBLIOGRAFÍA	113
11	ANEXOS	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación estimada de energía renovable en consumo total de energía en 2017....	21
Figura 2. Energía renovable en el consumo total de energía final, por sector, 2016.	22
Figura 3. Participación de las fuentes de energía utilizadas para la generación de energía eléctrica.	23
Figura 4. Capacidad global de energía solar fotovoltaica y adiciones anuales, 2008-2018.	24
Figura 5. Capacidad global instalada de aplicaciones fotovoltaicas 2012-2018.	25
Figura 6. Escenarios totales mundiales del mercado fotovoltaico 2019-2023.	26
Figura 7. Matriz energética Colombia 2019.	28
Figura 8. Compromiso COP21 de Colombia en la mitigación de GEI.	32
Figura 9. Conversión de la luz solar en electricidad.	42
Figura 10. Representación esquemática de un sistema PV autónomo con cargas DC y CA.	44
Figura 11. Representación esquemática de un sistema PV conectado a la red.	45
Figura 12. Representación esquemática de un sistema PV híbrido.	46
Figura 13. Irradiancia en paneles solares fotovoltaicos.	47
Figura 14. Influencia de la temperatura en la potencia.	48
Figura 15. Ejemplo de especificación técnica para un panel solar.	49
Figura 16. Limitaciones del sistema solar fotovoltaico.	53
Figura 17. Estructura soporte paneles solares.	57
Figura 18. Imagen corporativa Ecopetrol.	62
Figura 19. Marco estratégico Ecopetrol 2020.	63
Figura 20. Parque solar Castilla.	64
Figura 21. Estructura metodológica de la investigación.	66
Figura 22. Diseño de la investigación.	68
Figura 23. Ejemplo sistema solar fotovoltaico on-grid.	74
Figura 24. Paneles solares existentes en la planta de Ecopetrol de Villeta.	75
Figura 25. Ejemplo de inversor de corriente.	76
Figura 26. Infografía Sistema Solar Fotovoltaico Planta Villeta.	77
Figura 27. Diseño sistema solar fotovoltaico conectado a la red.	78
Figura 28. Área de parqueadero de Ecopetrol, Villeta y distribución de los paneles.	80

Figura 29. Vista frontal, y axonométrica de la estructura del sistema solar fotovoltaico.	81
Figura 30. Ejemplo conexión de paneles solares en serie.	88
Figura 31. Ejemplo Conexión Paneles Solares en Paralelo.	91
Figura 32. Matriz Sistema Solar Fotovoltaico.	92
Figura 33. Histograma panel con inclinación de 0° y 30°.	97
Figura 34. Estudio salida de energía del sistema mes a mes.	98
Figura 35. Valores en concreto del sistema a 30°.	98
Figura 36. Datos de inversión aproximada.	99
Figura 37. Consumo total locaciones vs Producción de Energía Esperada.	106
Figura 38. Panorámica Planta Ecopetrol-Villeta.	107
Figura 39. Línea de Tiempo del Proyecto.	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consumo total de energía primaria per cápita, anual	20
Tabla 2. Incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014	30
Tabla 3. Decretos y resoluciones que reglamentan la Ley 1715 de 2014	30
Tabla 4. Ejemplo de especificaciones técnicas de un inversor	53
Tabla 5. Cables aislados con aislamiento seco	56
Tabla 6. Condiciones estándar de medida de los paneles solares	59
Tabla 7. Relación de carga por suplir en las instalaciones de la planta Ecopetrol.....	72
Tabla 8. Especificaciones técnicas paneles solares	75
Tabla 9. Proyección de energía por generar.....	77
Tabla 10. Parámetros de diseño	79
Tabla 11. Coordenadas geográficas Villeta	82
Tabla 12. Datos PVGIS irradiancia y temperatura Villeta	87
Tabla 13. Resumen sistema solar Fotovoltaico por inversor.	92
Tabla 14. Proyección de energía a generar real	95
Tabla 15. Dimensiones Cableado.....	96
Tabla 16. Detalle Costos Inversión del Proyecto	100
Tabla 17. Flujo de caja estimado del proyecto.....	101
Tabla 18. Datos financieros del proyecto.....	102
Tabla 19. Retorno de la inversión	102
Tabla 20. Cronograma actividades del proyecto.....	105
Tabla 21. Síntesis de energía a generar ideal y real.....	105
Tabla 22. Resumen consumo total Planta Ecopetrol-Villeta	106

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica panel Solar World	115
Anexo 2. Ficha técnica inversor Fronius Symo	117
Anexo 3. Definiciones	122

LISTA DE ABREVIATURAS

APAC - Asia Pacífico

CA - Corriente alterna

CTEF - Consumo total de energía final

DC - Corriente directa

EIA - Estudio de Impacto Ambiental

ENFICC - Energía firme para el Cargo por Confiabilidad

EVA - Acetato de Vinilo – Etileno

FF - Factor de forma

Fenoge - Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía

FNCER - Fuentes no convencionales de energías renovables

GEI- Gases de efecto invernadero

HSP - Hora solar pico

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IEA - International Energy Agency

Icc - Intensidad de cortocircuito

MEA - Medio Oriente y África

MPP - Punto de máxima potencia

NASA - Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

PMP - Punto de máxima potencia

Pp - Potencia pico

PR - Performance ratio

PVGIS - Geographical Information System

SIN - Sistema Interconectado Nacional

Vp - Tensión pico

UPME - Unidad de Planeación Minero-Energética

ZNI - Zonas no interconectadas

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente documento se presenta una propuesta técnica para el diseño de un sistema fotovoltaico que permita el aprovechamiento de las energías alternativas, esto mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico que pueda ser implementado para satisfacer una parte del consumo interno de energía de una planta de bombeo de Ecopetrol ubicada en el municipio de Villeta, Cundinamarca- Colombia teniendo en cuenta la demanda energética, el autoconsumo, las pérdidas, los factores ambientales, entre otros aspectos que afecten el sistema, de manera que se evidencien resultados favorables a la implementación de dicho sistema, y dando uso a activos no utilizados por la organización como lo son los paneles solares.

Como parte del trabajo realizado se presentará los diseños civiles, arquitectónicos, eléctricos y electrónicos, sin perder de vista los elementos que se puedan reutilizar para lograr una optimización en los costos del proyecto.

La organización interesada en el trabajo dirigido (Ecopetrol), se encuentra buscando alternativas que permitan la diversificación de su matriz energética, así como posibles líneas que amplíen su portafolio de servicios, por lo cual la investigación toma una forma aplicada puesto que se concentra en generar una fuente energética diferente a las tradicionales, que ayudará a cubrir las necesidades de consumo eléctrico de una forma sostenible. Las ventajas que justifican los sistemas de energía solar fotovoltaica son que su precio es cada vez más asequible, se genera energía 100 % limpia y es una inversión que se puede recuperar en muy poco tiempo, además, su vida útil es de 25 años, lo cual implica gastos de mantenimiento mínimos, y es ideal para uso residencial, de oficinas e incluso para grandes empresas e industrias.

Palabras clave: energía solar, energía eléctrica, panel solar, inversor, potencia

ABSTRACT

This document presents a technical proposal for the design of a photovoltaic solar system that allows the use of alternative energies, this through the implementation of a photovoltaic solar system that can satisfy a portion of the internal energy consumption of a plant pumping station of the enterprise Ecopetrol located in the municipality of Villeta, Cundinamarca-Colombia, taking into account energy demand, self-consumption, losses, environmental factors, among other aspects that affect the system, in such a way that favorable results are shown for the implementation of said system, and using assets not used by the organization such as solar panels.

As part of the work carried out, the civil, architectural, electrical, and electronic designs will be presented, without losing sight of the elements that can be reused to achieve an optimization in the project costs.

The organization interested in directed work (Ecopetrol), is looking for alternatives that allow the diversification of its energy matrix, as well as possible lines that expand its portfolio of services, for which the research takes a practical form since it concentrates on generating a source of energy different from the traditional ones, which will help meet the needs of electricity consumption in a sustainable way. The advantages that justify photovoltaic solar energy systems include their price, which is increasingly affordable, 100% clean energy is generated and it is an investment that can be recovered in a very short time, also, its useful life is 25 years, which implies minimal maintenance costs, and is ideal for residential use, offices and even for large companies and industries.

Keywords: solar energy, electric energy, solar panel, inverter, power

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es una fuente energética inagotable que puede aprovecharse para su transformación en energía eléctrica, por lo cual es usada en tecnologías como los sistemas fotovoltaicos. En términos básicos, un panel solar es un dispositivo que produce un flujo de electricidad bajo la radiación solar. Esta energía eléctrica puede usarse para cargar baterías, alimentar sistemas de iluminación led y, con la ayuda de un inversor, es capaz de alimentar dispositivos eléctricos domésticos, de oficina o de uso industrial.

En algunas plantas de la vicepresidencia de transporte de Ecopetrol se encontraron paneles solares que no han sido utilizados, pese a que la radiación solar en el municipio de Villeta, Cundinamarca-Colombia está en un rango de 4,35 KWh/m²/día ¹, según datos de IDEAM. Por este motivo, se crea la necesidad de construir una cubierta para la protección de las personas y los vehículos en un área aproximada de 100m² del parqueadero de la planta, debido a las diferentes complicaciones que la radiación solar puede provocar, y esta se puede aprovechar para instalar una planta solar fotovoltaica que genere energía eléctrica que pueda utilizarse en el área de las oficinas y el cuarto de control.

Por lo tanto, el fin del presente trabajo de investigación es la presentación de una propuesta técnica para el diseño de un sistema fotovoltaico que suministre energía sostenible y que sea eficiente para el autoconsumo, el beneficio del personal, del medio ambiente y de la empresa, en una planta de la vicepresidencia de transporte de Ecopetrol en Villeta, Cundinamarca.

Este es un tipo de investigación aplicada², aunque no tiene un diseño físico, puesto que plantea un prototipo que se podría implementar a futuro. En este se tienen en cuenta los elementos que se pueden reutilizar para disminuir el costo de implementación y que sean eficientes en autoconsumo y generación de potencia para las cargas. Este modelo se piensa para que sea interconectado e implementado en las zonas de oficina de una planta de Ecopetrol, las cuales necesitan el suministro de energía para el funcionamiento de los sistemas de cómputo, de

¹ La intensidad es la potencia transferida **por unidad de área**, en donde el **área** es el plano perpendicular en la dirección de propagación de la **energía**. En el sistema SI, tiene **unidades** de vatios **por metro cuadrado** (W/m²).

² La **investigación aplicada** busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la **investigación** básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto.

aire acondicionado o confort y de iluminación. Para esto, se deberá tener en cuenta la posición geográfica, las condiciones atmosféricas, las cargas, el ahorro energético, el ahorro económico y la eficiencia del sistema de la planta. Se plantea ubicar el modelo en la zona del parqueadero de forma que aproveche la radiación solar.⁰

El diseño se basa en un sistema fotovoltaico que genera energía eléctrica mediante una corriente directa (DC) e invierte el tipo de energía a corriente alterna (CA) para tener los dos tipos con conexión a la red eléctrica, así podrá emplearse el sistema como respaldo y contar con su uso en horas del día. Asimismo, se considera su elaboración con elementos reciclados como estrategia de reducción de costos y de impacto ambiental.

El presente documento se divide en tres partes principales, en el marco teórico se hace una revisión del estado actual de las energías en el mundo, se desarrolla el concepto de los sistemas fotovoltaicos, sus posibles aplicaciones, y se hace un acercamiento a la problemática abordada. Posteriormente, se presenta el diseño metodológico del modelo planteado, por lo cual se presenta un análisis de los datos de la zona, la empresa y del sistema en sí. Y, por último, se relacionan los hallazgos y se presentan las conclusiones de la propuesta. En vista de que la naturaleza del proyecto es interdisciplinar se tomaron conceptos de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Civil, Arquitectura, Administración, Finanzas y Derecho.

1.1. Antecedentes del problema

1.1.1. Contexto ambiental del problema

La sociedad moderna se basa, en gran medida, en la capacidad de la humanidad para convertir la energía de una forma a otra. Por ejemplo, en promedio, una persona en Estados Unidos utiliza una potencia media de 9.319 W, que es alrededor de 80 veces lo que el cuerpo humano necesita³. En contraste, una persona en Colombia utiliza alrededor de 890 W, que es menos de la décima parte del consumo de una persona que reside en Estados Unidos (Arno Smets, 2016). Como se puede observar en la Tabla 1, el consumo total de energía primaria y energía media per cápita de algunos países en 2011.

³ Un cuerpo promedio de un hombre adulto humano requiere alrededor de 10 000 kJ (kilojulios) todos los días. Este consumo corresponde a una potencia promedio del cuerpo humano de 115.7 W.

Tabla 1. Consumo total de energía primaria per cápita, anual.

País	Consumo energético (kWh / per cápita-anual)	Uso de energía promedio (W / per cápita-anual)
Estados Unidos	81 642	9319
Holanda	53 963	6160
China	23 608	2695
Colombia	7792	890
India	6987	797
Kenia	5582	637

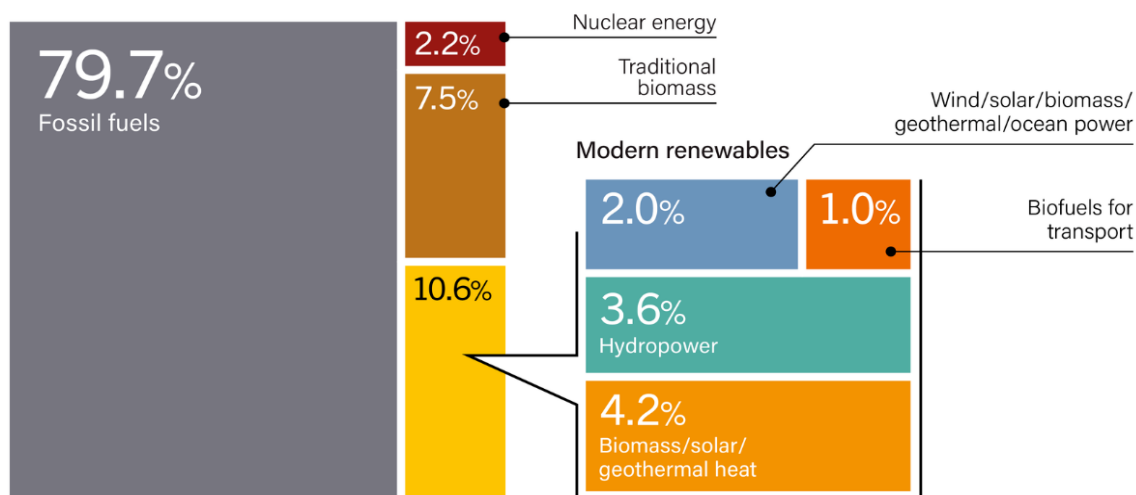
Fuente: *Solar Energy. The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies and Systems* (Smets, Jager, Isabella, Zeman, & Van Swaaij, 2016, p. 6)

1.1.2. Contexto Internacional

El problema de la energía es el reto más grande de la humanidad en el siglo XXI. El consumo mundial de energía en 2018 aumentó a casi el doble de la tasa promedio de crecimiento desde 2010, impulsada por una economía global robusta y por mayores necesidades de calefacción y aire acondicionado o confort en algunas partes del mundo. Adicionalmente, la demanda de todos los combustibles aumentó, sobre todo del gas natural, incluso cuando la energía solar y eólica registraron un crecimiento de dos dígitos. A su vez, la demanda de electricidad fue responsable de más de la mitad del crecimiento de las necesidades energéticas (International Energy Agency - IEA, 2018).

La creciente demanda de energía tiene un impacto económico, pues si hay más demanda de un producto y la oferta no cambia, el producto se volverá más caro. Este mecanismo básico de mercado es igualmente aplicable a los mercados de energía. Como se muestra en la Figura 1, el detalle de algunos datos del año 2017 relacionados con este recurso.

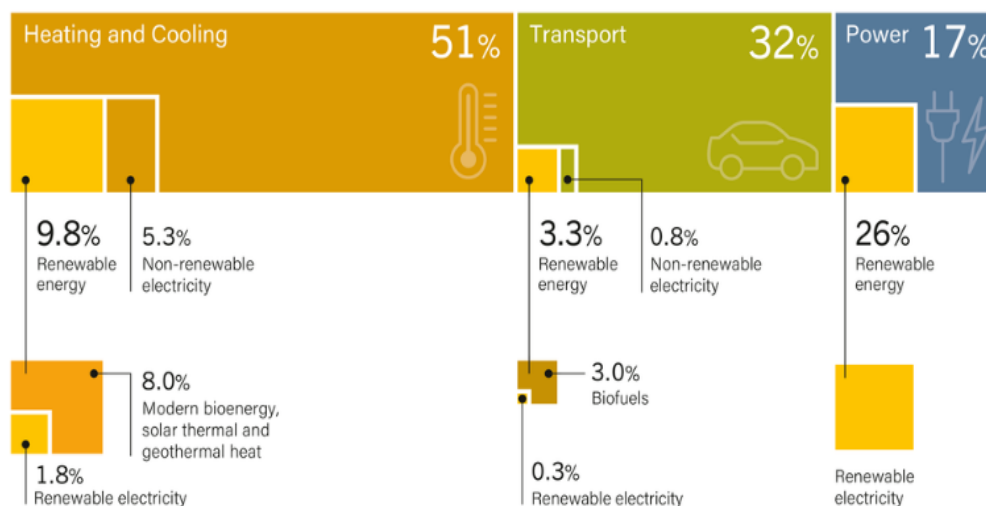
Figura 1. Participación estimada de energía renovable en consumo total de energía en 2017.



Fuente: *A Comprehensive Annual Overview of the State of Renewable Energy* (REN21, 2019)

En la Figura 1, se muestra que en el 2017 el 79.7 % de la energía utilizada provino de fuentes de combustibles fósiles, mientras que la energía renovable representó aproximadamente el 18.1 % del consumo total de energía final (CTEF). Las energías renovables modernas suministraron el 10.6 % del CTEF, es decir, un alza en la demanda del 4.4 % en comparación con 2016, y el uso tradicional de biomasa para cocinar y calentar en los países en desarrollo representó la parte restante. Además, la mayor parte de la participación renovable moderna fue la energía térmica renovable (cerca del 4.2 % del CTEF), seguida por la energía hidroeléctrica (3.6 %), otras fuentes de energía renovable, incluidas la energía eólica y la energía solar fotovoltaica (2 %), y los biocombustibles de transporte (alrededor del 1 %) (REN21, 2019).

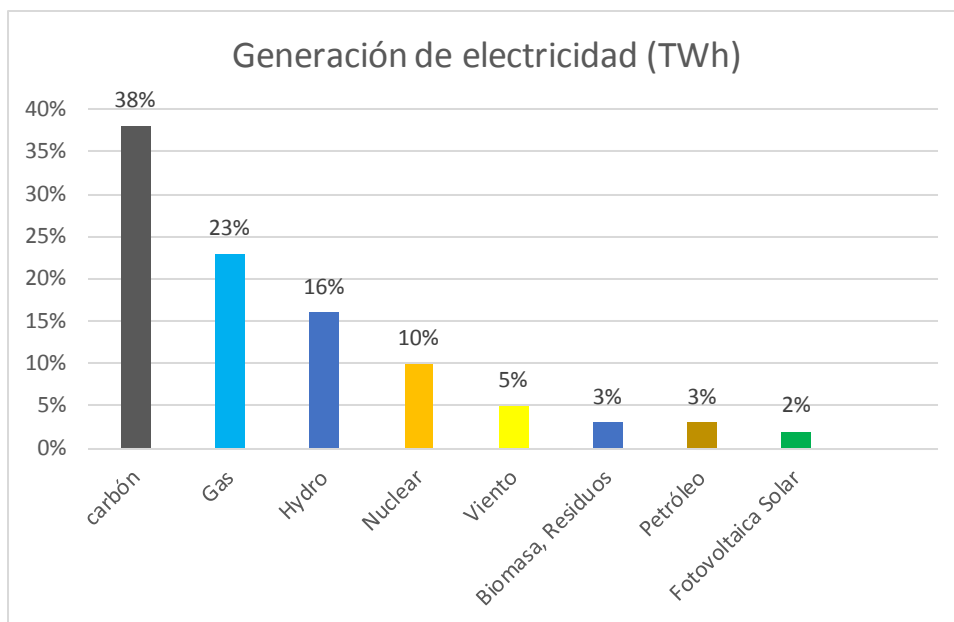
Figura 2. Energía renovable en el consumo total de energía final, por sector, 2016.



Fuente: *A Comprehensive Annual Overview of the State of Renewable Energy* (REN21, 2019).

Como se muestra en la Figura 2, a finales de 2016 la calefacción y el aire acondicionado o confort representaban alrededor del 51 % del uso final de energía, el transporte el 32 % y la demanda final de electricidad (excluyendo los fines anteriores) aproximadamente el 17 %. En concreto, el calor renovable moderno suministra el 10 % de la demanda de calefacción y aire acondicionado o confort, y no ha crecido significativamente. Si bien la demanda de electricidad renovable aumentó un 25 % entre 2013 y 2017, la demanda moderna de calor renovable creció un poco menos del 5 % durante este periodo (aproximadamente la misma tasa que la demanda mundial de energía). Sumado a ello, el consumo de biocombustibles en el transporte (principalmente etanol y biodiesel) aumentó en un 18 % entre 2013 y 2017, aunque a partir de una base pequeña (REN21, 2019).

Figura 3. Participación de las fuentes de energía utilizadas para la generación de energía eléctrica.

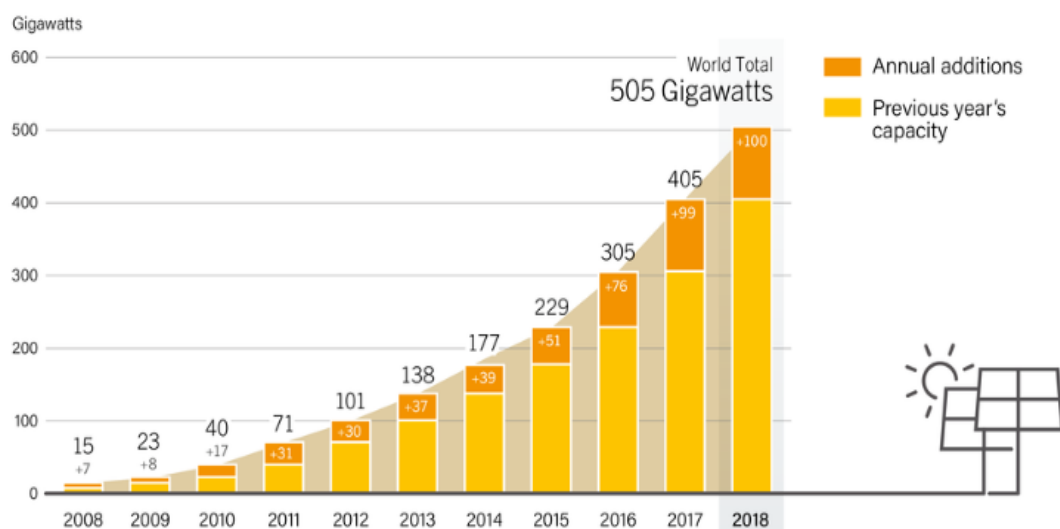


Fuente: *Global Energy & CO2 Status Report* (International Energy Agency - IEA, 2018)

En la Figura 3 se muestra que cerca del 64 % de la electricidad se genera gracias al uso de combustibles fósiles, y que el carbón es el contribuyente dominante. Como el carbón emite casi el doble de CO₂ por kWh en comparación con el gas natural, se deduce que las centrales eléctricas de carbón contribuyen en gran medida al calentamiento global. Entre tanto, la energía nuclear es responsable del 10 % de la generación eléctrica mundial, y con un 16 %, la hidroelectricidad es el mayor contribuyente entre las fuentes de energía renovables. Puede notarse que solo un 2 % de la generación eléctrica mundial se da a partir de tecnologías fotovoltaicas.

En cuanto al estado y las perspectivas de la tecnología fotovoltaica, la Figura 4 revela que la potencia fotovoltaica acumulada, instalada en todo el mundo, crece de forma exponencial en el tiempo.

Figura 4. Capacidad global de energía solar fotovoltaica y adiciones anuales, 2008-2018.

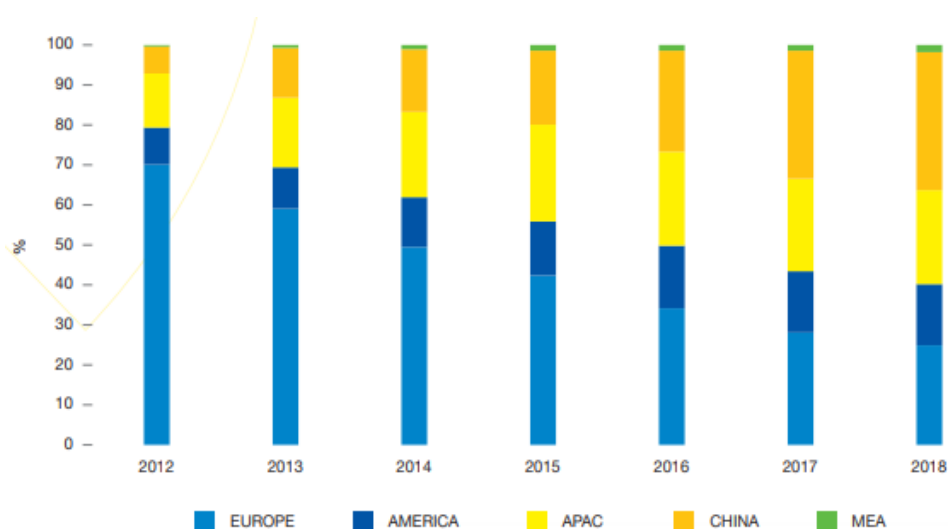


Fuente: *A Comprehensive Annual Overview of the State of Renewable Energy* (REN21, 2019)

Lo anterior evidencia que la energía solar fotovoltaica se ha convertido en la tecnología energética de más rápido crecimiento global, con mercados a escala de gigavatios en un número creciente de países. En efecto, la demanda de este tipo de energía se está extendiendo y expandiendo a medida que se convierte en la opción más competitiva para la generación de electricidad en un gran número de mercados, como las aplicaciones residenciales y comerciales, y cada vez más para proyectos de servicios públicos. Lo anterior sin tener en cuenta los costos externos de los combustibles fósiles (REN21, 2019).

El mercado solar en 2018 no solo superó el nivel de 100 GW por primera vez, además ocurrió un hecho sin precedentes, el mundo tenía más de 500 GW de capacidad de energía solar en funcionamiento. A finales de 2017 la capacidad total de energía solar global alcanzó más de 400 GW, después de superar los 300 GW en 2016 y la marca máxima de 200 GW en 2015. Al mirar hacia atrás solo una década, la capacidad fotovoltaica acumulada del mundo aumentó en más del 3300 %, al pasar de 15 GW en 2008 a 505 GW en 2018, como se puede observar en la Figura 4.

Figura 5. Capacidad global instalada de aplicaciones fotovoltaicas 2012-2018.



Fuente: *Global Market Outlook. For Solar Power / 2019-2023* (Solar Power Europe, 2019)

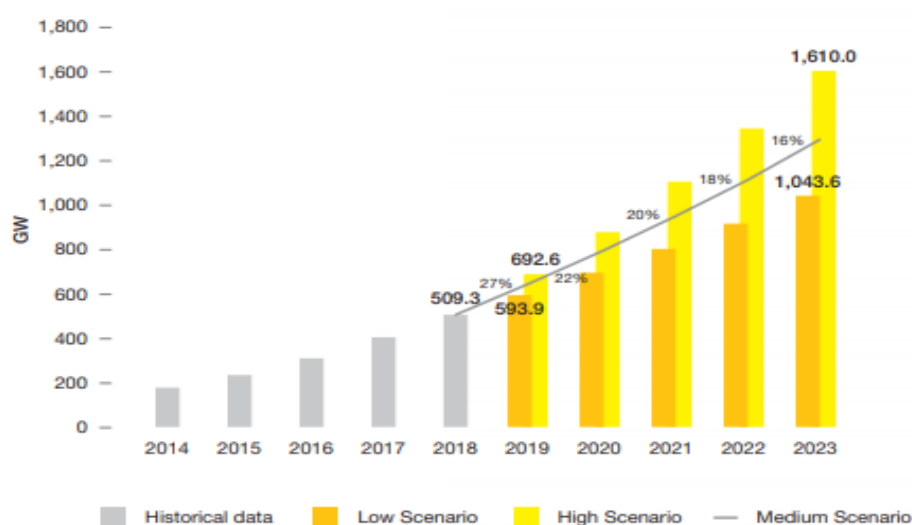
En la Figura 5, se muestra que en la región de Asia Pacífico (APAC) expandió aún más su liderazgo solar en 2018, y significó nuevamente más de la mitad de las capacidades de generación de energía global, representada en 295.7 GW de capacidad total instalada, lo que equivale a una participación del mercado mundial del 58 %. Europa, por su parte, mantuvo la segunda posición, basada en una capacidad fotovoltaica acumulada de 125.8 GW, equivalente a una cuota de mercado del 25 %.

Las Américas fue la tercera región solar más grande del mundo en 2018, con una capacidad instalada acumulada de 78.2 GW, correspondiente a una participación del 15 %. Y, en último lugar, se encontró que el aumento de la actividad en el Medio Oriente y África (MEA, por su nombre en inglés *Middle East and Africa*) cambió la ruta de desarrollo solar de la región el año pasado. Con una capacidad solar total de 9.6 GW, su participación en el mercado mundial creció ligeramente en 2018, pues subió hasta el 1.9 % (Solar Power Europe, 2019).

En el contexto de América Latina, México ha instalado un poco menos de 3 GW de aplicaciones fotovoltaicas, lo cual posiciona al país centroamericano en el lugar número uno en la región. Las razones de este fuerte crecimiento se pueden deber principalmente a las tres subastas de energía renovable del Gobierno mexicano, celebradas en 2016 y 2017, así como a un *boom* de energía solar distribuida, con más de 100 000 techos solares en viviendas, edificios industriales y comerciales hoy en día. Así mismo, Brasil superó el nivel de 1 GW en 2018.

Junto con México y Brasil, existen algunos mercados fotovoltaicos más establecidos, como Chile y Argentina, y mercados solares más incipientes, como Colombia y Perú. De igual manera, dado que administrar el costo inicial para las plantas de energía solar es a menudo un desafío para los desarrolladores locales en América Latina, varias compañías han emitido recientemente bonos verdes para respaldar dichos planes de desarrollo solar (Solar Power Europe, 2019). En la siguiente figura se registran las cifras del mercado fotovoltaico en los años que siguen al periodo antes descrito.

Figura 6. Escenarios totales mundiales del mercado fotovoltaico 2019-2023.



Fuente: *Global Market Outlook. For Solar Power/2019-2023* (Solar Power Europe, 2019).

Como se muestra en la Figura 6, las perspectivas de crecimiento global del mercado fotovoltaico para el periodo 2019-2023, estimadas por SolarPowerEurope, pronostican que para un escenario medio es más probable que las capacidades de las plantas de generación de energía solar global alcancen los 645 GW en 2019, los 1117 GW en 2022, y los 1297 GW en 2023. En condiciones óptimas, el mundo podría alcanzar los 1610 GW para finales de 2023. Igualmente, se espera que la capacidad de generación fotovoltaica global instalada supere los siguientes hitos en los próximos cinco años: 600 GW en 2019, 900 GW en 2021 y 1,1 TW en 2022 (Solar Power Europe, 2019).

En resumen, si bien la potencia fotovoltaica acumulada instalada en el mundo crece de forma exponencial, es cierto que lo hace sobre una línea base pequeña. La participación de la energía fotovoltaica en la matriz energética mundial es inferior al 2 %, de hecho, su participación

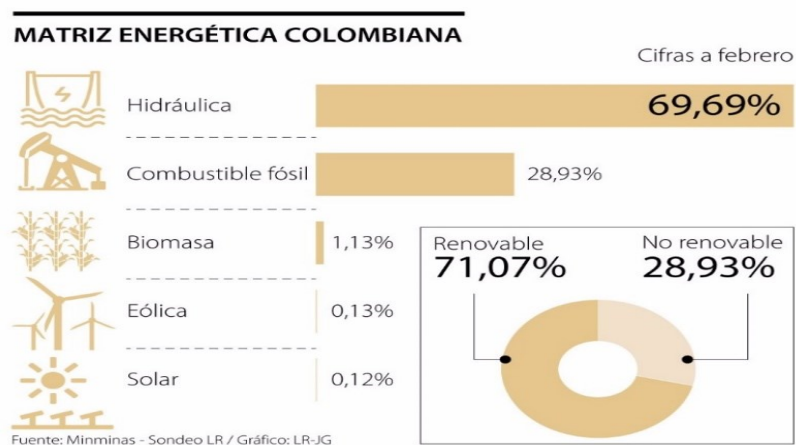
en la generación de energía eléctrica solo alcanzó el 2 % en el 2018. Sin embargo, a pesar de que la participación de la energía fotovoltaica en la matriz energética era de un solo dígito en el mercado global en 2018, esta se ha convertido en la tecnología energética de más rápido crecimiento, con mercados a escala de gigavatios en un amplio número de países.

La demanda de energía solar fotovoltaica se está extendiendo y expandiendo a medida que se convierte en la opción más competitiva para la generación de electricidad en un número creciente de mercados, como en aplicaciones residenciales y comerciales, y cada vez más para proyectos de servicios públicos. Lo anterior, incluso sin tener en cuenta los costos externos de los combustibles fósiles (REN21, 2019).

1.1.3. Contexto nacional

La incursión de las energías renovables modernas en Colombia, en especial de la energía fotovoltaica, se encuentra en sus primeros pasos, y su participación en la matriz energética es marginal, pues cuenta con solo un 0.12 %. En la Figura 7 se muestran cifras al respecto. Aunque la matriz energética del país está dominada por los combustibles fósiles y la energía hidroeléctrica, el Estado colombiano ha estado trabajando recientemente para alentar el desarrollo de fuentes de energía renovables no convencionales. Con este fin, se ha fijado el objetivo de aumentar la capacidad de estas fuentes a 11.113 MW en 2018 (en comparación con 9.893 MW en 2013). En la Ley 1715 de 2014 se prevé la integración de estas fuentes y se promueve tanto la eficiencia energética como la demanda (World Energy Council, 2019).

Figura 7. Matriz energética Colombia 2019.



Fuente: la apuesta por las energías renovables

En virtud de la implementación de la Ley 1715, en los resultados de la subasta para la asignación de obligaciones de energía firme del Cargo por Confiabilidad 2022-2023 se adjudicaron 1.398 MW de generación entre eólicos y solares, gracias a los cuales su participación en la base de proyectos de generación pasará en un año y medio del 0.5 % al 5 %. La ejecución de siete proyectos, cinco eólicos en La Guajira y dos solares en el Cesar, demandarán inversiones aproximadas de 1850 millones de dólares, y contribuirán a la meta de reducir el 20 % de las emisiones hacia el 2030, con 3 millones de toneladas de CO₂.

Aunque la meta de Colombia aplica para toda la economía, la construcción de la Contribución Nacional incluye al sector energético como uno de los sectores prioritarios para la implementación de acciones de adaptación innovadoras. Estas deben promover la eficiencia energética en todos los sectores de la producción por medio de energías renovables no convencionales y una gestión más eficiente de la energía (WWF Colombia, 2015).

1.1.4. Contexto legal

En el contexto nacional, la Ley 1715 de 2014 tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente de aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional mediante su integración al mercado eléctrico; su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible; la reducción de emisiones de gases de efecto

invernadero; y la seguridad del abastecimiento energético. En ese sentido, el propósito de dicho marco normativo se fundamenta en tres ejes (Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, 2019):

- a. Orientar las políticas públicas y definir los instrumentos tributarios, arancelarios, contables y de participación en el mercado energético colombiano que garanticen el cumplimiento de los compromisos adquiridos por el Gobierno nacional.
- b. Incentivar la penetración de las fuentes no convencionales de energía, principalmente de aquellas de carácter renovable, en el sistema energético colombiano; la eficiencia energética; y la respuesta de la demanda en todos los sectores y actividades, con criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica.
- c. Estimular la inversión, la investigación y el desarrollo para la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales de energía, principalmente de aquellas de carácter renovable, mediante el establecimiento de incentivos tributarios, arancelarios o contables.

En materia de beneficios, la Ley 1715 establece la deducción en el impuesto sobre la renta, la depreciación acelerada, la exclusión de IVA sobre bienes y servicios, y exenciones arancelarias (ver Tabla 2). También, en la Tabla 3 se enlistan los decretos y resoluciones de dicha ley.

Por otra parte, en materia de compromisos legales, Colombia está comprometida con la implementación del Acuerdo de París COP21 para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con el propósito de cumplir con la meta mundial de evitar el aumento de la temperatura promedio global por encima de los 2°C. Por tanto, la Contribución Nacional ha sido orientada hacia los siguientes objetivos (WWF Colombia, 2019):

- Aumentar la resiliencia y la capacidad adaptativa del país, a través de diez acciones sectoriales y territoriales priorizadas a 2030.
- Fomentar el intercambio de conocimiento, tecnología y financiamiento para acelerar las contribuciones planteadas en materia de adaptación y mitigación de gases de efecto invernadero.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del país 20 % con relación a las emisiones proyectadas a 2030.

Tabla 2. Incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014

Beneficios	Descripción
Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta	Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir FNCE o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el 50 % del valor de las inversiones. El valor por deducir anualmente no puede ser superior al 50 % de la renta líquida del contribuyente.
Depreciación acelerada	Gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una proporción del valor del activo que no puede superar el 20 % anual.
Exclusión de bienes y servicios de IVA	Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados.
Exención de gravámenes arancelarios	Exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de reinversión y de inversión de proyectos con FNCE.

Fuente: *Invierta y gane con energía. Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014 (Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, 2019).*

Tabla 3. Decretos y resoluciones que reglamentan la Ley 1715 de 2014

Decreto/Resolución	Descripción
Decreto 2492 de 2014	Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda.
Decreto 2469 de 2014	Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración.
Decreto 2143 de 2015	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014.
Resolución UPME 0281 de 2015	Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.

Tabla 3. Decretos y resoluciones que reglamentan la Ley 1715 de 2014 (continuación)

Decreto/Resolución	Descripción
---------------------------	--------------------

Resolución CREG 024 de 2015	Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN).
Decreto 1623 de 2015	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las zonas no interconectadas.
Resolución Ministerio de Ambiente 1312 de 11 agosto de 2016	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras determinaciones.
Resolución Ministerio de Ambiente 1283 de 8 agosto de 2016	Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones.
Decreto 348 de 2017	Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala.
Resolución Ministerio de Ambiente 1988 de 2017	PAI 2017 - PROURE (Programas para Exclusión IVA).
Resolución UPME 585 de 2017	Procedimiento ante UPME Exclusión de IVA.
Resolución Ministerio de Ambiente 2000 de 2017	Procedimiento ante ANLA para exclusión de IVA.
Decreto 1543 de 2017	Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge).
Resolución CREG 167 de 2017	Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas.

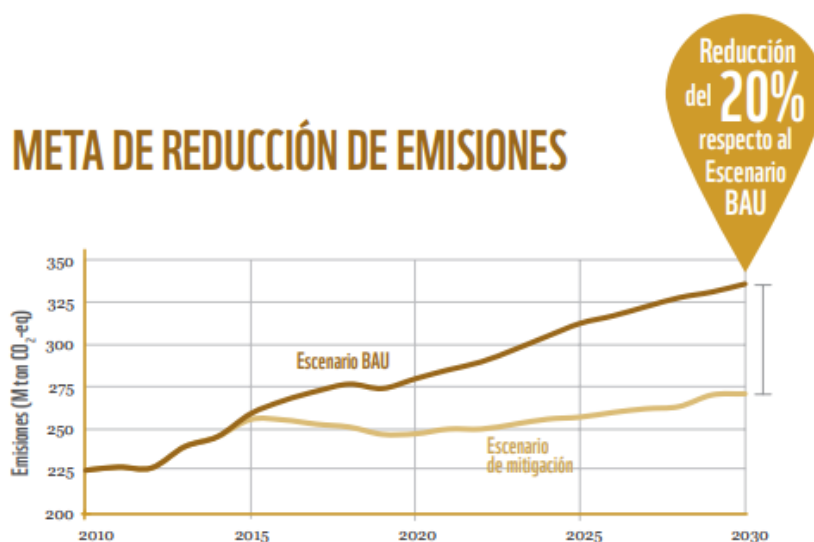
Tabla 3. Decretos y resoluciones que reglamentan la Ley 1715 de 2014 (continuación).

Decreto/Resolución	Descripción
---------------------------	--------------------

Resolución CREG 201 de 2017	Por la cual se modifica la Resolución CREG 243 de 2016, que define la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC) de plantas solares fotovoltaicas.
Decreto 570 de 2018	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones.
Resolución CREG 015 de 2018	Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.
Resolución CREG 030 de 2018	Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.
Resolución CREG 038 de 2018	Por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas.
Resolución 41286 dic 2016	PROURE 2017-2022.

Fuente: (González y Barney, 2019)

Figura 8. Compromiso COP21 de Colombia en la mitigación de GEI.



Fuente: El ABC de los compromisos de Colombia para la COP 21 (WWF Colombia, 2019)

Colombia tomó como punto de referencia el inventario de las emisiones nacionales de 2010 y proyectó cómo crecerían sus emisiones si no se tomaran medidas de mitigación. Con base en esa proyección, creó un escenario para 2030. La reducción del 20 % se planteó de acuerdo con ese escenario proyectado, como se puede observar en la Figura 8.

En resumen, la Ley 1715 de 2014, que fomenta el desarrollo de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER), en conjunto con la Ley 1844 de 2017, que ratifica el compromiso del país con la implementación del Acuerdo de París sobre el cambio climático, establecen una hoja de ruta comprometida con la transición energética hacia la integración de las FNCER, lo cual implica la reconversión de la matriz energética a una matriz más diversificada y limpia. Indudablemente, una de las estrategias con mayor acogida para mitigar el cambio climático está basada en el desarrollo de energías renovables no convencionales que permitan lograr una canasta energética más limpia. Dentro de dichas alternativas no convencionales se encuentra la energía solar fotovoltaica.

1.2. Planteamiento del problema de investigación

En la actualidad, Ecopetrol dispone en sus almacenes de un equipamiento tecnológico solar fotovoltaico, específicamente paneles solares, que se puede reciclar para el desarrollo de proyectos en esta área, y al cual las diferentes unidades administrativas y operacionales de la empresa pueden acceder mediante la presentación de un proyecto específico. Desde la planta de operaciones de la empresa en el municipio de Villeta, Cundinamarca en Colombia ha surgido la iniciativa, que dio origen a este proyecto de investigación, de aprovechar la disponibilidad y el acceso a este equipamiento para estructurar y ejecutar un proyecto de ingeniería que consiste en el diseño de un sistema solar fotovoltaico que abastezca de energía eléctrica las facilidades de uso administrativo. Con el fin de desarrollar tal propuesta, se identificó un área física de 100 m² en el sector del estacionamiento vehicular y de senderos peatonales en la planta de operaciones en Villeta, que es potencialmente aprovechable.

Hacer realidad un proyecto que consiste en la instalación de un sistema solar fotovoltaico conlleva importantes beneficios. Por un lado, desde la perspectiva económica, se materializa una parte de la inversión dispuesta para el equipamiento tecnológico solar fotovoltaico, que se encuentra disponible en el inventario de los almacenes de la empresa. Dicha inversión se estimó en aproximadamente 6000 USD. Así, al destinar este equipamiento al proyecto se evitará que

entre en obsolescencia tecnológica y, por tanto, se deteriore su valor. Además, una vez se tenga el diseño, la puesta en operación del proyecto permitirá obtener beneficios económicos fundamentales, en virtud de la autogeneración de energía eléctrica para uso interno. Se estima que este ahorro será el equivalente al consumo de 21.000 kWh/año⁴, es decir, 56 mil USD aproximadamente.

Otro beneficio no menos importante es el de carácter ambiental, el cual se traduce en una disminución de la huella de carbono de 41.3 toneladas de CO₂, en virtud de la autogeneración de energía eléctrica de 21 mil kWh/año. Aunque se pueden mencionar más beneficios de este proyecto, resulta relevante, hacer hincapié en aquel en el cual se fundamentó, es decir, en la necesidad de brindar protección de los rayos solares, y de las condiciones climáticas de lluvia, tanto a peatones como a vehículos, mediante una instalación solar fotovoltaica elevada en forma de cubierta en el parqueadero de la planta.

A lo anterior se suma que los proyectos de infraestructura solar fotovoltaica están en camino de ser una realidad en Ecopetrol. Aunque a la fecha son pocos, esta tipología de proyectos al interior de la empresa ya ha empezado; a manera de ejemplo puede citarse que en el transcurso del año 2019 inició el plan de construcción de un parque solar en Castilla La Nueva (Meta, Colombia), cuyo propósito es abastecer parcialmente la energía que demanda el campo de producción de crudo del municipio, el segundo más grande del país. De este modo, Ecopetrol dará el primer paso encaminado a, según la conveniencia y la rentabilidad, convertirse en una empresa productora de energía renovable, bajo el esquema de autogeneración.

Este parque solar es una obra que marcó un hito en el proceso de transición energética de la empresa, fue inaugurado en octubre de 2019, cuenta con una capacidad instalada de 21 MW y su objetivo es suministrar energía por los próximos 15 años al campo de producción Castilla. Con él se busca remediar la emisión de más de 154 mil toneladas de CO₂ a la atmósfera, y también se brindará empleo y bienestar a la comunidad, y beneficios a cuatro instituciones educativas mediante el suministro de energía.

Conviene resaltar que Ecopetrol, en su estrategia energética a largo plazo, busca asegurar la disponibilidad permanente de la energía eléctrica requerida para operar sus campos de producción y sus respectivas facilidades. Este hecho le permitirá a la empresa generar

⁴ Este valor salió del trabajo de campo, está desglosado en una tabla, es la sumatoria del consumo de las luminarias.

importantes ahorros y, por ende, mejorar su posición de sostenibilidad y competitividad. Sin lugar a duda, esta iniciativa hace parte del plan de la compañía para fortalecer el desarrollo de proyectos de energía renovable y aportar a la diversificación de su portafolio energético (Impacto TIC, 2018).

Esta orientación hacia la energía solar se suma a la producción de biocombustibles, a partir de palma y caña de azúcar, en dos plantas en los municipios de Barrancabermeja (Santander) y Puerto López (Meta), según lo acredita la nota de prensa acerca de Ecopetrol. En palabras de Felipe Bayón, presidente de Ecopetrol: “La incursión en proyectos de energía solar, se adiciona a otros desarrollos para contar con una matriz energética más diversificada y limpia, que contribuya a la protección del medio ambiente y a garantizar la seguridad energética de Colombia”. Bayón también afirmó que “la apuesta por estas energías convertiría al Grupo Ecopetrol en uno de los principales generadores de energía solar del país” (Becerra, 2018).

En síntesis, las condiciones son favorables para la implementación de un proyecto de infraestructura solar fotovoltaica en la planta de Ecopetrol del municipio de Villeta. No solo existe disponibilidad y acceso al equipamiento, sino que con su uso se derivan importantes beneficios que tienen el respaldo de la gerencia de la planta. A su vez, este tipo de proyectos están alineados con las perspectivas estratégicas de la empresa. Más que resolver un problema, este proyecto de investigación explota oportunidades y necesidades, y beneficia a la empresa al presentar una propuesta técnica para el diseño de un sistema solar fotovoltaico ajustado a las necesidades en el mediano plazo de la planta de operaciones seleccionada.

1.2.1. Pregunta general

¿Cuál podría ser el diseño de un sistema solar fotovoltaico cuya configuración e infraestructura se ajuste a las necesidades presentes y futuras de las facilidades de uso administrativo en la planta de operaciones de Ecopetrol en el municipio de Villeta, Cundinamarca, Colombia, es decir, que aproveche las oportunidades de disponibilidad de equipamiento tecnológico solar fotovoltaico y que, además de valerse del área física disponible en la zona estacionamiento vehicular y senderos peatonales, brinde protección de las condiciones climáticas fluctuantes a los peatones y los vehículos?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Qué tipo de diseño de un sistema solar fotovoltaico debería elegirse, de conformidad con los requerimientos y/o necesidades de consumo de energía eléctrica presentes y futuras de las facilidades de uso administrativo de la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta?
- ¿Qué componentes tecnológicos de un sistema solar fotovoltaico se encuentran disponibles en el mercado para la propuesta de un diseño con las debidas especificaciones técnicas de equipamiento para la configuración de la infraestructura?
- ¿Cuál es la normatividad técnica y regulatoria que debe ser tomada en cuenta para el diseño, la construcción y la operación de sistemas solares fotovoltaicos?
- ¿Qué propuesta se podría plantear para el diseño arquitectónico del sistema solar fotovoltaico, de modo que sus características aprovechen el área física disponible en la zona de estacionamiento y los senderos peatonales, y brinden protección a los vehículos y al personal?
- ¿Cuál es la viabilidad en presupuesto, alcance y tiempo para ejecutar el proyecto de implementación del sistema solar fotovoltaico?
- ¿Qué otros elementos o variables deben ser tenidos en consideración en la formulación del plan del proyecto?
- Con base en la factibilidad y la viabilidad, ¿qué beneficios económicos, ambientales, sociales, etc., aportará el proyecto cuando entre en operación, que vayan de la mano con los indicadores financieros del proyecto (valor presente neto –VPN–, tasa interna de retorno –TIR–, *return on investment* o retorno de la inversión –ROI–, beneficio-costos, etc.) en el tiempo?

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Presentar una propuesta técnica de diseño de un sistema solar fotovoltaico, cuya viabilidad se ajuste a las necesidades presentes y futuras de las facilidades de uso administrativo de la planta de operaciones de Ecopetrol en el municipio de Villeta, Cundinamarca (Colombia).

2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la tipología de la infraestructura que cumpla las necesidades de consumo de energía eléctrica presentes y futuras de uso administrativo en la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta, teniendo en cuenta los requerimientos y las restricciones.
- b) Identificar los componentes tecnológicos factibles del sistema solar fotovoltaico que se puedan implementar en su diseño, construcción y operación según sus especificaciones técnicas.
- c) Determinar las necesidades de consumo de energía eléctrica presentes y futuras de las facilidades de uso administrativo de la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta.
- d) Diseñar una propuesta del sistema solar fotovoltaico, de conformidad con las necesidades y restricciones físicas de la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta (principal).
- e) Estimar la evaluación financiera y ambiental para la ejecución del proyecto de instalación de la infraestructura del sistema solar fotovoltaico.

3 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene la intención de y promover darle la importancia a la utilización de las energías renovables. Actualmente, la contaminación ambiental está alcanzando niveles altos, a causa del uso de combustibles fósiles para la generación de energía. Así, implementar sistemas fotovoltaicos con paneles solares que produzcan energía a partir de la radiación solar implica un gran avance para la sociedad, pues permite dejar atrás la generación en exceso de gases de efecto invernadero, que afectan directamente a la atmósfera e indirectamente a todos los seres vivos del planeta.

En busca de una solución para tener energías alternativas, se tiene un panorama en el cual se puede dar un desenlace a más de una problemática, lo cual genera al mismo tiempo un modelo de negocio innovador, integral y con proyección global. En Colombia, actualmente el 68 % de la energía consumida proviene de sistemas hidráulicos, es decir, que el agua, un recurso natural que está en peligro es el más utilizado; por el contrario, las fuentes no renovables tan solo generan un 32 % de la energía. Por lo tanto, para el país es indispensable generar este tipo de proyectos de alto impacto.

Con la implementación de la propuesta la vicepresidencia de transporte sería pionera en su tipo, y a su vez, Ecopetrol continuaría reforzando sus políticas enfocadas en las energías alternativas, por las cuales se están realizando alianzas público-privadas. Conviene distinguir que Ecopetrol tiene la visión de generar un entorno cultural en pro de las energías alternativas, que no solo cumpla como modelo de negocio, sino que se logre masificar dentro de la misma entidad e impulse a que sus funcionarios presenten propuestas en torno a este ámbito tecnológico. En ese orden de ideas, el presente proyecto ha sido divulgado por la red social de la compañía, denominada Yammer, desde donde se ha considerado replicar la iniciativa en todas las áreas, de modo que se produzcan miles de metros cuadrados de techos susceptibles de aprovechamiento, y se aporte al cambio climático con ahorros significativos para la empresa y con una gran mejora de su imagen corporativa.

Adicionalmente, el presente trabajo tiene una gran relevancia social para la empresa y para Villeta, dado que el área donde será instalado el sistema solar fotovoltaico es de gran visibilidad para la comunidad, lo cual una da una gran imagen de la empresa ante la población y su área de influencia, y seguro va a promover el montaje de nuevos sistemas fotovoltaicos en el municipio. Por ejemplo, en vista de que no se cuenta con un sistema de semaforización, en el

Concejo Municipal se podría promover la utilización de la energía solar para su desarrollo; también, el hospital municipal podría beneficiarse con un sistema fotovoltaico de respaldo a la energía de la empresa de servicios públicos; e igualmente, las plantas de procesamiento de caña de azúcar para la elaboración de panela, que son un pilar para la economía de la región.

En conclusión, los sistemas fotovoltaicos podrían impulsar la industria y el desarrollo del municipio y su área de influencia; entonces, podría buscarse una financiación con entidades bancarias, como el Banco Agrario, y promover la política de obras por impuestos que ha adoptado el país y la empresa, lo cual aportaría a la promoción de proyectos a gran escala y a largo plazo que cuentan con un valor agregado muy importante, el bajo costo del kilovatio/hora. Asimismo, puede fomentarse el respaldo a las empresas de generación de energía, promover la sana competencia, y asegurar la cobertura del servicio en caso de un posible apagón en el país, debido, por ejemplo, a la no entrada en funcionamiento de Hidro Ituango o a las épocas de verano intenso, donde los costos de la energía se incrementan. En fin, es una buena opción para el desarrollo de este y otros pueblos en Colombia.

Un estudio realizado por la Universidad Jorge Tadeo Lozano y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) planteó que en el año 2030 el país consumiría un 30 % de energías limpias o renovables no convencionales y 70 % de las fuentes tradicionales. En concordancia con dicha situación, el Ministerio de Minas y Energía expidió el Decreto 0570, mediante el cual se establecen los lineamientos para contratar proyectos de generación de energías renovables a largo plazo que complementen a los actuales, con lo cual se espera que se comiencen a dar este tipo de iniciativas.

La energía solar se ha convertido en la tendencia de las energías renovables, pues no libera gases de efecto invernadero y, a excepción de la necesidad de una fuente de agua limpia para funcionar, no utiliza absolutamente ningún otro recurso. Por lo tanto, es segura y ecológica. Por el contrario, la electricidad tradicional depende en gran medida de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural. Estos no solo son perjudiciales para el medio ambiente, sino que también son recursos limitados. Lo cual se traduce en un mercado volátil, en el que los precios de la energía cambian durante un mismo día.

Además, la electricidad debe ser transportada desde las grandes centrales eléctricas a los consumidores finales a través de redes extensas. Las transmisiones de larga distancia equivalen a pérdidas de potencia. En cambio, la energía solar en un techo es útil para aumentar la eficiencia

de la electricidad, considerando la corta distancia. Al mismo tiempo, los sistemas de energía solar son duraderos, por lo que se reducen las posibilidades de interrupción del servicio, que resulta perjudicial para el buen desempeño de cualquier actividad que utilice la energía eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos funcionan como una pequeña planta de energía. Esto, a su vez, proporciona una mayor seguridad en la red eléctrica, especialmente en términos de desastres naturales o humanos. Con la ayuda de subvenciones para paneles solares, también se puede recibir un pago por suministro a las redes eléctricas convencionales. Así, estos sistemas comienzan a ahorrar dinero desde el momento en que se encienden; sin embargo, las ventajas de la energía solar son incluso más visibles a largo plazo. Cuanto más tiempo se tenga un sistema de energía solar, más beneficios se obtienen de la tecnología solar y se materializa el cuidado del medio ambiente. Sumado a lo anterior, la energía solar tiene una segunda aplicación. A menudo se le asocia solamente con la electricidad, pero también es posible utilizarla para la calefacción. Este proceso se logra mediante el despliegue de sistemas solares térmicos que simplemente convierten la luz solar en soluciones de calefacción.

Por ende, para implementar un sistema solar fotovoltaico es indispensable que este sea eficiente, eficaz, factible, viable y que tenga un piloto de muestra, como lo es este trabajo de investigación aplicado para evaluar sus beneficios en Colombia. Se busca diseñar un sistema fotovoltaico que resulte útil desde diferentes perspectivas. En primer lugar, se construirá a partir de la utilización de paneles solares reciclados de otras dependencias de la empresa, a los cuales se les han realizado pruebas de funcionamiento, y que están disponibles pues se encuentran almacenados desde hace un tiempo. También, se busca el aprovechamiento de un área de parqueadero para realizar el montaje del sistema como una cubierta que sirva como protección para las personas y los vehículos que por allí transitan, puesto que la radiación solar en Villeta es muy alta. Así, habrá beneficios económicos, de servicios y de contribución para el planeta.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1. Consideraciones básicas

Para comenzar es preciso preguntarse ¿Cómo aprovechar la energía solar? “Para transformar la energía solar se utilizan principalmente tres tipos diferentes de tecnologías: energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y energía solar pasiva” (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2019, p. 13). El interés del presente trabajo está centrado en la tecnología solar fotovoltaica, cuyas características se describen a continuación.

4.1.1. ¿Qué es la energía solar?

“La energía solar se define como la energía producida por reacciones nucleares al interior del Sol, que son transmitidas en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio (radiación solar)” (Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, 2019, p. 10).

4.1.2. Radiación solar en la Tierra

La radiación solar, es el conjunto de radiaciones electromagnéticas, generadas por reacciones de fusión nuclear al interior del sol, y nuestro planeta recibe una radiación solar promedio de 1367 w/m^2 , y que depende de la distancia y la forma como la recibe la tierra, existen diferentes tipos de radiación, la directa que llega al sistema solar fotovoltaico, sin ningún intermediario, la difusa que es modificada por las nubes, por las partículas de polvo, que cambian su dirección y por lo tanto disminuyen su potencial energético como en invierno, y la radiación reflejada que es la procedente de otros elementos, que la reflejan como los lagos, el mar.

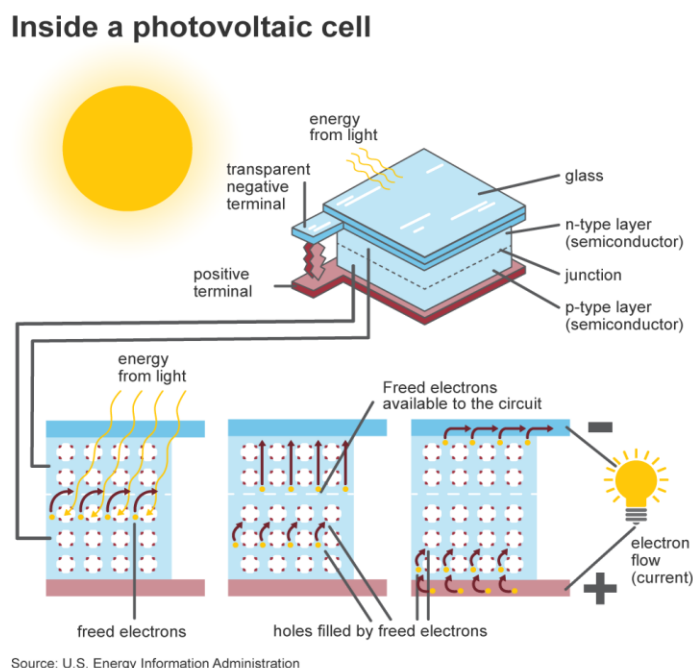
4.1.3. Cantidad de radiación solar

Para conocer la cantidad de energía que se puede obtener del Sol, es necesario medir la cantidad de radiación global, que recibe realmente una región, y depende de la posición del Sol en el cielo, es la suma de la radiación directa, la difusa y la reflejada y que varía diaria y anualmente; por condiciones atmosféricas generales y del microclima; altura sobre el nivel del mar y la duración del día, en las diferentes épocas del año, datos que se analizarán en el desarrollo del proyecto, como cálculos de la HSP (Hora solar Pico), con datos de PVGIS.

4.1.4. Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar. El principal componente de este sistema es el módulo fotovoltaico, a su vez compuesto por células capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua. El resto de los equipos incluidos en un sistema fotovoltaico dependen en gran medida de la aplicación a la que están destinados. (Perpiñán, 2018, p. 1)

Figura 9. Conversión de la luz solar en electricidad.



Fuente: (U.S. Energy Information Administration, 2019)

En La figura 9, que se muestra cómo las células fotovoltaicas convierten la luz solar en electricidad.

4.2. Tipologías de infraestructuras de sistemas solares fotovoltaicos

4.2.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Para planificar con éxito un sistema fotovoltaico o PV (siglas del término en inglés *photovoltaic*) es crucial no solo comprender la función de los diferentes componentes y conocer sus especificaciones primordiales, sino saber el tipo de sistema que mejor se ajusta a las necesidades y restricciones del requeridor. Simultáneamente, es importante conocer el efecto de la ubicación en el rendimiento esperado de un sistema PV. Según su configuración, se pueden distinguir tres

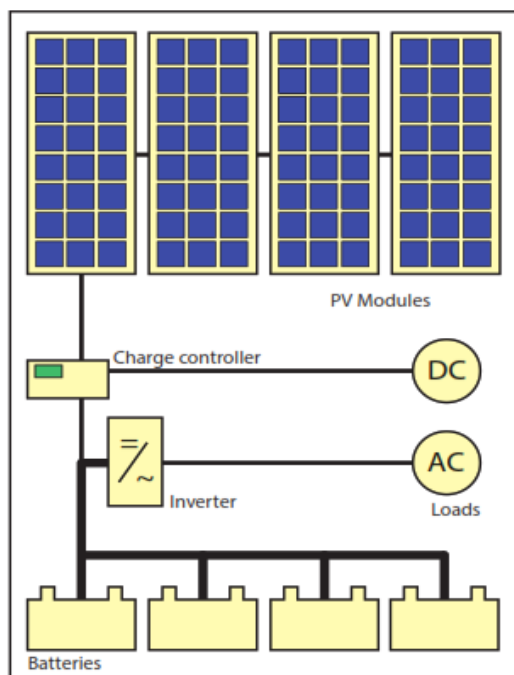
tipos principales de sistemas fotovoltaicos: autónomos (*off-grid*), conectados a la red (*on-grid*) e híbridos. Los sistemas se adaptan para cumplir requisitos particulares, por lo que el tipo y la cantidad de los elementos básicos puede variar. Así, un diseño de sistema modular permite una fácil expansión, cuando la demanda de energía cambia (Smets et al., 2016).

4.2.1.1. Sistemas autónomos (*off-grid*)

Los sistemas *off-grid*, que también se denominan sistemas fotovoltaicos fuera de la red, dependen solo de la energía solar. Su denominador común es la necesidad de satisfacer una demanda energética determinada. Por esta razón, prácticamente todos los sistemas autónomos incorporan un equipo de acumulación de energía. Para estos se incluyen con las baterías unos controladores de carga que las desconectan de los módulos fotovoltaicos cuando están completamente cargadas, y pueden desconectar la carga para evitar que las baterías se descarguen por debajo de cierto límite. Las baterías deben tener suficiente capacidad para almacenar la energía producida durante el día y poder utilizarla en la noche y durante los periodos de mal tiempo (Smets, Jager, Isabella, Zeman, & Van Swaaij, 2016).

La representación esquemática de un sistema fotovoltaico con cargas de corriente directa (DC) y corriente alterna (CA), como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10. Representación esquemática de un sistema PV autónomo con cargas DC y CA.



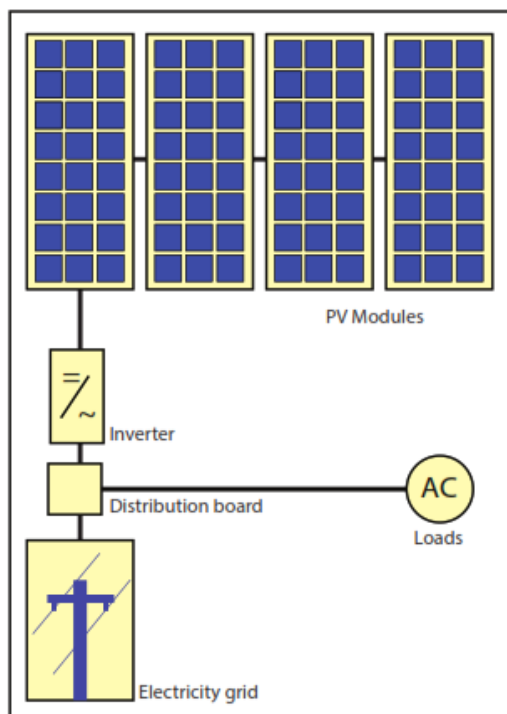
Fuente: (Smets et al., 2016)

4.2.1.2. *Sistemas conectados a la red (on-grid)*

Estos sistemas producen energía eléctrica para autoconsumo e inyección en la red convencional. Con el objetivo de permitir un correcto acoplamiento con la red eléctrica, estos incorporan un equipo inversor que adecúa la potencia producida por el generador fotovoltaico a las condiciones de la red convencional (Perpiñán, 2018); este convierte DC en CA. Por ejemplo, en los sistemas pequeños que se instalan en hogares residenciales, el inversor se conecta a la placa de distribución, desde donde la energía fotovoltaica generada se transfiere a la red eléctrica o a los aparatos de CA de la casa.

En principio, estos sistemas no requieren incorporar equipos de acumulación de energía (baterías), puesto que están conectados a la red; esta última actúa como un amortiguador al cual se transporta un exceso de suministro de electricidad fotovoltaica, mientras que la red también suministra electricidad a la casa en tiempos de generación de energía fotovoltaica insuficiente. Sin embargo, cada vez más sistemas conectados a la red contienen baterías para aumentar el autoconsumo, es decir, la cantidad de electricidad fotovoltaica generada que consume el hogar (Smets et al., 2016). En la Figura 10 se muestra esquemáticamente un sistema PV *on-grid*.

Figura 11. Representación esquemática de un sistema PV conectado a la red.



Fuente: (Smets et al., 2016).

Cabe resaltar que el proyecto planteado utilizará el sistema conectado a la red, como se puede observar en la Figura 11, puesto que va a trabajar en horas del día, sin baterías, con el fin de ahorrar energía y costos, y de minimizar la suspensión del servicio por los cortes de energía por parte de la empresa de distribución eléctrica. Siempre se va a utilizar primero la energía del inversor y luego la de la red eléctrica, si hubiera excedentes estos se pueden inyectar a la red eléctrica.

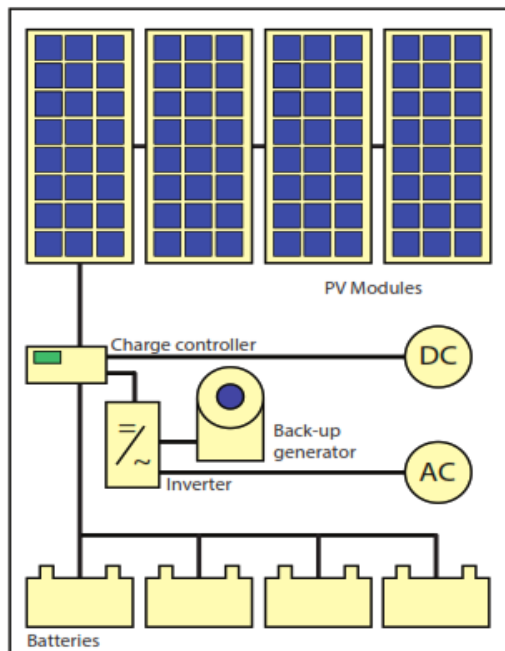
4.2.1.3. Sistemas híbridos

Estos sistemas combinan módulos fotovoltaicos con un método complementario de generación de electricidad, como un generador diésel, de gas o eólico. Para optimizar los diferentes métodos de generación de electricidad, los sistemas híbridos generalmente requieren controles más sofisticados que los sistemas fotovoltaicos autónomos o conectados a la red.

Por ejemplo, en el caso de un sistema PV/diésel, el motor diésel debe arrancarse cuando la batería alcanza un nivel de descarga dado, y detenerse nuevamente cuando la batería esté en un estado de carga adecuado. De igual modo, el generador de respaldo se puede usar para

recargar las baterías solamente o para suministrar la carga (Smets et al., 2016). Una representación sintetizada de un sistema híbrido, como se puede observar en la Figura 12.

Figura 12. Representación esquemática de un sistema PV híbrido.



Fuente: (Smets et al., 2016)

4.3. Componentes de un sistema solar fotovoltaico y sus especificaciones técnicas

Como ya se estableció, el interés del presente proyecto son los sistemas solares fotovoltaicos *on-grid*, por lo tanto, en este apartado se tratarán los componentes de dichos sistemas. Aunque los paneles solares son el corazón de un sistema fotovoltaico, se requiere de otros componentes para el correcto funcionamiento y control de un sistema de trabajo. Estos dependen de si el sistema solar fotovoltaico está conectado a la red eléctrica o si es un sistema autónomo. A continuación, se presenta una descripción general de estos.

4.3.1. Panel solar fotovoltaico o generador fotovoltaico

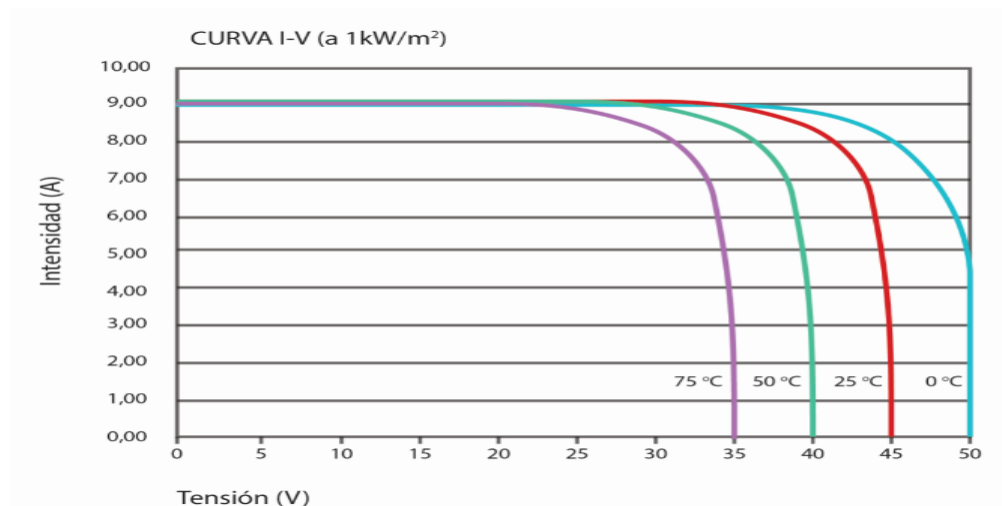
En este proyecto se utilizan paneles solares fotovoltaicos monocromáticos existentes en la planta Ecopetrol de Villeta, cuya función es captar y convertir la radiación solar en corriente eléctrica. Estos dispositivos se pueden conectar en serie o en paralelo; cuando se conectan en serie el voltaje total será la suma de los voltajes individuales de cada uno de los dispositivos y la corriente de salida será igual a la corriente de un módulo, al conectarlos en paralelo la corriente total será la suma de las corrientes individuales de cada módulo y el voltaje será el mismo que el

de uno solo. Por lo tanto, el número de componentes conectados en serie determina el voltaje, y el número de dispositivos en paralelo determina la corriente que se le puede suministrar a una carga (Arenas y Zapata, 2011, p. 31).

4.3.1.1. Especificaciones técnicas de los paneles solares fotovoltaicos

La potencia suministrada por los módulos fotovoltaicos depende de la irradiancia y temperatura, la potencia suministrada por los paneles solares está influenciada por la irradiancia: al aumentar la irradiancia, aumenta la corriente, por lo tanto, la potencia, casi sin afectar el voltaje, como se puede observar en la Figura 13. De acuerdo con las ecuaciones para cálculos eléctricos, la potencia es igual al producto entre la corriente y el voltaje, es decir, $P=I \cdot V$.

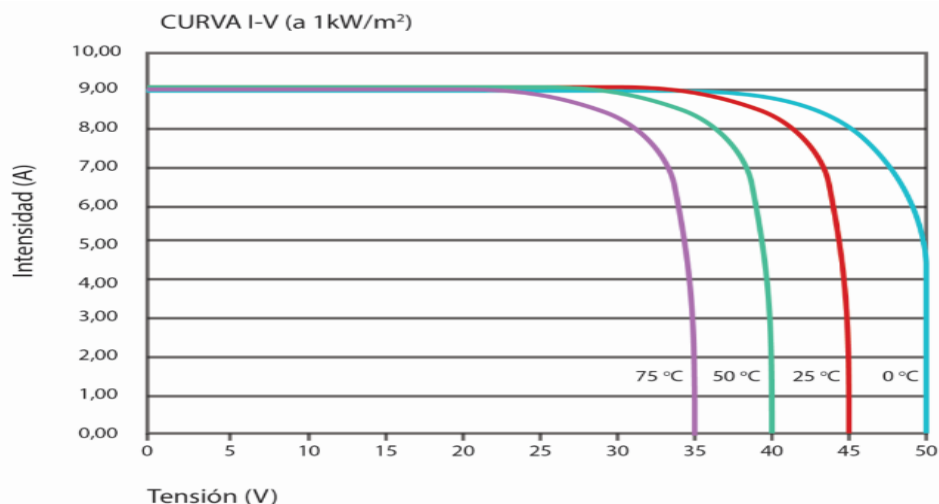
Figura 13. Irradiancia en paneles solares fotovoltaicos.



Fuente: elaboración propia, datos PVGIS.

También es pertinente mencionar que a medida que aumenta la temperatura de trabajo del panel, disminuye el voltaje, y, por lo tanto, la potencia, como se puede observar en la Figura 14. Así, para predecir las pérdidas eléctricas, es importante saber a qué temperatura van a estar trabajando los paneles.

Figura 14. Influencia de la temperatura en la potencia.



Fuente: elaboración propia, datos PVGIS


En la Figura 15 se pueden observar los parámetros eléctricos más importantes de un panel solar fotovoltaico son:

- Punto de máxima potencia (PMP): producto del valor de la tensión (V_m) e intensidad (I_m) máximas para los que la potencia entregada es máxima.
- Factor de forma (FF): cociente entre la potencia máxima que puede entregarse a una carga y el producto entre la tensión a circuito abierto y la intensidad de cortocircuito. Suelen ser habituales los valores comprendidos entre 0.7 y 0.8.
- Eficiencia de conversión energética: cociente entre la potencia eléctrica máxima y la potencia dependiente de la irradiancia incidente (PL) sobre la célula.
- Temperatura: es importante considerar los efectos de la temperatura puesto que influye en cada uno de los parámetros de la célula mencionados. Así, a mayor temperatura:
 - Aumenta la intensidad de cortocircuito (I_{cc}).
 - Disminuye la tensión a circuito abierto (V_o).
 - Disminuye el factor de forma (FF).
 - Decrece el rendimiento (Palomino, 2012, p. 14).
- “Tensión de circuito abierto (V_o): al dejar los terminales del panel en circuito abierto (intensidad cero), la tensión que proporciona la radiación será máxima” (Palomino, 2012, p. 16).
- “Corriente de cortocircuito (I_{cc}): al cortocircuitar los terminales del panel (tensión cero), la radiación solar proporcionará una corriente máxima” (Palomino, 2012, p. 16).

- “Potencia pico (Pp): potencia máxima (en vatios, W) que genera un módulo en condiciones normales de radiación. Es el producto de la tensión pico por la corriente pico” (Palomino, 2012, p. 16).
- “La intensidad pico (Ip) y la tensión pico (Vp) son los valores de intensidad y tensión que hacen máxima la potencia en condiciones normales” (Palomino, 2012, p. 16).

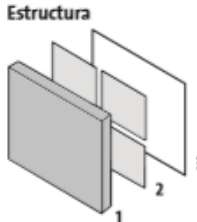
Adicional a lo anterior, estos 3 tipos son los que están a la vanguardia para la implementación de sistemas fotovoltaicos a nivel industrial: paneles fotovoltaicos Mono-PERC, Monocristalino doble celda, Paneles bifaciales. Algunas de las marcas reconocidas en el mundo son: Jinko Solar, JA Solar, QCell, Seraphim, Risen, Axitec, Canadian Solar.

Figura 15. Ejemplo de especificación técnica para un panel solar.



SolarWorld Module SW 165/175/185 mono

Estructura



- 1] Parte anterior: vidrio reforzado
- 2] 72 células solares monocristalinas 125 mm x 125 mm incorporadas en EVA (Acetato de Vinilo-Etieno)
- 3] Parte posterior: lámina de Tedlar

Comportamiento bajo condiciones estándar de prueba			
Potencia en el punto de máx. potencia (Pmax)	165 Wp	175 Wp	185 Wp
Tensión a potencia máxima (Vmpp)	35,3 V	35,7 V	36,0 V
Corriente a potencia máxima (Impp)	4,7 A	4,9 A	5,1 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	44,1 V	44,4 V	44,5 V
Corriente de corto circuito (Isc)	5,2 A	5,4 A	5,5 A

Comportamiento a 800 W/m², NOCT, AM 1,5			
Potencia en el punto de máx. potencia (Pmax)	125 Wp	131 Wp	138 Wp
Tensión a potencia máxima (Vmpp)	32,7 V	33,1 V	33,4 V
Corriente a potencia máxima (Impp)	3,8 A	4,0 A	4,1 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	40,9 V	41,1 V	41,2 V
Corriente de corto circuito (Isc)	4,2 A	4,4 A	4,5 A

Pequeña reducción de la eficiencia en el comportamiento con carga parcial a 25°C: A 200 W/m² se alcanza el 95 % (+/- 3 %) de la eficiencia bajo condiciones estándar de prueba (1000 W/m²).

Materiales empleados	
Células por módulo	72
Tipo de célula	Silicio monocristalino
Medidas de la célula	125 x 125 mm

Parámetros característicos del comportamiento térmico	
NOCT	46°C
TK Isc	0,06 %/K
TK Voc	-0,35 %/K

Parámetros característicos para la integración óptima en el sistema	
Tensión máxima del sistema	715 V
Carga máxima de corriente inversa	No aplicar tensiones externas al módulo mayores que el valor de Voc.

Datos sobre potencia y desviaciones límites de manufactura	
Potencia nominal	165/175/185 Wp +/- 3 %
Caja de conexión	IP 65
Enchufe	MC tipo 4

Fuente: catálogo del fabricante Solar World

4.3.1.2. Certificaciones y garantías de los paneles solares fotovoltaicos

Los fabricantes entregan dos tipos de garantía, la garantía de producto vigente por 10 o 12 años, que depende de la calidad del material y solo cubre defectos de fábrica, no por instalación o transporte; y la garantía de rendimiento, que se refiere a la degradación que sufre el panel a lo largo de su vida útil, es la más conocida y suele ser de 25 años, normalmente garantiza el 90 % de rendimiento en un periodo de 10 años y un rendimiento de un 80 % durante 25 años. Por otro lado, en los certificados que se deben exigir a los fabricantes, los cuales deben ser emitidos por un laboratorio reconocido, como TÜVRheinland, deben cumplir obligatoriamente con las normativas:

- UNE-EN 61215: cualificación del diseño y homologación de paneles fotovoltaicos.
- UNE-EN 61730: cualificación de la seguridad de los paneles FV.
- Marcado CE: marcado de conformidad europea.

4.3.2. Inversor fotovoltaico de conexión a red

Se encarga de adaptar la DC producida por el generador fotovoltaico a las características eléctricas requeridas por las cargas que se deben alimentar. Se utilizan en sistemas conectados a la red para convertir la electricidad DC, procedente de los módulos fotovoltaicos, en electricidad AC para alimentar a la red eléctrica. Muchos inversores tienen un convertidor DC-DC incluido para convertir el voltaje variable de la matriz FV a un voltaje constante que es la entrada para el convertidor DC-AC real. Además, los sistemas autónomos pueden tener un inversor conectado a las baterías. El diseño de un inversor de este tipo difiere considerablemente del de un sistema conectado a la red (Smets et al., 2016).

La potencia de los inversores definirá la potencia de la instalación; a partir de la potencia total del subcampo generador y el tipo de configuración se puede determinar la potencia del inversor o viceversa, si se decide primero la potencia de los inversores, se puede determinar o dimensionar la potencia del campo generador. La potencia entre el generador fotovoltaico y el inversor deben corresponderse óptimamente para evitar, entre otras cosas, condiciones de sobrecarga.

La elección del inversor debe hacerse de manera que su potencia máxima se encuentre por encima de la salida fotovoltaica máxima y que la potencia nominal en corto circuito del

inversor esté por debajo de la potencia fotovoltaica. La eficiencia del inversor depende del voltaje y la potencia de entrada, y cumple dos funciones, el seguimiento del punto máximo de potencia, y su esencial, convertir la corriente continua en corriente alterna para suministrarla a los equipos que trabajan bajo este tipo de corriente. Debido a que la energía que proporcionan los paneles solares es en corriente continua, los inversores son los equipos encargados de transformarla en energía en CA, con el objeto de utilizarla en la iluminación y en las aplicaciones que se deseen.

4.3.2.1. Especificaciones técnicas de los inversores

Se debe tener muy en cuenta, si es de 12, 24 o 48V, ya que los inversores solamente funcionan a una única tensión de entrada. La recomendación es que el sistema trabaje a mayor tensión, para que así se necesiten menos amperios de consumo y las pérdidas en los cables y en el conjunto del sistema sean menores. Aunque cada vez hay inversores con mayor potencia para todas las tensiones disponibles, por norma general en 12 V se recomiendan inversores de hasta unos 2000-3000 W, para 24 V de hasta 5000-6000 W y para 48 V ya se pueden encontrar todo tipo de soluciones hasta potencias muy elevadas. (Efimarket, 2018, párr. 23)

También podemos encontrar en el mercado los micro inversores, que tienen una eficiencia mayor que las cajas de conexionado, puesto que utilizan un sistema **descentralizado**. **La arquitectura recomendable para los inversores es descentralizada, ya que facilita el mantenimiento del sistema, y evita el desplazamiento de inversores grandes con su problema de logística asociado.** En este caso, el sistema no se ve afectado por las malas condiciones de alguno de los paneles, y continúa trabajando con los paneles que se encuentren en buen estado. De igual manera, permite la identificación de los paneles que se encuentren en falla con mayor facilidad. Existen una serie de elementos que se deben tener en cuenta en la configuración de estos sistemas. La potencia del inversor es un 20 % inferior a la potencia pico de la instalación FV, esto se debe a los siguientes factores:

- La potencia pico del generador se alcanza en ocasiones puntuales, lo cual hace que habitualmente los inversores trabajen por debajo del 70 % de su potencia máxima, lo que proporciona un mejor ajuste a la potencia real de funcionamiento.
- Existen diferentes tipos de pérdidas que reducen la potencia disponible en la entrada del inversor, causada por la degradación de los paneles. la potencia que proporcionarán irá disminuyendo a medida que envejezcan.

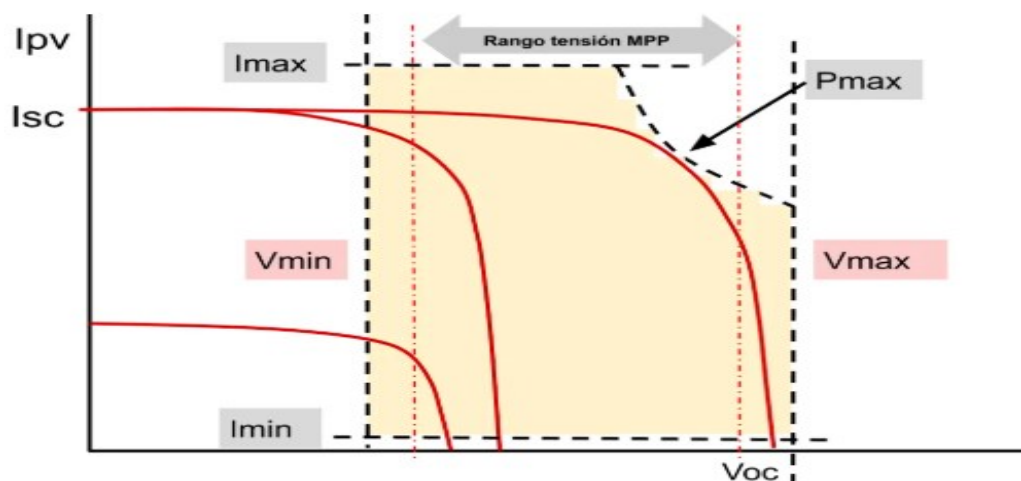
Se debe tener cuidado de no subdimensionar el inversor, dado que las sobrecargas permanentes reducen rápidamente su vida útil. Así, la potencia real de funcionamiento del inversor se compone de la siguiente manera:

- P_r = potencia real de funcionamiento y P_n = Potencia nominal: que es la potencia máxima que el inversor es capaz de entregar a la red eléctrica.

$$P_r = 1,2 * P_n$$

- Potencia pico del sistema solar fotovoltaico: que es la potencia máxima del sistema solar fotovoltaico al que podemos conectar el inversor, y debe ser igual o debe estar por encima de la potencia nominal del inversor.
- Rendimiento del inversor: su efectividad está en la conversión de corriente y debe estar cercano al 99 %.
- Tensión mínima de entrada: tensión máxima de entrada.
- Tensión máxima de entrada: es la tensión que puede soportar el inversor, por encima de ella puede deteriorarse.
- THDv: es la tasa de armónicos de tensión que viene impuesta por la red, y debe estar por debajo del 2 %.
- TDHI: la tasa armónica de la corriente que inyecta el inversor debe ser inferior al 5 %, se refiere al número de seguimientos de máxima potencia del grupo de paneles independientes.
- Limitación de inyección de corriente continua: se debe evitar la saturación, por lo cual esta debe estar por debajo de 5 mA.
- Protección modo isla: esto debido a que el inversor se desconecta de la red ante un fallo eléctrico, y solo puede funcionar si la energía producida se consume.
- Factor de potencia: entrega energía activa.
- Índice de protección (IP): no se debe superar la tensión ni la corriente máxima del inversor.

Figura 16. Limitaciones del sistema solar fotovoltaico.



Fuente: elaboración propia, datos

En la Figura 16 se muestran las principales limitaciones del sistema solar fotovoltaico, I_{max} , P_{max} , V_{min} , V_{max} , I_{min} , V_{oc} , I_{pv} , I_{sc} , y están explicadas en las especificaciones técnicas de los equipos, paneles solares e inversores, principalmente.

Tabla 4. Ejemplo de especificaciones técnicas de un inversor

Technical data	Sunny island 4548-US	Sunny island 4548-US
AC output (loads)		
Rated grid voltage/AC Voltage range	120 V/ 105-132 V	121 V/ 105-132 V
Rated Frequency / Frequency range (adjustable)	60 Hz/ 55 Hz..65 Hz	61 Hz/ 55 Hz..65 Hz
AC Power (at 25°C/ al 40°C) For 3 hours	5000 W / 4000 W	6001 W / 5000 W
Rated power	4500 W.	5750 W.
AC Power (at 25°C/ al 40°C) For 3 hours	5300 W/8400 W/ 11000 W	7000 W/8400 W/ 11000 W
Rated current /max. Output current	37.5 A/180 A. For aprox. 60 ms.	48 A/180 A. For aprox. 60 ms.
Total harmonic factor uoutput	3% / -1+	3% / -1+
AC Input		
Rated input Voltage	120 V/ 80-150 V	121 V/ 80-150 V
Rated input frequency	60 Hz/ 55 Hz..65 Hz	61 Hz/ 55 Hz..65 Hz
Max. AC input current	56 A./ 0...56	57 A./ 0...56
Max. AC input Power	6.7 Kw	6.7 Kw
Battery DC Input		

Tabla 4. Ejemplo de especificaciones técnicas de un inversor (continuación)

Rated input voltage / DC Voltage range	48 v./ 41 v-63	49 v./ 41 v-63
Rmax. Battery charging current / DC Rate charging current	100 A/ 85 A.	130 A / 110 A.
Battery type / battery capacity range	Lead, Nicd/ 100 Ah...10000 Ah.	Lead, Nicd/ 100 Ah...10000 Ah.
Efficiency 7 self consumption		
Max. Efficiency / CEC Efficiency	96% / 94.5%	96% / 94%
Selfconsumption without load/ standby	25 W. /4 W.	25 W. /4 W.
Protective devices		
DC Reverse polarity protection / DC Fuse	x	x
AC Short-circuit / AC overload	x	x
Over temperature/ battery deep discharge	x	x

Fuente: catálogo Inversor

En la Tabla 4 se muestra un ejemplo de las especificaciones técnicas de un inversor, que se encuentran en el catálogo del mismo, y que se han enumerado y especificado a lo largo del proyecto, para brindar claridad de los aspectos a tener en cuenta en el diseño del sistema solar fotovoltaico, objeto del presente proyecto.

4.3.3. Centro de transformación

Son los encargados de elevar la tensión de salida de los inversores al valor correspondiente de la red de conexión cuando sea necesario. Normalmente los inversores se instalan en centros de transformación prefabricados que incluyen transformadores y tienen potencias normalizadas para conectarse a la red eléctrica.

En estos centros de transformación podemos encontrar los medidores o contadores de energía eléctrica bidireccionales, que gracias a la resolución 40072 del 29 de enero de 2018, donde establece la forma de implementar la infraestructura de medición avanzada, en el servicio de energía eléctrica, que permite cuantificar los excedentes que se suministran a la red, los contadores bidireccionales, como su nombre lo indica funcionan en ambas direcciones, de la red

al usuario y del usuario a la red, permite cuantificar la venta de excedentes de energía eléctrica generada con el sistema solar fotovoltaico a la red eléctrica convencional.

4.3.3.1. Elementos de protección del circuito

En general, todo el sistema solar fotovoltaico debe estar protegido contra cortocircuitos, sobretensiones y sobreintensidades, tanto en el lado de corriente continua como en el lado de corriente alterna. Lo anterior no es solo para proteger los equipos, está diseñado para proteger a las personas, mediante contactos directos o indirectos, por lo cual se utilizan paneles con aislamiento o diodos *bypass*, que ya vienen incluidos en las cajas de conexión de cada panel solar fotovoltaico, y que impiden que la corriente del circuito circule por celdas dañadas o sombreadas y evitan puntos calientes.

El cuadro general de medida y protección se debe colocar lo más cerca del inversor en una caja de paso que contendrá los equipos de protección de CA; un interruptor magnetotérmico general trifásico con poder de corte mayor a 30 kA, que debe tener una intensidad nominal mayor de la intensidad máxima que soportará el cable eléctrico seleccionado; y una protección diferencial a base de un interruptor diferencial de 300 mA de sensibilidad. El circuito AC, debe tener fusibles DC1000 V (Norma IEC 60364-7-712) y un descargador de sobretensiones de 40 kA por cada ramal de paneles fotovoltaicos.

4.3.3.2. Equipos de protección de maniobra y seccionamiento

Otros equipos de protección son los de maniobra y seccionamiento que facilitan tareas de mantenimiento, interruptores para desconexión, tierra, fusibles, etc., dispuestos entre diferentes partes del sistema, para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de falla o situaciones de sobrecarga, que sin necesidad de desconectar todo el sistema por completo, de acuerdo con estándares internacionales. (Mesa, Escobar e Hincapié, 2009, p. 328)

Las personas se protegen mediante la utilización de paneles con aislamiento. Debido a que la temperatura ambiente en el interior de las cajas eléctricas donde se alojan las protecciones puede alcanzar fácilmente temperaturas de 60°C, se requiere analizar la corriente en corto circuito de los paneles a esta temperatura, mediante la ecuación, cálculos a realizar durante el desarrollo del proyecto.

$I_{sc}=5.2 \text{ A.}; \text{Coef}(I_{sc})= 0,06 \text{ } \%/^{\circ}\text{C.}; T_i=60^{\circ}\text{C.};$

$$I_{sc}(60^{\circ}\text{C}) = I_{sc} (STC) * (1 + (T_i - 25) * \text{Coef}(I_{sc})/100).$$

4.3.3.3. Puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra debe instalarse a ambos lados del mismo sistema de la para evitar sobretensiones por descargas atmosféricas. La conexión de puesta tierra debe estar de acuerdo con el reglamento que corresponda, las masas del sistema y los equipos receptores, de forma independiente de la del neutro de la red de distribución pública.

4.3.3.4. Cableado

Los cables, tanto del lado del circuito de corriente continua o baja tensión como del circuito de corriente alterna, son de cobre y tienen una sección de 4 a 6 mm²; y los que se usan para conectar las cajas de conexionado al inversor son de aluminio y de mayor calibre. Estos deberán cumplir con la normativa internacional UNE 21-123, según la cual corresponden al tipo RV-K 0,6/1kV, tienen 1000 voltios de aislamiento, resisten a la intemperie, soportan temperaturas extremas y la máxima corriente admisible, cumplen con la resistencia mecánica, y deben evitar una caída de tensión hasta del 1,5 % en el total de la instalación, es decir, el valor máximo de voltaje que puede soportar un cable sin que su aislamiento pierda sus propiedades dieléctricas, la corriente admisible permanente o el valor máximo de la corriente que circula permanentemente por el conductor sin que su temperatura supere la máxima admisible por sus materiales, como se puede observar en la Tabla 4.

Parámetros: la tensión de aislamiento o tensión asignada y la corriente admisible permanente.

Tabla 5. Cables aislados con aislamiento seco

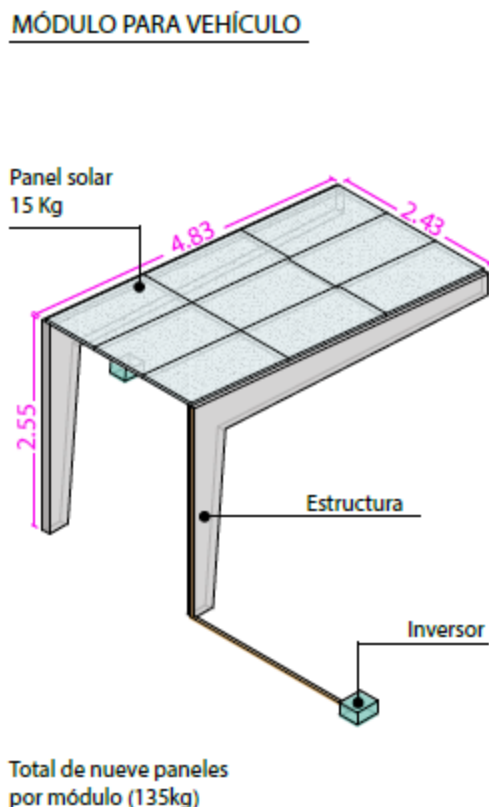
Tipo de aislamiento	Temperatura máxima °C	
	Servicio permanente	Cortocircuito
Policloruro de vinilo (PVC)		
S < 300 mm ²	70	160
S > 300 mm ²	70	140
Polietileno reticulado (XLPE)	90	250
Etileno Propileno (EPR)	90	250

Fuente: elaboración propia, datos norma

Dimensionado del cable, la cantidad máxima soportada por cada rama debe ser igual a 125% de

4.3.4. Estructura de soporte

Figura 17. Estructura soporte paneles solares



Fuente: elaboración propia

En la Figura 17 se muestra la estructura que sirve para fijar adecuadamente los paneles fotovoltaicos; habitualmente están hechas de acero galvanizado o aluminio y son fijas, aunque hoy en día existen otros materiales y es la recomendación para el presente proyecto, construir este soporte en plástico reciclado. Para estas es necesario calcular la inclinación óptima para facilitar las labores de operación y mantenimiento y deberán estar bien ancladas para soportar las cargas máximas producidas por el viento. Si se selecciona una estructura seguidora de un eje esta variara su ángulo durante el día y si es de dos ejes lo hará durante el año para permitir una incidencia más perpendicular con la radiación solar.

4.4. Determinar las necesidades de consumo

El método más sencillo para determinar la carga total del sistema es monitorear el consumo de la potencia de las cargas de los equipos que se quiere energizar durante su tiempo de utilización promedio, lo cual se abordará en las necesidades de consumo a satisfacer, se obtendrá la información con el levantamiento de cargas del sistema solar fotovoltaico, en el desarrollo del proyecto.

4.5. Diseño del sistema solar fotovoltaico de la planta de Ecopetrol en Villeta

El diseño del sistema solar fotovoltaico tiene como prioridad que la energía generada y la energía consumida durante un año coincidan, cuyo objetivo es el retorno rápido de la inversión. En caso de excedentes se podrían aprovechar los beneficios de la Ley 1715 de 2014 y la Resolución 281 de 2015, las cuales definen el límite máximo de autogeneración a pequeña escala, a continuación, se abordarán los diferentes tópicos a los que se refiere el diseño como tal, y en el desarrollo del proyecto se realizarán el procesamiento de datos y el análisis de cálculos puntuales.

4.5.1. Distribución de paneles, orientación e inclinación

En vista de que el sol nace todos los días por el este y se pone por el oeste, los paneles fotovoltaicos deben estar orientados hacia el ecuador, es decir, hacia el sur en latitudes norte, como México, España y Colombia, o hacia el norte en latitudes sur. Los paneles siempre tendrán una inclinación a menos que se esté directamente en el ecuador, por eso calcular la inclinación óptima permite que la radiación solar impacte lo más perpendicular posible durante el día y el año.

4.5.2. Determinar la radiación solar en horas solar pico (HSP)

Existen diferentes tipos de radiación solar: directa, que llega a la superficie de los paneles fotovoltaicos directamente del sol, sin ningún intermediario; difusa, que es modificada por las nubes o las partículas de polvo, al cambiar su dirección y disminuir su potencial energético; y reflejada, que es la procedente de la reflexión de otros elementos como espejos de agua. Además, en horas de la mañana la radiación tiene valores muy bajos, pero crece de manera exponencial hasta alcanzar valores muy cercanos a 1000 w/m^2 hacia el mediodía y vuelve a descender en la tarde.

La irradiancia es la potencia solar recibida por unidad de superficie (w/m^2) y la radiación es la suma de las irradiancias en un tiempo determinado, es decir, la energía recibida por unidad de superficie (wh/m^2). Según sistemas de información geográfica como el PVgis.

4.5.3. Condiciones estándar de medida de los paneles solares

Para permitir la comparación entre diferentes paneles solares fotovoltaicos se han establecido unas condiciones estándar de medida de uso universal:

Tabla 6. Condiciones estándar de medida de los paneles solares

Condiciones Estándar de medida de los paneles Solares	
Irradiancia	1000 w/m^2
Temperatura de trabajo	25°C
Masa de aire	1.5

La masa de aires es la distancia que tiene que recorrer el haz de luz desde el momento que ingresa en la atmósfera hasta que llega a un punto determinado del planeta, es decir, el punto de instalación.

En estas condiciones el panel solar entregará su potencia pico, aunque es muy difícil que se cumplan simultáneamente, por lo cual se presentan pérdidas de energía.

4.5.4. Dimensionamiento del inversor

La potencia nominal del inversor es un 20 % inferior a la potencia de la instalación fotovoltaica, debido a que la potencia pico del generador se alcanza en ocasiones puntuales, lo cual hace que habitualmente los inversores trabajen por debajo del 70% de su potencia máxima y se proporcione un mejor ajuste a la potencia real de funcionamiento del sistema solar fotovoltaico.

4.5.5. Matriz Fotovoltaica

4.5.6. Perdidas y eficiencias del sistema

El *performance ratio* (PR) es un factor de rendimiento que expresa la relación entre el rendimiento real y el rendimiento nominal del sistema solar fotovoltaico; está regulado por la normativa UNE-61724, que sirve para validar los modelos de estimación de producción; es adimensional; y expresa el efecto global de las pérdidas en la salida del sistema, que pueden

deberse al inversor seleccionado, la temperatura de trabajo de los paneles, la suciedad, el acople de los cables, entre otros.

4.6. Evaluación financiera y ambiental del proyecto

Al elaborar un flujo de caja del proyecto, con base en supuestos y estimados, se explican los ingresos y los egresos que se proyectan. A partir de tal diagrama de flujos se determina el VPN y la TIR del proyecto. Con base en eso se establece si el proyecto podría ser viable.

En cuanto a la evaluación de un proyecto de inversión a largo plazo, es relevante determinar el cumplimiento de los objetivos, y entre ellos la maximización de la inversión, entre los más importantes indicadores para evaluar proyectos de inversión son: el VPN o valor presente neto, y que consiste en traer a valor presente todos los flujos de caja del proyecto, para determinar, cuanto se va a ganar o perder, al ser positivo el VPN, nos indica que el valor de la empresa se incrementará en igualdad al monto del VPN, por lo tanto el proyecto es viable.

Para realizar el cálculo se incluye el costo de la inversión inicial más los valores actuales descontados de todos los costos futuros, a lo largo de la vida útil total de la instalación del sistema PV; Se considera que la vida útil del sistema es la vida útil de los módulos fotovoltaicos, que son los elementos que tienen una vida útil más larga, inversión:

- Costo de compra de los inversores y el regulador de carga, cableado, estructura para paneles solares tipo cubierta para parqueadero.
- Costos de reemplazo de los componentes durante la vida útil del sistema, inversores, sistemas de protección, sistemas de monitoreo, transporte e instalación.
- Costos de operación y mantenimiento de componentes a lo largo de la vida útil del sistema PV.

En el desarrollo del proyecto, se aplicará la fórmula para calcular los índices financieros.

$$VPN = -Inversión_0 + \frac{F1}{(1+i)} + \frac{F2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{Fn}{(1+i)^n}$$

Donde:

Inversión 0 = inversión inicial del proyecto

F1 a Fn = flujos de caja del proyecto (año 1 a 22)

4.7. Evaluación ambiental

Huella de carbono. El concepto de la huella de carbono estima las emisiones de CO₂ causadas por la fabricación de módulos fotovoltaicos y las compara con las emisiones de CO₂ debido a la electricidad generada mediante la quema de combustibles fósiles. Un enfoque más analítico observa la energía total requerida para producir los módulos Fotovoltaicos o todos los componentes de un sistema PV. Como los procesos de producción varían considerablemente para las diferentes tecnologías fotovoltaicas, es decir, que el consumo de energía para producir 1 kWp depende de la tecnología empleada. Al realizar una evaluación completa del ciclo de vida se intenta rastrear la huella de energía y carbono de los paneles fotovoltaicos a lo largo de su vida útil.

5 MARCO INSTITUCIONAL

“Cuando decimos que Ecopetrol es ‘de todos para todos’, queremos decir que nuestro talento, liderazgo y capacidades como equipo están al servicio del crecimiento, bienestar y desarrollo del país. Por eso somos energía que transforma a Colombia” (p. 54).

5.1. La organización

Ecopetrol es una sociedad de economía mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al ministerio de Minas y Energía. Es la empresa más grande de Colombia y es una compañía integrada del sector de petróleo y gas, que participa en todos los eslabones de la cadena de hidrocarburos: exploración, producción, refinación y comercialización. (Ecopetrol S.A., 2018, p. 33)

En la Figura 18 se muestra la imagen corporativa de la compañía.

Figura 18. Imagen corporativa Ecopetrol.



Fuente: (Ecopetrol S.A., 2020)

5.2. La estrategia corporativa

La estrategia empresarial de Ecopetrol, aprobada en mayo de 2015 y actualmente vigente, está representada en su misión, visión y marco estratégico (Ecopetrol S. A., 2018).

- Misión:

Trabajamos todos los días para construir un mejor futuro rentable y sostenible, con una operación sana, limpia y segura (barriles limpios), asegurando la excelencia operacional y la transparencia en cada una de nuestras acciones, y construyendo relaciones de mutuo beneficio con los grupos de interés. (Ecopetrol S. A., 2018, p. 35)
- Visión al 2020: “Ecopetrol será una compañía integrada de clase mundial de petróleo y gas, orientada a la generación de valor y sostenibilidad, con foco en exploración y producción, comprometida con su entorno y soportada en su talento humano y la excelencia operacional” (Ecopetrol S. A., 2018, p. 35).
- Estrategia y plan de negocio:

En la Figura 19, se muestra el plan de negocio que se cimienta en tres pilares (crecimiento de reservas y producción, estricta disciplina de capital y protección de la caja y eficiencia en costos) que posibilitan cuatro áreas de crecimiento (campos existentes, exploración en Colombia, no convencionales e internacionalización). (Ecopetrol S. A., 2014, párr. 9)

Figura 19. Marco estratégico Ecopetrol 2020.



Fuente: (Ecopetrol S. A., 2014)

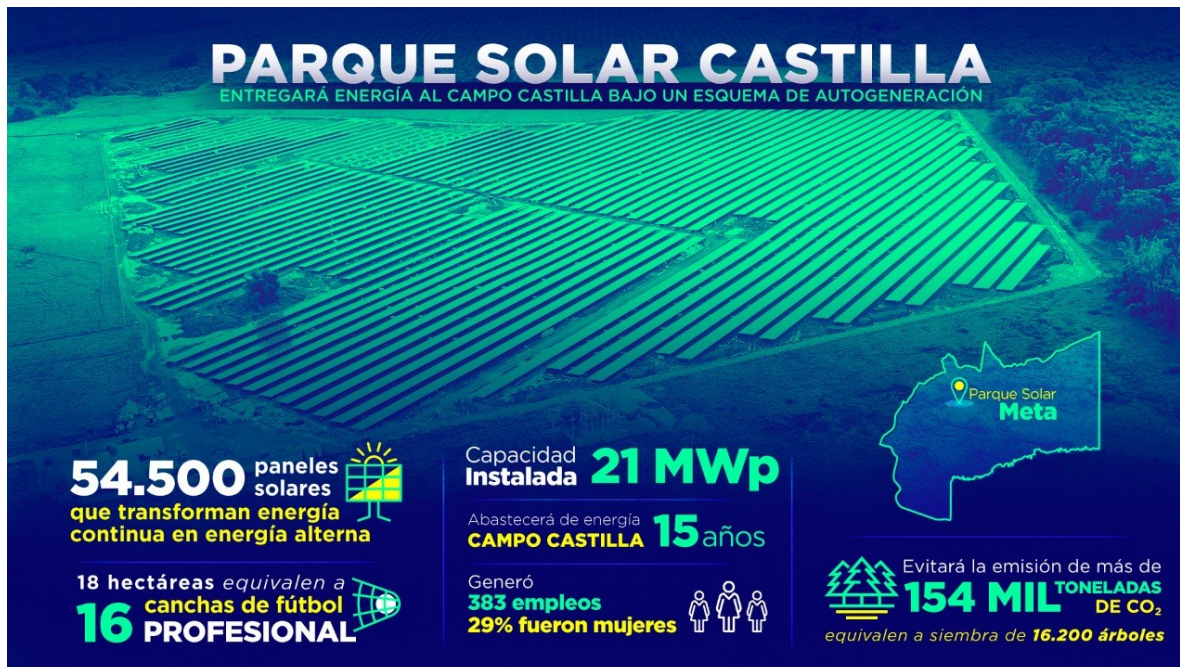
5.3. Transición energética

En materia de energías renovables, específicamente en el campo solar fotovoltaico, en octubre de 2019 Ecopetrol inició la operación del parque solar de autogeneración de energía en el municipio de Castilla La Nueva, en el departamento del Meta, Colombia. Se trata de la segunda instalación más grande de su estilo en el país, la cual requirió inversiones por unos USD 20 millones.

Asimismo:

En la Figura 20 se muestra el parque solar Castilla, que cuenta con una extensión de 18 hectáreas, donde están ubicados más de 54 500 paneles de la más alta tecnología. Con su entrada en operación se evitará la emisión de más de 154 mil toneladas de CO₂ (dióxido de carbono) a la atmósfera, cifra que equivale a la siembra de 16.200 árboles.

Figura 20. Parque solar Castilla.



Fuente: (Ecopetrol S. A., 2019)

El Parque Solar Castilla es un primer paso hacia la transición energética en materia de energías renovables y hace parte del plan de la compañía para fortalecer el desarrollo de proyectos de energía renovable y para aportar a la diversificación del su portafolio energético. Al respecto se ha dicho:

‘La incursión en proyectos de gran escala de energía solar marca un hito en la historia de Ecopetrol, que se adiciona a otros desarrollos para contar con una matriz energética más diversificada y limpia, que contribuya a la protección del medio ambiente y a garantizar la seguridad energética de Colombia. La apuesta por las energías renovables convertiría al Grupo Ecopetrol en uno de los principales generadores de energía solar del país’, afirmó Felipe Bayón, presidente de Ecopetrol. (Téllez, 2018, párr. 1)

Los proyectos de transición energética en materia de energías renovables encajan en la estrategia 2020+ de la compañía, en el eje estratégico de “Protección de la caja y eficiencia en costos”, puesto que la energía es el segundo costo más alto de Ecopetrol, después de la dilución. El plan integral de eficiencia energética, además de reducir el impacto ambiental asociado al consumo de este recurso, representa beneficios potenciales por 30 mil millones de pesos para el

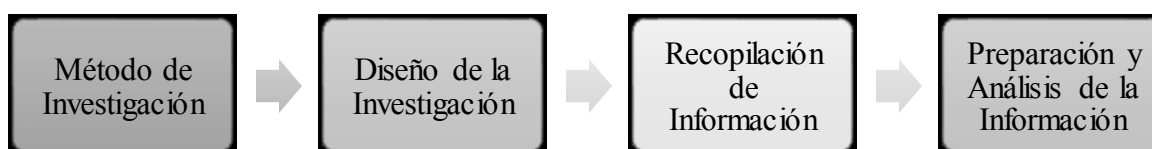
periodo 2017-2020, aunque en el 2018 no se realizaron gastos en I+D (investigación y desarrollo) de energías renovables (Ecopetrol S. A., 2018).

6 DISEÑO METODOLÓGICO

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema. En este sentido, el objetivo principal del diseño metodológico es ilustrar el esquema o programa que se seguirá para realizar un proyecto de investigación, en el cual se especifican los detalles de los procesos y procedimientos que son necesarios para obtener la información requerida para estructurar y resolver el problema de investigación (Malhotra, 2008).

Por lo tanto, el diseño metodológico da una visión acerca de cómo se realizó el trabajo, así como por qué y de qué forma se eligió un método específico. La estructura metodológica ilustrada en la Figura 21, muestra cómo serán alcanzados cada uno de los objetivos específicos propuestos en el presente trabajo.

Figura 21. Estructura metodológica de la investigación.



Fuente: elaboración propia

6.1. Método de investigación

Según Bernal (2010) una investigación tiene una justificación práctica o aplicada cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema o, por lo menos, propone estrategias que al aplicarse contribuirían a resolverlo. Desde esta perspectiva, el enfoque de esta investigación se orienta hacia la resolución de un problema a través de la presentación de una propuesta de diseño de un prototipo de un sistema de autogeneración de energía eléctrica por medio de una planta solar fotovoltaica. Por lo tanto, cada uno de los objetivos específicos abordan la solución del problema (p. 106).

Igualmente, la investigación es de tipo descriptivo. Para esto se van a utilizar datos que serán tratados en el sistema PVsyst⁵ que permitirán hacer un predimensionamiento del prototipo. Es importante anotar que la ventaja de utilizar PVsyst es que se pueden hacer cuantas simulaciones se quiera hasta obtener los resultados satisfactorios para el diseño.

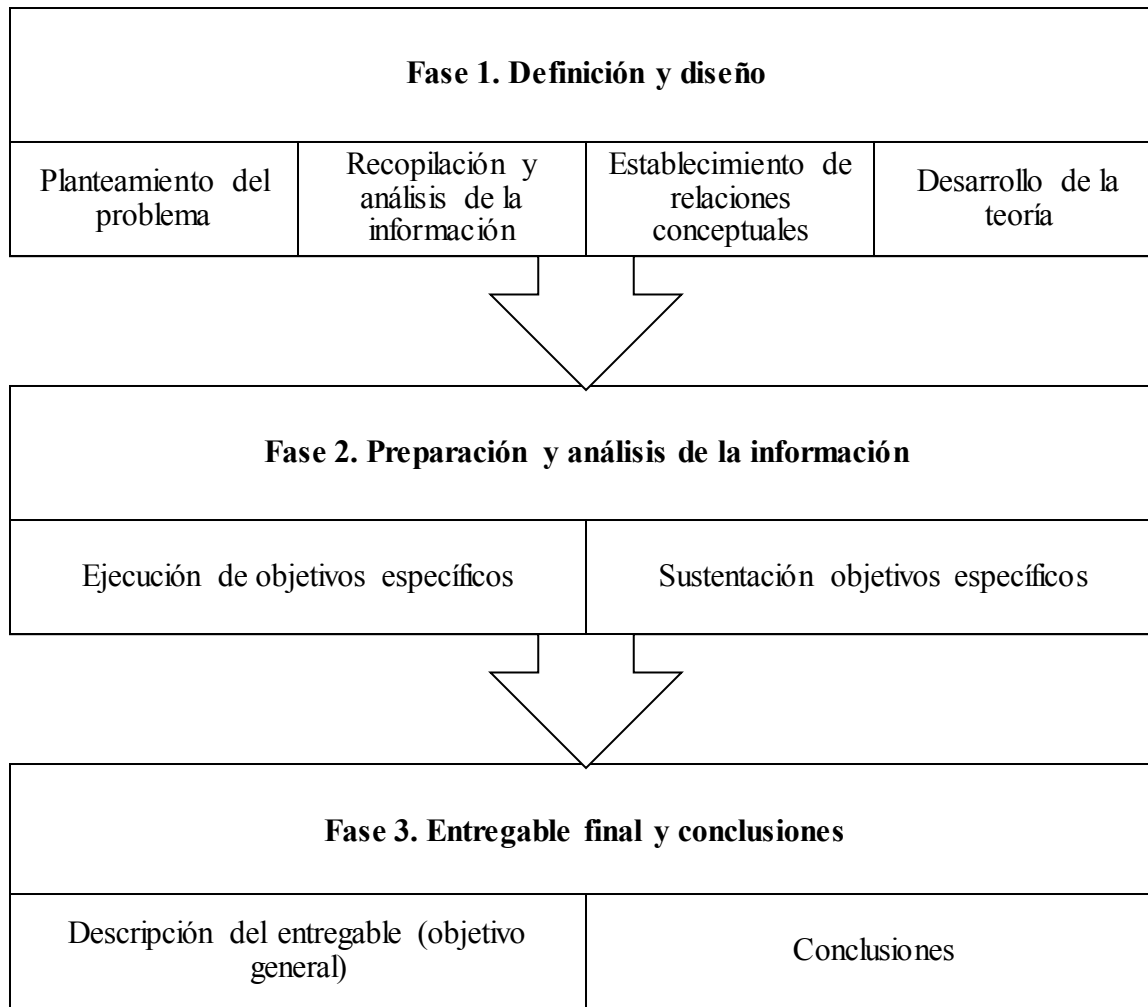
6.2. Diseño de la investigación

La ventaja de la investigación aplicada es propende a la solución de un problema específico en un contexto determinado, es decir, busca aplicar o utilizar los conocimientos, de una o varias áreas especializadas, para satisfacer las necesidades concretas de un sector. La Figura 22 representa a nivel general el desarrollo del trabajo e ilustra los componentes o fases de este que permitirán el logro de los objetivos.

Para la definición de la información necesaria para el diseño de los sistemas fotovoltaicos se puede utilizar un *software* como PVsyst. Según dicha información se logra diseñar un sistema más eficiente, pues es posible analizar las cargas eléctricas; monitorear los equipos, las horas de trabajo, la ubicación geográfica, y la irradiancia de la zona; y hacer el cálculo de los paneles e inversores necesarios, así como de las cargas y las capacidades de los equipos. En este caso el sistema que se propone está integrado a la red, y pretende obtener ahorros por menores tarifas de consumo y proteger los equipos de la planta por posibles fallas debidas a cortes o picos de suministro por parte de la empresa de servicio de energía de la zona.

⁵ PVsyst es un programa de ordenador ampliamente utilizado para el diseño de instalaciones fotovoltaicas. Este programa posee una amplia base de datos de los principales componentes usados en una instalación del mercado internacional y por si eso no fuera suficiente se pueden añadir nuevos.

Figura 22. Diseño de la investigación.



Fuente: elaboración propia

6.3. Recopilación de información

Para la recolección de la información es necesario dividir la investigación en fases, puesto que según lo que se esté trabajando esta tiene un trato diferente. Es relevante empezar por mencionar que la planta funciona 24/7, y que su función es abastecer de combustibles a la ciudad de Bogotá, incluida el área de la aviación, Transmilenio, y los vehículos de carga y pasajeros. Por lo tanto, es parte de un sistema estratégico y esencial para el desarrollo del país.

La primera fase consiste en saber las necesidades de la planta, por lo cual fue necesario realizar un estudio de las cargas que se generan en las diferentes oficinas de la planta, con base en los datos técnicos obtenidos de valores nominales del consumo de los equipos a los cuales se les va a suministrar energía con el sistema de energía solar fotovoltaica propuesto, sobre todo el

de iluminación y de aire acondicionado. Además, se consultó con el ingeniero en sitio sobre la potencia que se necesita en la planta tanto por horas como por meses y por año.

Luego, fue necesario tener claridad sobre los elementos tecnológicos que se tienen a la mano y aquellos que se pueden adquirir en el mercado para diseñar el prototipo. A su vez, se debe considerar la disponibilidad y el costo de la mano de obra calificada para llevar a cabo la implementación de este. Así se dimensiona el proyecto para hacer el cálculo del consumo energético en costo y evidenciar el ahorro y el posible aprovechamiento de este como generador de energía. Es importante tener en cuenta no solo los costos del diseño, la instalación y la implementación, sino también los del mantenimiento correctivo y preventivo, y también del cambio de partes y de equipos.

7 DESARROLLO DEL PROYECTO

7.1. Diagnóstico

La planta de Ecopetrol-Villeta no es ajena a los cortes de energía por parte de la empresa prestadora del servicio, por mantenimiento, o debidos a atentados, o cualquier otra causa interna o externa, razón por la cual es importante contar con un sistema de energía solar fotovoltaica, que suministre energía eléctrica al área de operaciones y oficinas de la planta, sirva de respaldo y además aprovechar los paneles solares disponibles en otras instalaciones de la empresa.

El sistema a diseñar es un sistema conectado a red, y se proyecta su instalación sobre unas cubiertas para el parqueadero de la planta, con lo cual se obtendrá un beneficio adicional, que es la protección de las personas que transitan por allí y los vehículos que se parquean en esta área, y que en condiciones normales tienen que soportar altas temperaturas por exponerse a los rayos del sol de manera directa, y puede producir un cáncer de piel a las personas y a los vehículos un deterioro acelerado.

El objetivo del diagnóstico a realizar es reflejar las necesidades de energía a satisfacer, para con base en esta información realizar el diseño con el cual se logre suplir la demanda de energía a un costo relativamente bajo, bajo unos parámetros de calidad, con la posibilidad de entregar a la red los excedentes que eventualmente podrían presentarse, estableciendo una estrategia de ahorro, teniendo en cuenta que no existen elementos que produzcan sombras, y aprovechar al máximo la energía generada.

7.1.1. Trabajo de Campo

El trabajo de campo de recopilación y análisis de los datos lo hizo un ingeniero. Estos datos se deben tabular, revisar y de ser necesario corregir para ajustarlos a los valores teóricos y prácticos que permitan tener unos cálculos lo más reales posibles. Es necesario obtener los datos de los consumos energéticos de acuerdo con la tecnología de los equipos, por ejemplo, la potencia en vatios/hora para relacionar las bondades del sistema, así como de la radiación solar en la zona geográfica.

Con la ayuda del software PVsyst, una herramienta útil para desarrollar el modelamiento y analizar el desempeño de las instalaciones fotovoltaicas, se hizo la simulación y el análisis de los datos para dimensionar la infraestructura de las instalaciones, y, con base en la radiación solar y las situaciones de proyección de sombras de acuerdo con el movimiento del sol durante el día, se definió la ubicación del proyecto. El PVSyst se basa en un procedimiento en el cual se

especifica la potencia deseada o el área disponible y se eligen el módulo fotovoltaico y el inversor de la base de datos interna para que el sistema proponga una configuración de matriz/sistema que le permite realizar una simulación preliminar.

El programa brinda la oportunidad de realizar un predimensionamiento del proyecto, por eso considera si el sistema está en una zona interconectada o no, también con ayuda de su cartografía se identifican las condiciones geográficas y geológicas del lugar, y además se solicitan los datos del inversor y el tipo de inclinación. Este simulador ofrece varios resultados dentro de los cuales cabe mencionar la cantidad de energía a nivel global del panel que se estudia, para lo cual se tienen en consideración parámetros como la inclinación, que debe ser de 30 grados y se compara con un panel de características iguales, pero con un grado de inclinación de 0.

Así mismo, se cuenta con información sobre la radiación solar global horizontal, la cual se obtiene al comparar la radiación global con el plano inclinado global seleccionado. Igualmente, se conoce la salida de energía promedio durante el año. Sumado a esto, se obtiene la potencia nominal en una tabla de resultados donde se aprecian los valores mes a mes y la eficiencia de los dos sistemas, el general cuando es global horizontal y el plano seleccionado. Según dichos valores tiene mayores salidas energéticas el sistema de plano inclinado que el sistema de salida global horizontal.

7.1.2. Recolección de datos para determinar las necesidades de energía a satisfacer

El proyecto comprende la elaboración de un estudio de consumo energético para poder determinar la mejor alternativa de utilización de los paneles existentes. Con el fin de aprovechar al máximo la energía generada, se realizó un análisis de las cargas que se deben alimentar, para el cual se tomaron los tiempos y se definieron las características de los equipos de las diferentes áreas de la planta (ver Tabla 7). Se enlistaron los equipos que se van a energizar, que están relacionados con la iluminación y el confort o aire acondicionado, y así se definió el consumo total por año (kW-h).

Tabla 7. Relación de carga por suplir en las instalaciones de la planta Ecopetrol

Bodega de materiales							
Equipo	Cantidad	Potencia unidad (W)	Potencia total por hora	Horas /día	Días /mes	Consumo /mes (kW-h)	Consumo /año (kW-h)
Lámparas	6	160	960	8	20	153.6	1.843,20
Lámparas	4	60	240	8	20	38.4	460.8
Total bodega							2.304,00

Cuarto de control							
Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total por hora	Horas /día	Días /mes	Consumo /mes (kW-h)	Consumo /año (kW-h)
Lámparas	17	15	255	8	20	40.8	489.6
Lámparas	13	64	832	8	20	133.12	1597.44
AA	2	5280	10560	8	20	1689.600	15000
Total, cuarto de control							17.087,04

CMT (Centro de Media Tensión)							
Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total por hora	Horas /día	Días /mes	Consumo /mes (kW-h)	Consumo /año (kW-h)
Lámparas	6	64	384	8	20	61.44	737.28
Total, CMT							737.23

Oficinas administrativas							
Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total por hora	Horas /día	Días /mes	Consumo /mes (kW-h)	Consumo /año (kW-h)
Lámparas	4	64	256	8	20	40.96	491.52
Total, oficinas administrativas							491.52

Oficinas técnicas							
Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total por hora	Horas /día	Días /mes	Consumo /mes (kW-h)	Consumo /año (kW-h)
Lámparas	4	64	256	8	20	40.96	491.52
Total, oficinas técnicas							491.52

Tabla 7. Relación de carga por suplir en las instalaciones de la planta Ecopetrol (continuación).

Cuarto de cargadores y UPS							
Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total por hora	Horas	Días	Consumo	Consumo
				/día	/mes	/mes (kW-h)	/año (kW-h)
Lámparas	2	64	128	3	20	7.68	92.16
Lámparas	4	15	60	3	20	3.6	43.2
Total, cuarto UPS							135.36

Consumo total kWh / año	21.246,72
--------------------------------	------------------

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los consumos de los principales sitios de la planta; el objetivo es generar la misma energía con los paneles solares para aprovechar las herramientas existentes y disponibles de la planta y reducir la dependencia en servicios públicos que tiene la empresa. Además, habría preparación para los cortes de energía que son perjudiciales para el buen desempeño de las labores de la planta.

7.2. Tipología planteada para el proyecto

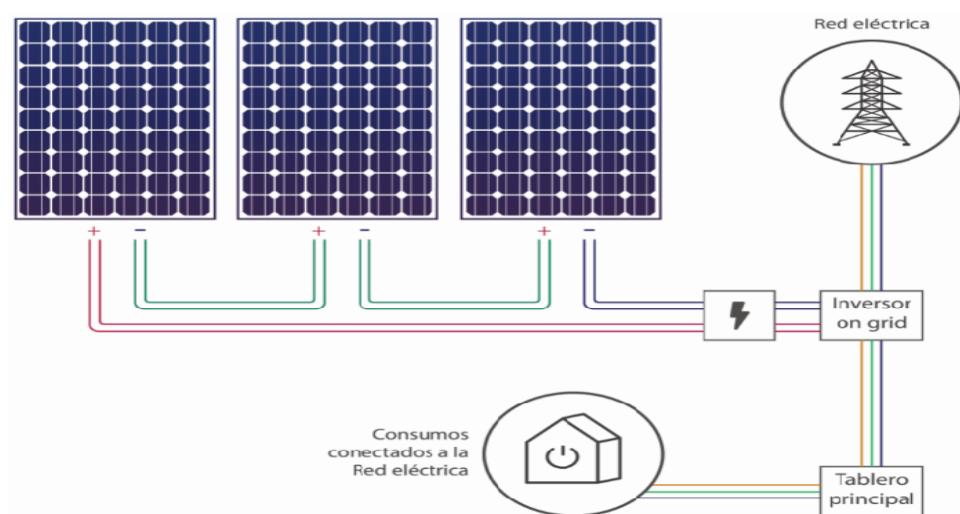
Dado que este proyecto de investigación tiene como objetivo realizar el diseño de una planta de energía solar fotovoltaica, tras el análisis de los diferentes sistemas existentes se determinó que el sistema que se utilizará es aquel conectado a la red o llamado *on-grid*, como se muestra en la Figura 23. Lo anterior puesto que este es la mejor alternativa por su rendimiento, bajo costo, menores requerimientos de mantenimiento y posibilidad de autoconsumo, y que los paneles solares ya están disponibles en la planta de Ecopetrol de Villeta.

Adicionalmente, esta tipología de sistema no requiere incorporar equipos de acumulación como las baterías, que hacen que sea más costoso, pues tienen una vida útil corta (2 a 5 años) y necesitan un mantenimiento especializado y riguroso, un espacio físico con aire acondicionado para su protección, y equipos de monitoreo. Al no requerir de lo anterior, el costo del sistema es mucho menor, lo cual facilita la aprobación del presupuesto, y permite un desarrollo por etapas.

Sin embargo, en caso de generar una mayor energía de la que se consume, y de contar con nuevas tecnologías en baterías, cuya vida útil sea más favorable y sean más económicas, se puede contemplar la posibilidad de incorporarlas al sistema.

A diferencia de estos, los sistemas *off-grid* son especiales para zonas no interconectadas, es decir, que se encuentran a grandes distancias de los centros de consumo. Estas zonas se denominan parques solares. En Colombia se pueden poner como ejemplo La Guajira, los Llanos Orientales, Putumayo y otras regiones donde la interconexión se dificulta, pero de las cuales se espera un gran desarrollo, con inversión extranjera, que impulse el auge de las energías limpias.

Figura 23. Ejemplo sistema solar fotovoltaico on-grid.



Fuente: elaboración propia

7.2.1. Componentes tecnológicos

7.2.1.1. Módulos fotovoltaicos de la marca Solar World SW 165

Actualmente se cuenta con 80 paneles de este tipo en la sede de Ecopetrol de Villeta, por lo cual el costo de inversión para estos equipos sería 0. Este modelo es monocromático, de fabricación completamente automatizada, y es único en su tipo. Tiene una alta precisión y un diseño homogéneo, con células monocristalinas incorporadas en una lámina transparente de EVA (Acetato de Vinilo – Etileno) y protegidas por una cubierta de vidrio reforzado. En la parte posterior, que está sellada con una lámina de Tedlar, se encuentra su caja de conexión, la cual es plana y compacta. Sus especificaciones técnicas son:

Tabla 8. Especificaciones técnicas paneles solares

Especificaciones técnicas paneles solares - Comportamiento bajo condiciones estándar	
Especificación	Valor
Largo	1610 mm.
Ancho	810 mm.
Peso	15 kg.
Pmax(Punto de máxima potencia)	165 W.
Vmpp (Tensión a potencia máxima)	32.7 V.
Imp(Corriente a potencia máxima)	3.8 A.
Voc (Tensión a circuito abierto)	40.9 V
Isc (Corriente de corto circuito)	4.2 A.

Fuente: elaboración propia

Figura 24. Paneles solares existentes en la planta de Ecopetrol de Villeta.



Fuente: elaboración propia, fotografía de la placa de datos de los paneles solares

7.2.1.2. Inversor

Como se muestra en la Figura 25, un ejemplo de un inversor, y de acuerdo con el número de paneles que se instalarán y de la potencia total del sistema solar fotovoltaico, se plantea la instalación de inversores con las características:

- Tensión nominal: 595 V.
- Potencia nominal: 3000 W cada uno.

La cantidad de inversores y sus entradas se definirán realizando los respectivos cálculos en el diseño del sistema solar fotovoltaico, para mayor información de sus especificaciones se puede consultar el anexo 2 del presente documento.

Figura 25. Ejemplo de inversor de corriente.



Fuente: página oficial de Sunny Island.

7.2.1.3. Cajas de conexionado

Estas facilitan las actividades de operación y mantenimiento, protegen al inversor contra la sobreintensidad, facilitan la interconexión del SFV y el inversor, y son usadas en sistemas de baja producción energética. Es importante resaltar que los paneles deben estar en serie, se debe tener cuidado pues en caso de que un panel se encuentre en mal estado, producirá un efecto en la energía que entrega el sistema, la cual se verá disminuida.

Tabla 9. Proyección de energía por generar

Equipo	Cantidad	(W)	Horas sol pico /día	Potencia pico por generar (kW)	Producción ideal de energía (kWh/día)	Días /mes	Producción mensual esperada de energía (kWh/mes)	Producción anual(ideal) esperada de energía (kWh/año)
Paneles solares	80	165	4.5	13,200	59,4	30	1782	21384

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 9 se muestra la información acerca de la energía que es posible generar con los paneles solares existentes con base en las HSP de la ubicación del sistema solar fotovoltaico en la planta de Ecopetrol de Villeta. Para el ejercicio propuesto es clave saber que la energía que se va a generar está a la par con la que se necesita para las áreas que se desean cubrir para así asegurar el consumo, la eficiencia y el buen funcionamiento de la planta de energía solar fotovoltaica, que es el objetivo principal de este proyecto.

7.3. Diseño de la propuesta del sistema solar fotovoltaico

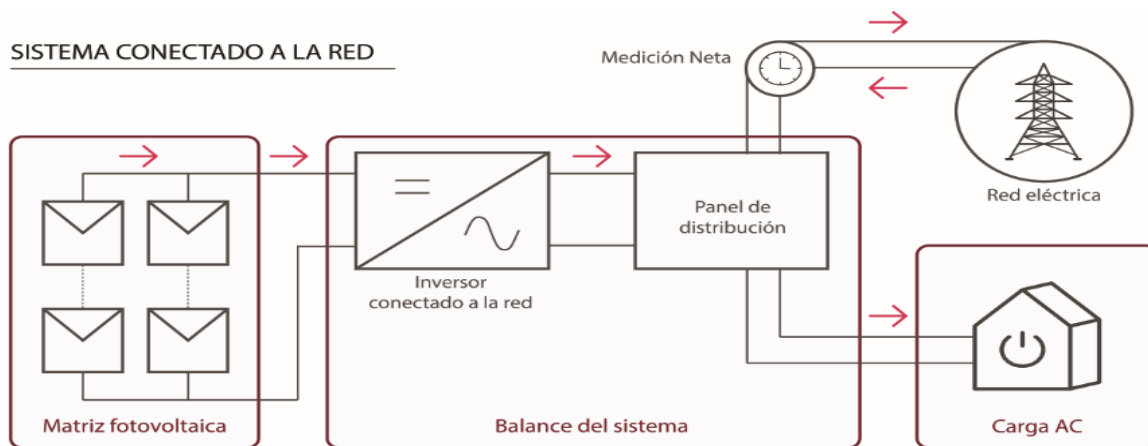
Figura 26. Infografía Sistema Solar Fotovoltaico Planta Villeta.



Fuente: Ecopetrol- Planta Villeta

En la Figura 26 se muestra una panorámica de la planta Ecopetrol Villeta, objeto del presente proyecto, plasmando la información pertinente al proyecto y sus características generales.

Figura 27. Diseño sistema solar fotovoltaico conectado a la red.



Fuente: elaboración propia

En la Figura 27 se muestra un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. En esta se ve el arreglo de los paneles solares que forman la matriz fotovoltaica, la cual está conectada al inversor que conecta al panel de distribución, cuya función alimentar la carga. En el caso de que esta no sea suficiente, la red eléctrica suministrará la energía que no sea capaz de entregar la instalación fotovoltaica, y en caso de que la producción de energía del sistema solar fotovoltaico exceda el consumo, el panel de distribución se encargara de entregar los excedentes a la red, por lo que de esta forma se percibirán unos ingresos.

Por tanto, es necesario un contador de energía eléctrica bidireccional que será el encargado de contabilizar el flujo de energía que se entrega a la red eléctrica. Dado que hay instalaciones donde se evita la entrega de energía a la red, estas instalaciones deben anular el sistema de anti vertido y convenir con la empresa que suministra la energía un pago por la energía vertida a la red.

En la Tabla 10 se documentan los parámetros que se deben tener en cuenta para el diseño, es decir, la potencia del sistema, los datos de la localidad, el voltaje de equipos, el número de paneles solares, la potencia del inversor y la separación entre paneles para garantizar la expansión térmica.

Tabla 10. Parámetros de diseño

Parámetros de diseño		
Parámetro	Descripción	Unidad
Potencia del sistema	20995	Kwh/año
Localidad	Villeta	
Latitud	5	grados
Tipo de terreno	Horizontal	
Paneles solares	81	unidades
Voltaje de equipos	715	V
Tipo de instalación	2V	
Potencia del inversor	3000	W
Separación entre paneles (expansión térmica)	5	Cm

Fuente: elaboración propia

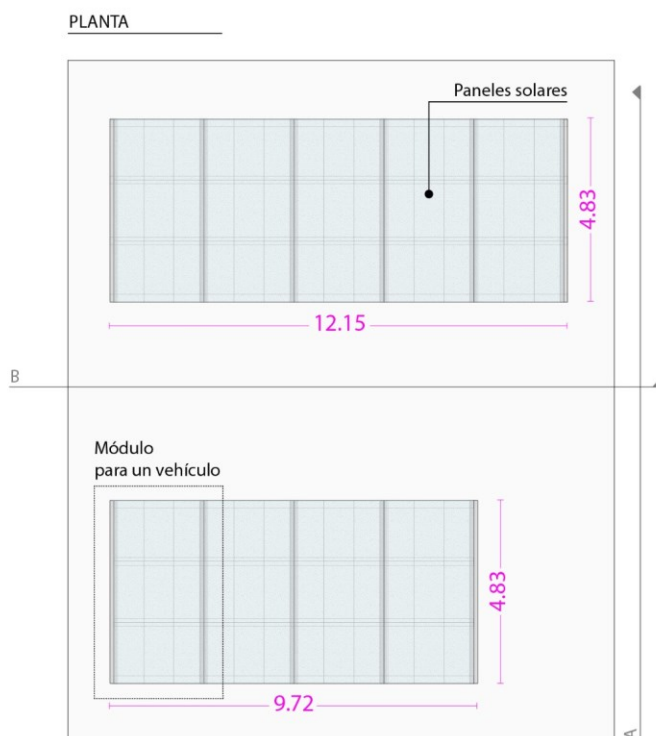
7.3.1. Matriz fotovoltaica

7.3.1.1. Determinar la carga anual

Como se estableció en el numeral 8.3 dicha carga es de 21246 kwh/año para la energización de la iluminación y los equipos de aire acondicionado o confort de las diferentes áreas de la planta de Ecopetrol de Villeta.

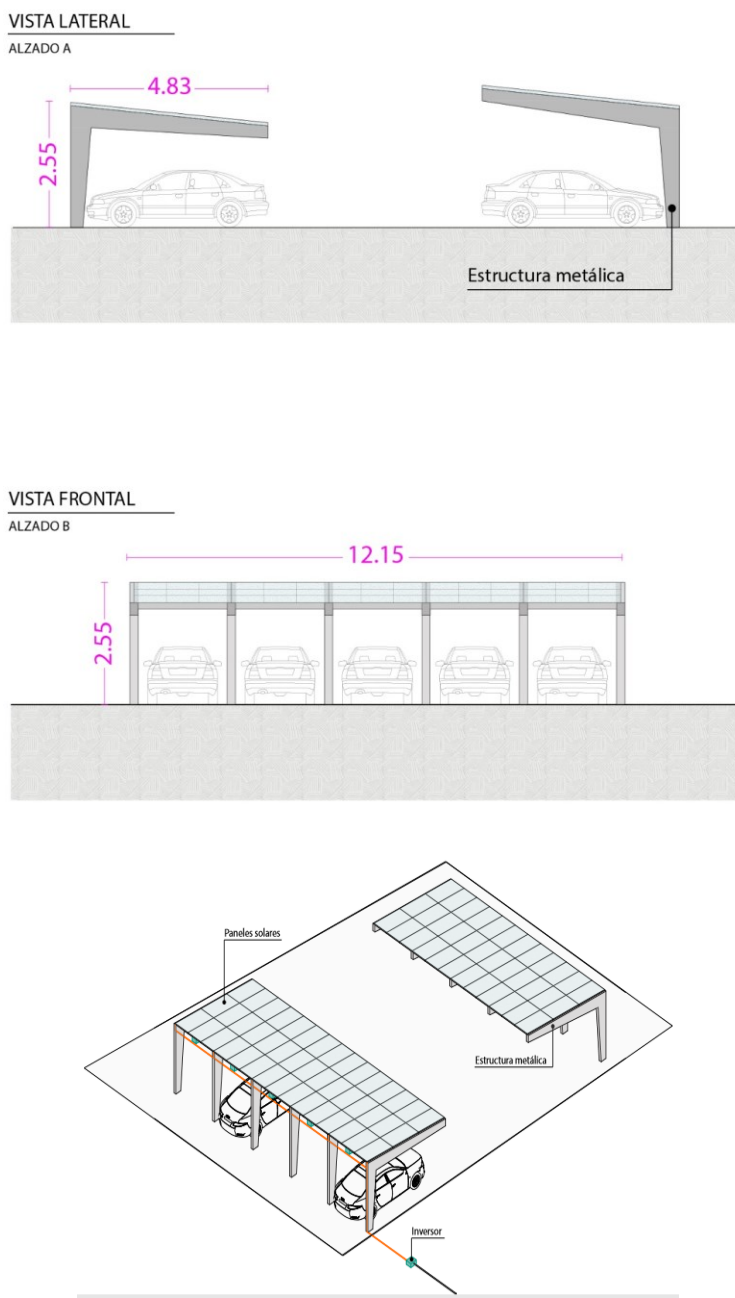
7.3.1.2. Distribución de paneles, orientación e inclinación

Figura 28. Área de parqueadero de Ecopetrol, Villeta y distribución de los paneles.



Fuente: elaboración propia

Figura 29. Vista frontal, y axonométrica de la estructura del sistema solar fotovoltaico.



Fuente: elaboración propia

En las Figuras 28 y 29 se muestra una vista frontal y axonométrica de la estructura del sistema solar fotovoltaico en el parqueadero de la planta Ecopetrol Villeta, cuya información se debe

considerar respecto a la ubicación de los paneles en el municipio de Villeta, como se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11. Coordenadas geográficas Villeta

Coordenadas Geográficas Villeta	
Coordenada	Valor
Latitud	5.017
Longitud	(-74.467 5°1'1" Norte, 74° 28'1" Oeste)
Superficie	14200 hectáreas
Altitud	799 m.

Fuente: elaboración propia con base en datos PVGIS

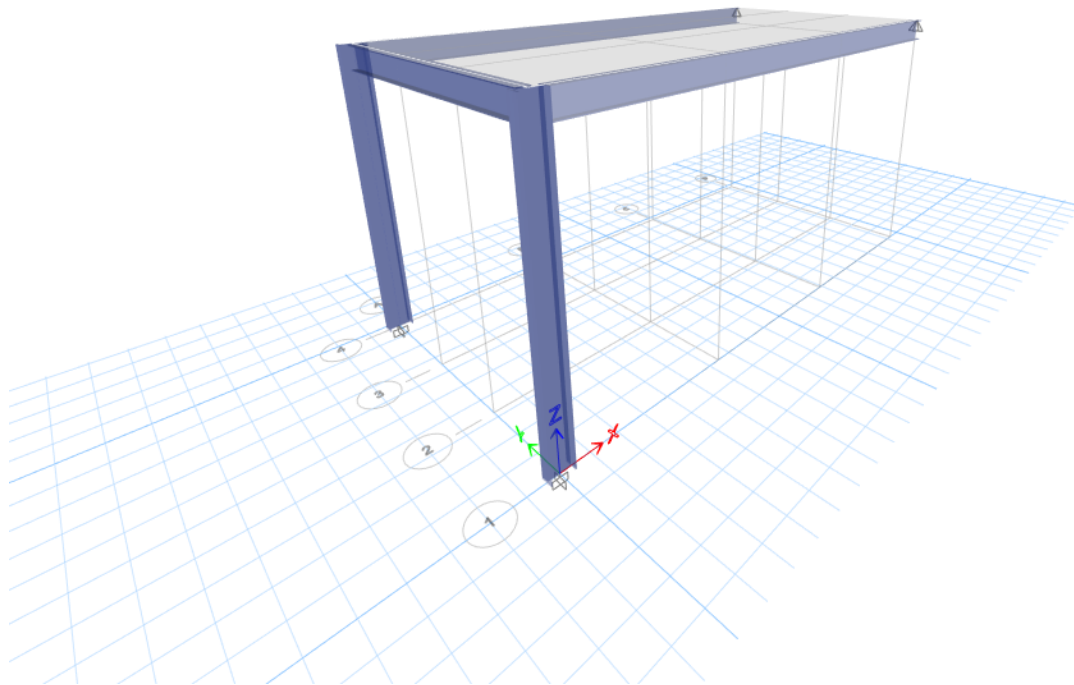
- **Inclinación:** con base en la ecuación: $B = 3.7 + .69 * 5.017$; $B = 7,1$, aunque el resultado es 7.1° , el ángulo mínimo de inclinación debe ser de 15° para facilitar las labores de mantenimiento y el drenaje de aguas lluvias.
- **Área por utilizar:** aproximadamente 100 m^2 , ubicada en el parqueadero, como se puede observar en la Figura 29, además de generar la energía eléctrica, servirán para cubrir la necesidad de generar sombra para las personas y los vehículos que allí se ubican.

7.3.1.3. Diseño de perfiles de acero en cubierta verde

Modelo estructural

El modelo estructural se realiza en el programa de análisis y diseño estructural ETABS. Las cargas y especificaciones en el modelo se llevan a cabo siguiendo las condiciones establecidas en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Se realiza en modelo estructural siguiendo el método de análisis directo establecido en el título F.2.3.2 de la NSR-10. Haciendo uso de análisis de segundo orden, uso de caras ficticias para representar las imperfecciones, reducción de rigidez, entre otras consideraciones.



a. Cargas en el modelo

i. Cargas muertas, D

Las cargas a las que sería sometida la cubierta corresponden a 9 paneles solares de 15kg cada uno, para un total de 135kg en un área aproximada de 11.74m².

(Peso de todos los paneles dividido por el área) $D=0.115 \text{ kN/m}^2$

ii. Cargas vivas, L

Las cargas vivas se determinan de acuerdo con el capítulo B.4 de la NSR-10. Para cubiertas con acceso totalmente limitado al personal de mantenimiento la carga viva corresponde a 1.80 kN/m².

$L= 1.80\text{kN/m}^2$ (Por norma.)

iii. Combinaciones de carga

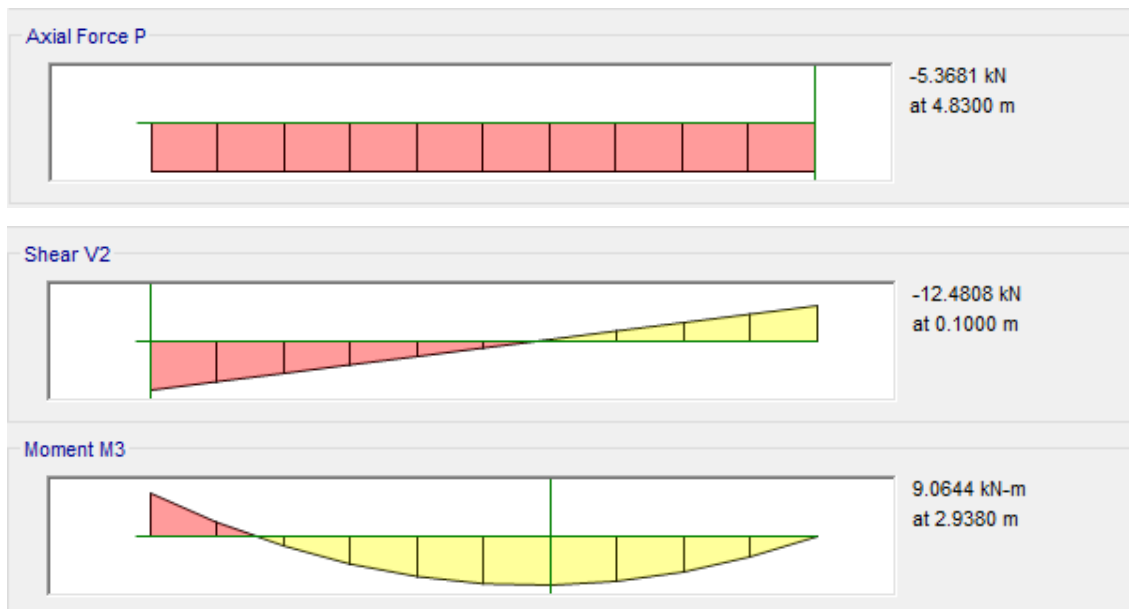
Se hace uso de las siguientes combinaciones de carga de acuerdo con el capítulo B.2.4.2 de la norma.

- 1.4D
- 1.2D + 1.6L
- 1.2D + 1.0L

b. Solicitaciones obtenidas en vigas y columnas (axiales, momentos y cortantes)

Solicitaciones en vigas

Las vigas estarán sometidas a esfuerzos de compresión (fuerzas axiales, *axial force P*), flexión (momentos, *momento M3*) y cortante (*shear V2*), con las cuales será posible realizar el diseño de estas.



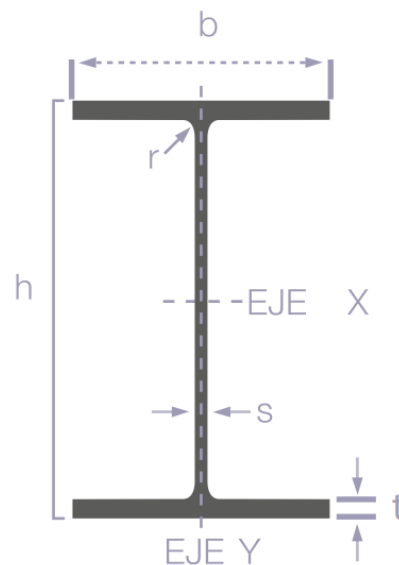
Solicitaciones en columnas

Las columnas estarán sometidas a esfuerzos de compresión (fuerzas axiales, *axial force P*), flexión (momentos, *momento M3*) y cortante (*shear V2*), con las cuales será posible realizar el diseño de estas.

Diseño de vigas y columnas

De acuerdo con la NSR-10, para estructuras de un solo nivel en pórticos de acero estructural, el diseño debe llevarse a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en el capítulo F.2 de la norma. Los elementos estructurales (vigas y columnas) deben ser capaces de resistir las solicitaciones de compresión, flexión y cortante a las que serán sometidas. En este caso, las cargas corresponden a paneles solares de 15kg cada uno, lo que no representa una carga considerable en la estructura.

Al realizar el diseño de la estructura siguiendo las pautas de la NSR-10, se determina que es posible implementar en la estructura de cubierta, vigas y columnas en perfil laminado en caliente con sección transversal en "I", de alas paralelas, de amplio uso en construcción e industria. Sin embargo, en el mercado existe un amplio catálogo de secciones en "I", por lo que al consultar qué tipo de perfiles laminados en caliente pueden encontrarse en el mercado colombiano, encontrando que es posible adquirir perfiles europeos tipo IPE (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Donde h es la altura total del perfil, s es el espesor del alma del perfil, b es la longitud del ala del perfil, t es el espesor del ala y r es el radio de la curva entre el alma y el ala.

De acuerdo con lo obtenido en el diseño, se debe implementar como mínimo vigas y columnas en perfil laminado en caliente tipo IPE160, fabricadas con acero estructural ASTM A572 Grado 50 de resistencia a fluencia de 3500 kg/cm², y cuyas dimensiones se encuentran la **¡Error! No se e**

ncuentra el origen de la referencia., ya depende del constructor si desea implementar perfiles de mayor sección, como lo son los perfiles IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, IPE270, IPE300, IPE330, IPE360, IPE400, IPE450, IPE500, IPE550 e IPE600 (cuyas dimensiones se pueden consultar en la tabla anexa al final). Este tipo de perfil es el más adecuado para obtener estructuras más livianas, un mayor rendimiento y menor tiempo de construcción, una mayor resistencia, y dado a su geometría, permite tener excelentes acabados arquitectónicos como elemento a la vista.

Designación	Dimensiones (mm)					Peso (kg/m)	Área (cm ²)
	Altura		Ala		Dist. r		
	h	s	b	t			
IPE160	160	5.0	82	7.4	9	15.8	20.10

A continuación, se especifica qué resistencia a compresión, flexión y cortante aporta el perfil IPE160 y a qué sollicitación estará sometida:

Vigas:

- El perfil IPE160 con longitud de 4.83m brinda una resistencia a compresión de 4500 kg, mayor que los 537kg a los que estaría sometido.
- El perfil IPE160 con longitud de 4.83m brinda una resistencia a flexión de 1391kg-m, mayor que los 906kg-m a los que estaría sometido.
- El perfil IPE160 brinda una resistencia a cortante de 16800kg, mayor que los 1248kg a los que estaría sometido.

Columnas:

- El perfil IPE160 con longitud de 2.35m brinda una resistencia a compresión de 19200 kg, mayor que los 1382kg a los que estaría sometido.
- El perfil IPE160 con longitud de 2.35m brinda una resistencia a flexión de 3902kg-m, mayor que los 817kg-m a los que estaría sometido.

El perfil IPE160 brinda una resistencia a cortante de 16800kg, mayor que los 529kg a los que estaría sometido.

7.3.1.4. Determinar la radiación solar en horas solar pico (HSP)

Tabla 12. Datos PVGIS irradiancia y temperatura Villeta.

Año	Mes	Irradiancia mensual	Días del mes	Irradiancia diaria kwh/m ²	Temperatura Promedio °C
2014	En	183,97	30	6,13	23.6
2014	Feb	149,54	30	4,98	22.9
2014	Mar	174,03	30	5,80	23.0
2014	Abr	154,82	30	5,16	23.0
2014	May	148,70	30	4,96	22.8
2014	Jun	133,55	30	4,45	22.8
2014	Jul	144,91	30	4,83	22.9
2014	Ag	148,22	30	4,94	22.7
2014	Sep	152,35	30	5,08	23.0
2014	Oct	156,37	30	5,21	22.4
2014	Nov	171,24	30	5,71	22.3
2014	Dic	188,79	30	6,29	22.1

Fuente: elaboración propia, datos PVGIS

En la Tabla 12 se muestra la información de irradiancia, información tomada de Geographical Information System (PVGIS) , y la página de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) la radiación en Villeta es de 5.1 kwh/m². La hora solar pico, en lugar de analizar 10, 12 o 13 horas con una irradiancia variable, se suman todas las horas de radiación y se obtienen 5,6 o 7 horas, pero con una irradiancia equivalente a 1000 w/m².

Entonces al aplicar la ecuación $HSP = \text{radiación global} / 1000 \text{ w/m}^2$, se obtiene:

$$HSP = 510 \text{ kwh} \cdot \text{m}^2 / 1000 \text{ w/m}^2$$

$$HSP = 5.1 \text{ H.}$$

7.3.1.5. Condiciones estándar de medida de los paneles solares

$$T_c = T_a + \frac{+T_{ONC} - 20}{800 \text{ W/m}^2} * G_{stc}; \text{ si } T_a = 30^\circ\text{c}, \text{ entonces: } T_c = 30 + \frac{46^\circ\text{c} - 20^\circ\text{c}}{800 \text{ W/m}^2} * 1000 \text{ w/m}^2;$$

$$T_c = 62,5^\circ\text{c}$$

Donde:

Tc: temperatura de trabajo del panel

Ta: temperatura ambiente del lugar

T_{onc}: temperatura de operación nominal del panel (según catálogo)

G_{stc}: irradiancia en condiciones estándar de medida

Como el resultado es diferente a 25°C, la temperatura de trabajo estándar, se presentan pérdidas de energía.

7.3.1.6. Dimensionamiento del inversor

Los valores de potencia de los paneles solares corresponden a valores estándar de medida. Así, la potencia real de funcionamiento del inversor se define así:

$$Pr = 1.2 * Pn$$

Si, $Pn = 3000 \text{ w}$; Entonces,

$$Pr = 1.2 * 3000 \text{ w} ; Pr = 3600 \text{ w}$$

7.3.1.7. Número de paneles que soportara cada inversor

Con los datos de la potencia real y la potencia nominal del panel solar, se calcula el número de paneles por inversor:

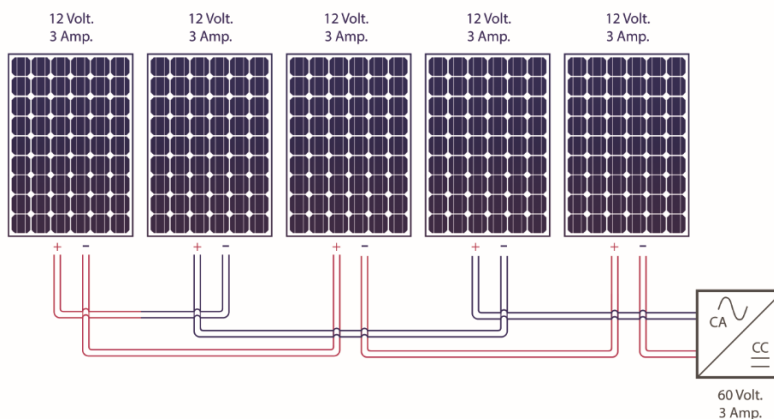
$$Nt = \frac{Pr}{P_{mod}}$$

$$\text{Entonces, si } Nt = \frac{3600 \text{ w}}{165 \text{ W}} = 21$$

En este caso, se define que el máximo número de paneles solares que soporta un inversor es de 21, pero al tener 80 paneles a cada inversor se asociarán 20 paneles en total, a continuación, cuantos paneles se pueden instalar en serie y cuantos en paralelo.

7.3.1.8. Número de paneles máximo para conectar en serie en cada inversor

Figura 30. Ejemplo conexión de paneles solares en serie.



Fuente: elaboración propia

En la Figura 30 se muestra un ejemplo de conexión de paneles solares en serie, donde se suman los voltajes de los paneles solares y la corriente permanece constante.

Dado que el objetivo de este parámetro es proteger el inversor contra tensiones muy altas, que se alcanzan en invierno por las bajas temperaturas, se recomienda calcular el voltaje de circuito abierto del módulo en invierno que tendría el panel solar a una temperatura que el lugar de la instalación nunca haya alcanzado históricamente, por ejemplo -10°C en países tropicales, aunque como no hay inviernos tan fríos calcular a 5 o 10 grados es suficiente. Para proteger la instalación se debe estimar valor de Voc:

$$Voc = Voc(stc) * (1 + ((Ti - 25) * Coef. \frac{Voc}{100}))$$

Donde:

Voc(stc)= Voltaje de circuito abierto en STC (Catálogo).

Coef. Voc. = Coeficiente Térmico de Voltaje en circuito abierto (Catálogo).

Ti= Temperatura Ambiente en invierno, ejemplo 5°C .

Ti= 5°C ; Voc (STC)= 44.1 V.; Coef. Voc. = $-0.35/^{\circ}\text{C}$

$$Voc = Voc(stc) * (1 + ((Ti - 25) * COEF. (Voc)/100));$$

$$Voc = 44.1 * (1 + ((5 - 25) * -0.0035)) Voc = 44.1 * (1 + (0.07)); Voc = 44,1 * (1.07);$$

$$\mathbf{Voc = 47,187 V}$$

Ahora si se puede calcular el número de paneles máximos para conectar en serie:

$$Nsmax. = \frac{V_{inv. max.}}{Voc (invierno)}$$

$$Nsmax. = \frac{715 V.}{47,187 V.} = 15,15$$

Nsmax. = 15 paneles solares en serie por cada inversor.

7.3.1.9. Número de paneles mínimo para conectar en serie en cada inversor

Voc para una temperatura en verano, en España a 60° , en México se puede utilizar este mismo valor, sin embrago para latitudes un poco más tropicales, como Honduras o el Ecuador, allí se tiene que calcular a 70° , temperatura del módulo, Ahora si tenemos el voltaje de trabajo del módulo bajo esas condiciones, para obtener la cantidad de paneles en serie mínima:

$$oc = Voc(stc) * \left(1 + \left((Ti - 25) * Coef. \frac{Voc}{100}\right)\right)$$

$$Voc = 44,1 * (1 + ((70 - 25) * -0.0035))$$

$$Voc = 44,1 * (1 + ((45) * -0.0035))$$

$$Voc = 44,1 * (1 + 0,1575)$$

$$Voc = 44,1 * (1 + 0,1575)$$

$$\mathbf{Voc = 51,04}$$

$$N_{smin.} = \frac{V_{inv.min.}}{Voc(verano)}$$

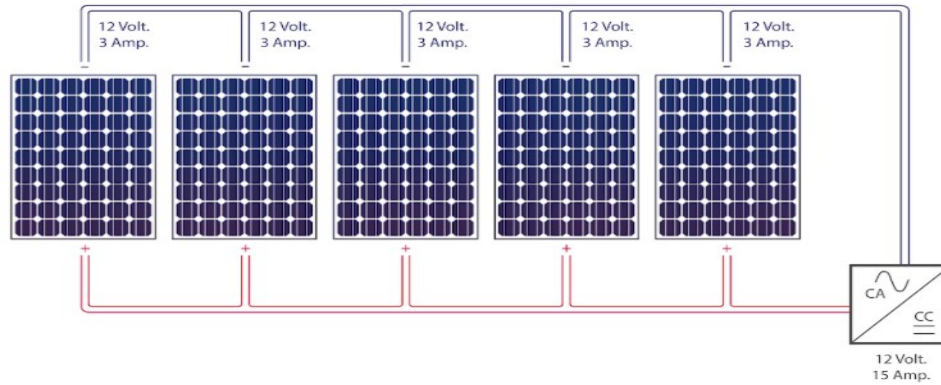
$$N_{smin.} = \frac{210 V}{51.04}$$

$$\mathbf{N_{smin.} = 4,11}$$

Dado que hemos comprobado en los cálculos anteriores que se puede conectar entre 5 y 15 módulos en serie, decidimos conectar 10 módulos en serie.

7.3.1.10. *Número de paneles máximo para conectar en paralelo en cada inversor*

Figura 31. Ejemplo Conexión Paneles Solares en Paralelo.



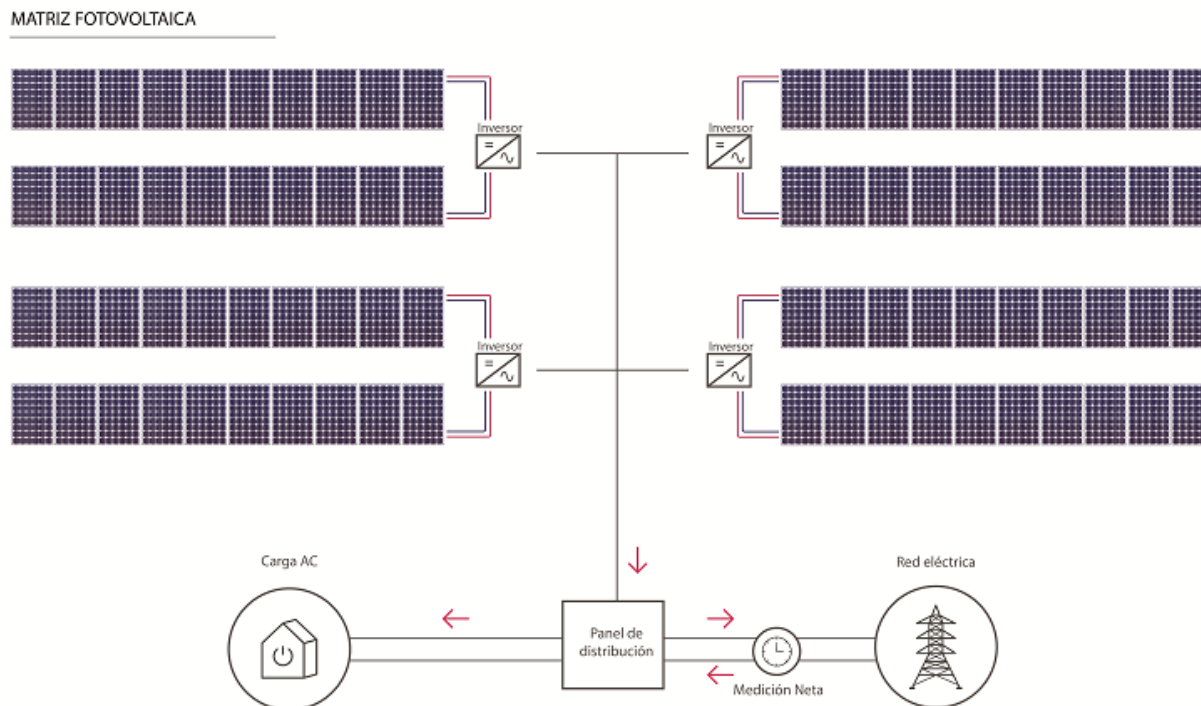
Fuente: elaboración propia

En la Figura 31 se muestra un ejemplo de conexión de paneles solares en paralelo, donde la corriente aumenta y el voltaje permanece constante, al saber la cantidad de paneles totales que tendrá cada inversor y saber cuántos paneles se conectarán en serie, se puede deducir cuántas conexiones en paralelo se tendrán. Solamente es necesario dividir el total de paneles por inversor, entre la cantidad de paneles en serie para obtener la cantidad de paneles solares en paralelo.

$$Np = \frac{Nt}{Ns}; Np = \frac{20}{10}; Np = 2 \text{ Paneles en conexión en paralelo}$$

7.3.1.11. Paneles por conectar en la matriz fotovoltaica

Figura 32. Matriz Sistema Solar Fotovoltaico.



Fuente. elaboración propia

En este momento ya se conoce el número de paneles que soportará cada inversor en serie y el número de paneles que soportará cada inversor en Paralelo, en este paso se define la conformación de la matriz fotovoltaica, de acuerdo a la cantidad de paneles presupuestado **de 80 paneles solares, se necesitan 4 inversores, cada uno 20 paneles en total, 10 en serie y 2 en paralelo.**

Tabla 13. Resumen sistema solar Fotovoltaico por inversor.

Resumen del sistema solar fotovoltaico detallada por cada inversor	
Cantidad total de Paneles Solares	20
Cantidad de Paneles Solares en Serie	20
Cantidad de Paneles Solares en Paralelo	2
Potencia (Cantidad potencia de c/u.)	$20 \times 165 \text{ w} = 3300 \text{ Kwp}$
Relación de Potencia (Pr/Pn)	$3300/3000 = 1,1$

Fuente: elaboración propia

Punto máximo de potencia del inversor MPP serie

En invierno el voltaje en el punto de máxima potencia (MPP) del generador no deberá exceder el máximo del inversor. En cambio, en verano el MPP del generador debe ser mayor que el mínimo del inversor. Por otro lado, en invierno el voltaje en circuito abierto del generador debe ser menor que el máximo del inversor, y en verano la corriente en cortocircuito del generador fotovoltaico debe ser menor que la corriente máxima del inversor. Para validar el voltaje en el MPP se usa la ecuación:

$$Vmpp(invierno) = Vmpp(stc\ del\ panel) * \left(1 + ((Ti - 25) * Coef.Voc/100)\right) * Ns$$

V_{mpp} , para este inversor según catálogo, es de 35,3 V., y el análisis lo haremos con una temperatura de invierno de 5°C.

$$Vmpp(invierno) = 35,3\ V * \left(1 + ((5 - 25^\circ C) * Coef.Voc/100)\right) * Ns;$$

$$Vmpp(invierno) = 35,3\ V * \left(1 + (((-20^\circ C)) * -0,0035)\right) * 15;$$

$$Vmpp(invierno) = 35,3\ V * ((1 + 0,07)) * 15;$$

$$\mathbf{Vmpp(5^\circ C) = 377,71\ V.}$$

Se compara con el valor de la información del catálogo del inversor, donde debe decir que su V_{mpp} está en rangos de 210 a 800 V, hasta 25°C es igual a 715 voltios, por lo que cumpliría con este criterio de protección.

Al hacer el mismo proceso con la temperatura de verano:

$$\mathbf{En\ Verano:}\ Vmpp(verano) = 37,2^\circ C * \left(1 + (((60^\circ C) - 25^\circ C) * Coef.Voc/100)\right) * Ns;$$

$$Vmpp(verano) = 35,3\ v * \left(1 + (((35^\circ C)) * -0,0035)\right) * 15;$$

$$Vmpp(verano) = 35,3\ v * \left(1 + (((35^\circ C)) * -0,0035)\right) * 15;$$

$$Vmpp(verano) = 35,3\ v * (1 - 0,1225) * 15;$$

$$\mathbf{Vmpp(verano) = 309,75\ V.}$$

Este valor debe ser mayor que el valor mínimo encontrado en el catálogo, que es de 210 v por lo tanto cumple con la segunda condición de protección.

La tercera condición dice que el voltaje en circuito abierto del generador debe ser menor que la del voltaje máximo del inversor:

Si $V_{oc} = 51,4 V$., este es el V_{oc} de los paneles, al multiplicar por los paneles en serie 10, entonces, Si $V_{oc} = 51,4 V * 10 = 514 V$.

Es menor que el voltaje máximo del inversor en catálogo, que son 1000 V., cumple.

7.3.1.12. Corriente de corto circuito del inversor

Se analizará la corriente de corto circuito del inversor, para compararla con la del catálogo, la corriente de corto circuito, por ej. es=5,2 A., en condiciones estándar y su coeficiente de corriente es positivo 0,06%, la temperatura de verano es 60° y el número de Paneles solares en Paralelo es de 2.

$$I_{sc}(60^{\circ}C) = I_{sc} (STC) * (1 + (T_i - 25 * Coef(I_{sc})/100)) * N_p;$$

$$I_{sc}(60^{\circ}C) = 5.2 A * (1 + (T_i - 25) * 0,0006) * N_p$$

$$I_{sc}(60^{\circ}C) = 5.2 A * ((1 + 0,021) * 2$$

$$I_{sc}(60^{\circ}C) = 5.2 A * ((1,021) * 2$$

$I_{sc}(60^{\circ}C) = 10,61 A$. Corriente de corto circuito del inversor es de 24 A. Según catálogo del inversor, se cumple con esta especificación.

7.3.1.13. Pérdidas y eficiencias del sistema

El PR se calcula multiplicando todas las eficiencias de los componentes de la instalación. Por ejemplo:

$$PR = \eta_{inv} * \eta_{temp.} * \eta_{cables} * \dots * \eta_n$$

Algunos datos solo pueden lograrse cuando el sistema ya está en funcionamiento. El inversor por lo general tiene una eficiencia del 96 %, y, según el catálogo, la temperatura de trabajo del panel es de 25°C, y la masa de aire es 1.5. En estas condiciones el panel solar entregará su potencia pico, aunque como ya se afirmó es difícil que se cumplan simultáneamente, y por eso se presentan pérdidas de energía.

$$T_c = T_a + \frac{+TONC-20}{800 W/m^2} * G_{stc}$$

T_c : temperatura de trabajo del panel

T_a : temperatura ambiente del lugar

G_{stc} : irradiancia en condiciones estándar de medida

$TONC$: *nominal operating cell temperature*. Es la temperatura que alcanzan los paneles fotovoltaicos cuando la temperatura ambiente es igual a 30°C.

Entonces, si:

$T_a=15^{\circ}\text{C}$; $\text{TONC}=46^{\circ}\text{C}$;

$$T_c = T_a + \frac{+\text{TONC}-20}{800 \text{ W/m}^2} * G_{\text{stc}} ; T_c = 30 + \frac{46^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C}}{800 \text{ W/m}^2} * 1000 \text{ W/m}^2; T_c = 62,5^{\circ}\text{C}$$

El panel solar fotovoltaico, tiene un coeficiente de potencia de -0.35% por grado centígrado, es decir que pierde 0.35 de eficiencia por cada grado que sobrepasa los 25°C , que es la temperatura de trabajo a la que nos entregaría su máxima potencia:

$$\text{Eficiencia del panel; } \eta_{\text{temp}} = 100\% + (62,5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} * (-0.35\%/^{\circ}\text{C}));$$

$$\text{Eficiencia del panel; } \eta_{\text{temp}} = 100\% + (37.5^{\circ}\text{C} * (-0.35\%/^{\circ}\text{C}));$$

Entonces la eficiencia del panel es de: $\eta_{\text{temp}} = 86.87\%$.

Pérdidas por suciedad, aproximadamente de un 4% , siendo un valor alto, pérdidas por interconexión de los paneles aprox. $=4\%$, las pérdidas por el transformador, son del 1% aprox.

Entonces:

$$\text{Performance Ratio} = 86.87\% * 96\% * 96\% * 99\%$$

$$\text{Performance Ratio} = 79.25\%.$$

Este valor esta entre los valores que suele oscilar el rendimiento, entre el 70 y 90% anual, siendo valores superiores a 90% un poco optimistas e inferiores a 70% , muy poco aceptables.

Tabla 14. Proyección de energía a generar real

Equipo	Cantidad	Potencia	Hora solar pico	Potencia pico a generar (kW)	Producción ideal de energía (kWh/día)	Días	Producción mensual esperada de energía (kWh/mes)	Producción anual esperada de energía (ideal) (kWh/año)	Eficiencia del sistema	Producción anual esperada de energía (real) (kWh/año)
		(W)	/día	/mes						
Paneles solares	80	165	4.5	13,2	59,4	30	1782	21384	79.25%	16946,82

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 14 obtenemos el valor real de energía a generar, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema.

7.3.1.14. Protecciones de maniobra y seccionamiento

En el caso de los fusibles para los inversores, únicamente se debe multiplicar el valor de la corriente en cortocircuito por el número de conexiones y a este valor agregarle el factor de seguridad de 1.25.

$$I = 5.2 * 2 * 1.25$$

$$I_{fusible} = I_{sc} * N * 1.25; \quad I_{fusible} = 5,2 * 4 * 1,25; \quad I_{fusible} = 26 \text{ A.}$$

7.3.1.15. Dimensionado del cable

Como $I_{sc} = 5,2$.

Entonces: $I_{max} = I_{sc} * 1,25$; $I_{max} = 5,2 * 1,25$; $I_{max} = 6,5 \text{ A.}$

Según el reglamento de baja tensión, dice que un cable de cobre de 6 mm., XLPE soporta 72 Amperios, lo que indica que sirve para el proyecto.

La caída de tensión, que se produce cuando se transporta corriente de un punto a otro, a través de un cable de cobre, no debe superar el 1,5% del total de la instalación.

$$Caída \text{ de Tensión} = (2 * L * I) / (C * S);$$

Tabla 15. Dimensiones Cableado

L	Longitud del cable
I	Corriente en el punto de máxima potencia del panel.
C	Conductividad a 70°C, es 48 S
Impp (panel)	4,7 Amperios.
S	6 mm ² .
L	10 metros.

Fuente: elaboración propia

$$Caída \text{ de Tensión} = \frac{2 * 10 \text{ m} * 4,7 \text{ A}}{48 * 6};$$

$$Caída \text{ de Tensión} = \frac{94}{288} = 0,32 \text{ v.}$$

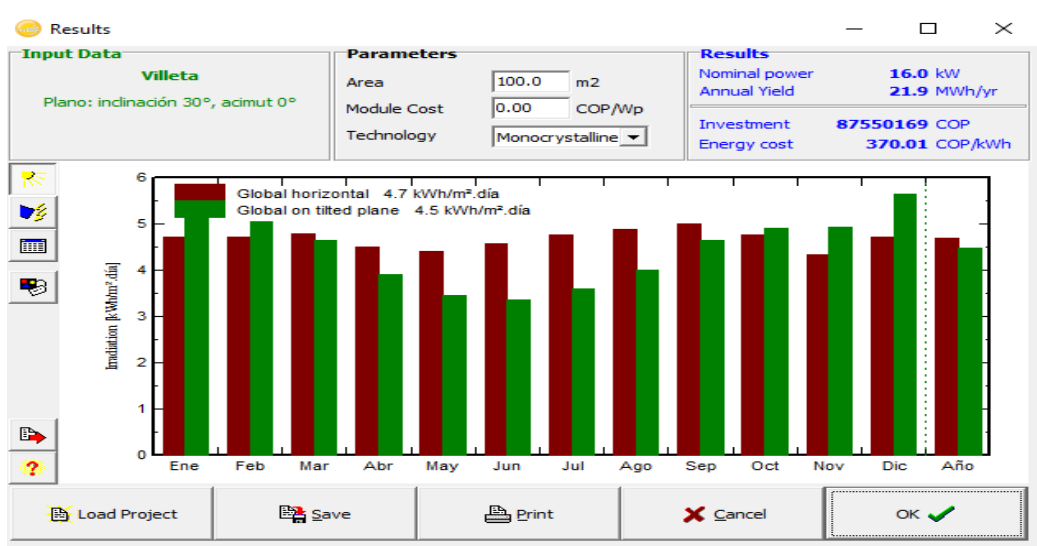
$$Caída \text{ de Tensión} = \frac{94}{288} = 0,32 \text{ v.}$$

$Caida\ de\ Tensi\ on = (0,32/715) * 10 = 0,044\ A.$

7.3.2. Simulación del sistema solar fotovoltaico

A través del estudio de simulación se examinan los cambios que se pueden producir por diferentes factores que afecten el desempeño del sistema, como los cambios meteorológicos, la configuración del sistema y sus implicaciones; se analiza tal desempeño; se hacen comparaciones mediante modificaciones; y se observa el comportamiento del sistema. El *software* incorpora un sistema de mensajes de advertencia/error codificado por colores. Si hay una discrepancia, un problema o una advertencia con su diseño, se advertirá dentro del marco adecuado.

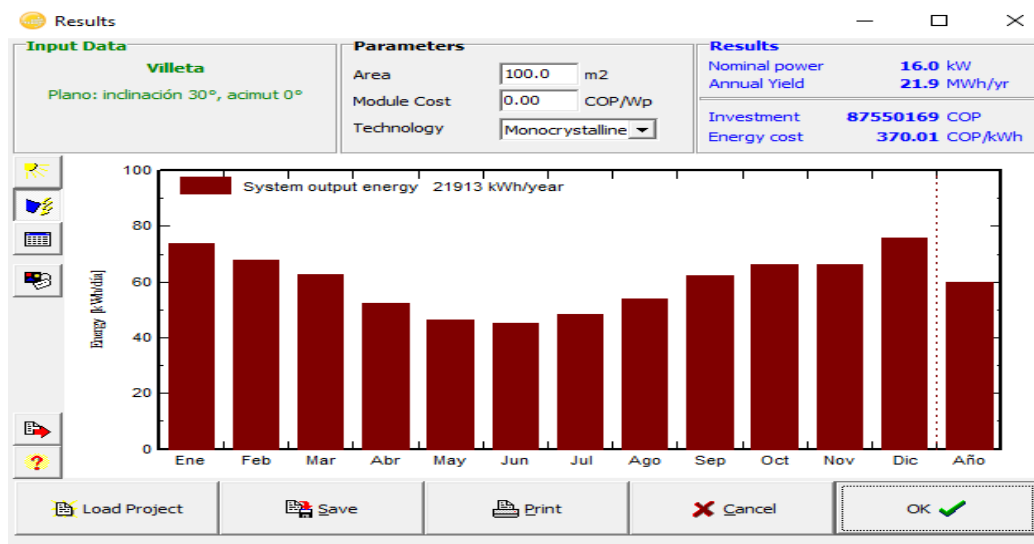
Figura 33. Histograma panel con inclinación de 0° y 30°.



Fuente: elaboración propia mediante PVsyst

De acuerdo con los movimientos de la Tierra, la rotación y la traslación, el ángulo de incidencia varía según la época del año y la ubicación geográfica. Por ende, la inclinación del panel puede variar dependiendo de la época del año. La Figura 33 muestra dos histogramas, uno en color café y otro en color verde, el primero es del panel con inclinación de 0 grados y el segundo es del panel a 30 grados. Al analizar el comportamiento del sistema a nivel general se observó que el panel de 0 grados tiene mayor potencia por áreas por día, sobre todo en los meses de marzo a agosto, pero la diferencia es solo de 0.2, lo que indica que el panel de 30 grados también puede tener un buen desempeño.

Figura 34. Estudio salida de energía del sistema mes a mes.



Fuente: elaboración propia

Al revisar la salida de energía del sistema mes a mes con base en el segundo panel se hizo un promedio de la potencia nominal, la potencia anual, los costos de inversión y los costos energéticos. Se encontró que los meses que más producen son enero y diciembre, y los que menos producen son mayo, junio y julio. La potencia nominal del sistema es de 16 KW, la potencia anual es de 21.9 MWh, la inversión del sistema es de 87 550 169 pesos, y el costo energético es de 370.01 pesos/kWh.

Figura 35. Valores en concreto del sistema a 30°.

The screenshot displays a software window titled 'Results' with a detailed table of monthly energy output values. The table includes columns for horizontal plane (Gl. horiz.), collector plane (Coll. Plane), and system output in kWh/día and kWh.

	Gl. horiz. kWh/m ² .día	Coll. Plane kWh/m ² .día	System output kWh/día	System output kWh
Ene.	4.72	5.49	73.89	2291
Feb.	4.72	5.06	67.98	1903
Mar.	4.78	4.65	62.55	1939
Abr.	4.50	3.90	52.49	1575
May.	4.41	3.45	46.45	1440
Jun.	4.57	3.35	45.03	1351
Jul.	4.76	3.59	48.24	1495
Ago.	4.87	4.00	53.80	1668
Sep.	5.01	4.64	62.33	1870
Oct.	4.75	4.92	66.09	2049
Nov.	4.34	4.92	66.12	1984
Dic.	4.72	5.64	75.78	2349
Año	4.68	4.46	60.04	21913

Fuente: elaboración propia

En la Figura 35 se presentan los valores concretos de la salida energética del sistema; como se cuenta con los datos tanto del panel a 0 grados como el de 30 grados, se puede hacer una comparación, pues, por ejemplo, en enero el primero tiene una potencia de 4.72 kWh/m²*día, mientras que la del segundo es de 5.49 kWh/m²*día, lo cual indica una mayor potencia del panel de 30 grados. Se debe destacar que la salida de energía del sistema es de 73.89 kWh/día, mientras que la salida por hora es de es de 2291 kWh.

Mediante este análisis se tiene claro cuáles son los meses de más productividad energética y de mayor eficiencia. Al año en promedio se tiene 4.68 como potencia del panel de 0 grados y 4.46 para el panel de 30 grados, 60.04 para la potencia de salida del sistema por día y 21 913 para la potencia de salida de energía.

Figura 36. Datos de inversión aproximada.

The screenshot shows the 'Results' window in PVsyst software. It is divided into several sections:

- Input Data:** Location: Villeta; Plano: inclinación 30°, acimut 0°.
- Parameters:** Area: 100.0 m²; Module Cost: 0.00 COP/Wp; Technology: Monocrystalline.
- Results:** Nominal power: 16.0 kW; Annual Yield: 21.9 MWh/yr; Investment: 87550169 COP; Energy cost: 370.01 COP/kWh.
- Economic gross evaluation (excluding taxes and subsidies):**

Module cost	0	COP
Supports cost	58848000	COP
Inverter and wiring	14712000	COP
Transport/Mounting	13990169	COP
Total investment	87550169	COP
Annuities	4377508	COP/yr
Maintenance costs	3730712	COP/yr
Total Yearly cost	8108220	COP/yr
Energy cost	370.01	COP/kWh
- Currency:** COP - Peso Colombian.
- Loan:** Duration: 20 years; Rate: 0.0%; Ann. factor: 0.050.

A warning message at the bottom states: "These values should only be considered as an order of magnitude. More precise evaluations will be available with detailed simulation." The window includes buttons for 'Load Project', 'Save', 'Print', 'Cancel', and 'OK'.

Fuente: elaboración propia

Según PVsyst se estima una inversión de 81 082 220 pesos, como se puede observar en la Figura 36, pero es necesario hacer una estimación según los precios del mercado colombiano, dado que los precios de referencia con los que cuenta el *software* son internacionales y no involucran los incentivos financieros presentes en Colombia.

7.4. Evaluación financiera y ambiental

7.4.1. Evaluación financiera

7.4.1.1. Costos estimados inversión del proyecto

Tabla 16. Detalle Costos Inversión del Proyecto

Ítem	Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	4	Inversor monofásico <i>on-grid</i> 3kw., entrada máxima paneles 3150 w, salida 120 vac 50 hz/60 hz.	3700000	14.800.000
2	9	Estructuras para paneles solares tipo cubierta para parqueaderos en plástico reciclado preferiblemente, incluye polo a tierra	1650000	14.850.000
3	100	Metros de cable	\$ 5.800	580.000
4	80	Metros de cable 3*8 encauchetado	\$ 6.800	544.000
5	90	Pares hembra-macho mc4	\$ 9.300	837.000
6	1	Caja de circuitos	65000	65.000
7	10	Sistema de protección en DC	65000	650.000
8	1	Breaker AC 30 A	13500	13.500
9	1	Diferencial de corriente alta sensibilidad	530000	530.000
10	1	Sistema de monitoreo	860000	860.000
11	10	Kit de tubería Conduit	135000	1.350.000
12	1	Instalación	7300000	7.300.000
13	1	Contador Bidireccional	1500000	1.500.000
13	1	Transporte de materiales	450000	450.000
Costo total del proyecto				44.329.500

Fuente: elaboración propia

7.4.1.2. Beneficios económicos del proyecto

Tabla 17. Flujo de caja estimado del proyecto

Periodo	Inversión	Mantenimiento	Producción anual real estimada (kWh)	Costo kWh	Ahorro por energía generada	Flujo de caja esperado
Año 0	-\$ 44.329.500,00	0,00	0	\$ 415,00	\$ 0,00	-\$ 44.329.500,00
Año 1		-\$ 1.500,00	18112	\$ 427,45	\$ 7.741.974,40	\$ 7.740.474,40
Año 2		-\$ 1.530,00	18112	\$ 440,27	\$ 7.974.170,24	\$ 7.972.640,24
Año 3		-\$ 1.560,60	18112	\$ 453,48	\$ 8.213.429,76	\$ 8.211.869,16
Año 4		-\$ 1.591,81	18112	\$ 467,09	\$ 8.459.934,08	\$ 8.458.342,27
Año 5		-\$ 1.623,64	18112	\$ 481,10	\$ 8.713.683,20	\$ 8.712.059,56
Año 6		-\$ 1.656,12	18112	\$ 495,53	\$ 8.975.039,36	\$ 8.973.383,24
Año 7		-\$ 1.689,24	18112	\$ 510,40	\$ 9.244.364,80	\$ 9.242.675,56
Año 8		-\$ 1.723,02	18112	\$ 525,71	\$ 9.521.659,52	\$ 9.519.936,50
Año 9		-\$ 1.757,48	18112	\$ 541,48	\$ 9.807.285,76	\$ 9.805.528,28
Año 10		-\$ 1.792,63	18112	\$ 557,73	\$ 10.101.605,76	\$ 10.099.813,13
Año 11		-\$ 1.828,49	18112	\$ 574,46	\$ 10.404.619,52	\$ 10.402.791,03
Año 12	\$ 14.800.000,00	-\$ 1.865,06	18112	\$ 591,69	\$ 10.716.689,28	\$ 25.516.689,28
Año 13		-\$ 1.902,36	18112	\$ 609,44	\$ 11.038.177,28	\$ 11.040.079,64
Año 14		-\$ 1.940,40	18112	\$ 627,72	\$ 11.369.264,64	\$ 11.371.205,04
Año 15		-\$ 1.979,21	18112	\$ 646,56	\$ 11.710.494,72	\$ 11.712.473,93
Año 16		-\$ 2.018,80	18112	\$ 665,95	\$ 12.061.686,40	\$ 12.063.705,20
Año 17		-\$ 2.059,17	18112	\$ 685,93	\$ 12.423.564,16	\$ 12.425.623,33
Año 18		-\$ 2.100,36	18112	\$ 706,51	\$ 12.796.309,12	\$ 12.798.409,48
Año 19		-\$ 2.142,36	18112	\$ 727,71	\$ 13.180.283,52	\$ 13.182.425,88
Año 20		-\$ 2.185,21	18112	\$ 749,54	\$ 13.575.668,48	\$ 13.577.853,69
Año 21		-\$ 2.228,92	18112	\$ 772,02	\$ 13.982.826,24	\$ 13.985.055,16
Año 22		-\$ 2.273,49	18112	\$ 795,18	\$ 14.402.300,16	\$ 14.404.573,65

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 17 se observa el flujo de caja del proyecto con una inversión inicial de \$44.329.500=, que son los costos de los equipos que se necesitan para realizar el proyecto, calculados en la Tabla 16, donde no se incluyen el costo de los paneles solares, debido a que se van a reciclar como lo plantea el proyecto en su fase inicial, en el año 12 se observa una nueva inversión de \$14.800.000= que corresponde a la sustitución de los inversores, cuya vida útil aproximada es de 12 años, y se tienen en cuenta unos costos anuales de mantenimiento de

\$1.500.000= durante el primer año y cuyo costo va aumentando cada año, de acuerdo a un IPC estimado del 2 %.

Sobre el flujo de caja libre operacional, se calcula la TIR y el VPN del proyecto, con base en una tasa de descuento del 7 %:

Tabla 18. Datos financieros del proyecto

DATOS FINANCIEROS PROYECTO	
TASA DE DESCUENTO	7%
TIR	20%
VPN	\$ 72.077.290=
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	5,59 años

Fuente: elaboración propia

En conclusión, el modelo financiero planteado es viable, como se muestra en la Tabla 18, dado que se tiene una TIR del 20 %, superior a la tasa de descuento del 7%, y un VPN positivo para los 25 años de vida útil de los elementos a instalar en este tipo de proyectos. Lo anterior quiere decir que los inversionistas que cuenten con una tasa de oportunidad inferior al 15.33 % tendrían interés en invertir en dicho proyecto.

Tabla 19. Retorno de la inversión

Flujo de caja esperado	Acumulado sin tasa de oportunidad PB	Años
-\$ 44.329.500,00	-\$ 44.329.500,00	
\$ 7.740.474,40	-\$ 36.589.025,60	
\$ 7.972.640,24	-\$ 28.616.385,36	
\$ 8.211.869,16	-\$ 20.404.516,20	
\$ 8.458.342,27	-\$ 11.946.173,93	
\$ 8.712.059,56	-\$ 3.234.114,37	
\$ 8.973.383,24	PB=	6,3

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 19 se muestra el tiempo de recuperación de la inversión, que es la inversión inicial de \$44.329.500=, menos los flujos de caja, nos da un tiempo de recuperación de la

inversión de 6,3 años, lo cual es muy favorable porque se tendrán 15 años o más de ganancias, teniendo en cuenta la vida útil del proyecto.

7.4.2. Evaluación ambiental

Relación de rendimiento de energía. Se define como la relación entre el rendimiento total de energía de un módulo o sistema Fotovoltaico a lo largo de su vida útil y la energía que debe invertirse en él en ese momento. Esta energía invertida no solo implica la energía para producir los componentes, transportarlos a la ubicación e instalarlos, sino también la que se requiere para reciclarlos al final de su ciclo de vida.

Como la energía requerida para producir un sistema fotovoltaico depende en gran medida de su tecnología y también de la calidad de los paneles, la relación de rendimiento energético para las diferentes tecnologías varía mucho. Si bien la relación de rendimiento de energía para los módulos fotovoltaicos puede ser tan grande como 10 a 15, los sistemas fotovoltaicos generalmente tienen una relación más baja debido a la energía invertida en los componentes que no sean los paneles.

El tiempo de recuperación de energía se define como la inversión energética total requerida durante la vida útil dividida por el rendimiento energético anual promedio del sistema. Este es diferente al tiempo de recuperación económica. El tiempo de recuperación de la energía de los sistemas fotovoltaicos típicos es de entre 1 y 7 años y también depende de las condiciones de ubicación, la orientación de la matriz fotovoltaica y la irradiancia solar.

Contaminación. Como muchas veces se requieren sustancias químicas tóxicas para producir paneles fotovoltaicos, esto puede ser una amenaza grave para el medio ambiente. Por lo tanto, es muy importante contar con una legislación sólida para evitar la contaminación del entorno de las fábricas fotovoltaicas.

Para determinar el impacto ambiental del sistema solar fotovoltaico en el diseño propuesto, se calculó la cantidad de emisiones de CO₂ a través del programa PVsyst, con base en el número, la geolocalización, la potencia y la inclinación de los paneles solares. Para obtener el balance de carbono total que produce una instalación fotovoltaica se calcula la diferencia entre las emisiones de CO₂ producidas y las ahorradas, que depende de factores como la producción del sistema, su tiempo de vida útil, la cantidad de emisiones en el ciclo de vida real y la degradación anual. Así se obtuvo que la emisión de CO₂ es de 23.72 TCO₂, en contraste con las emisiones reemplazadas de CO₂ que es de 74.9 TCO₂. El sistema produce 21384 kWh/año, y

tiene un tiempo de vida de 30 años y una degradación anual del 1 %. En esa medida, se tiene un balance general total de emisión de CO₂ de 51.18 TCO₂.

7.4.3. Limitaciones del proyecto

Las principales limitaciones de los proyectos de sistemas fotovoltaicos, por lo general son los costos de los paneles solares, aunque con el tiempo estos han ido disminuyendo por el desarrollo de nuevas tecnologías más económicas. Además, la masificación y la preocupación de los gobiernos por la conservación del medio ambiente ha llevado a la financiación de este tipo de proyectos, y a la concesión de subsidios y apoyo. En el presente proyecto se pretende utilizar paneles solares reciclados de otras dependencias de la empresa, y por lo tanto los costos van a ser acordes con el sistema solar fotovoltaico y su generación de energía, pero hasta el momento no hay seguridad respecto a la apropiación de los recursos, por lo que esto podría ser una limitación.

Otra de las limitaciones de los proyectos de energía solar son las baterías, su costo y su baja vida útil, que en el mejor de los casos es de 5 años, comparada con la vida útil de los paneles solares que es de 25 años. En el presente caso se pretende generar y consumir la misma energía, por lo que no se planteó la utilización de baterías, lo cual permitirá ahorrar costos y espacio físico, lo que podría contribuir a la aprobación y satisfactorio montaje del proyecto. Igualmente, se han realizado los estudios de las limitaciones que impone el inversor, en cuanto al máximo número de paneles a conectar, y se tuvieron en cuenta las condiciones extremas de clima y condiciones técnicas como sobre corrientes, que no presentan ningún inconveniente para el desarrollo del diseño. Tampoco se presentan hasta el momento limitaciones de espacio o territorio, pues, por el contrario, aprovechar el área del parqueadero para el montaje del sistema solar fotovoltaico es un valor agregado, al servir a su vez como protección de los rayos solares para las personas y los vehículos.

7.4.4. Cronograma

Tabla 20. Cronograma actividades del proyecto

Actividades por desarrollar		Tiempo del proyecto en meses											
		(6 meses)											
		Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6						
1	Revisión bibliográfica sobre el diseño de sistemas fotovoltaicos	■											
2	Revisión de condiciones geográficas y caracterización de la zona y su recurso energético.		■	■									
3	Realizar el dimensionado de la capacidad del sistema, según la irradiancia solar y los consumos.			■	■								
4	Ajustes de información de cargas.					■	■						
5	Modelado del sistema, paneles, inversores, etc.						■	■					
6	Ajustes información de cargas.			■	■	■	■						
7	Revisión de la distribución física y eléctrica y de la infraestructura necesaria, ajustes.			■	■	■	■	■					
8	Montaje del sistema.								■	■	■	■	■

Fuente: elaboración propia

7.4.5. Análisis de resultados

7.4.5.1. Análisis resultados Comparativos de Energía

Tabla 21. Síntesis de energía a generar ideal y real

Equipo	Cantidad	Potencia	Hora solar pico	Potencia pico a generar (kW)	Producción ideal de energía (kWh/día)	Días	Producción mensual esperada de energía (kWh/mes)	Producción anual esperada de energía (ideal) (kWh/año)	Eficiencia del sistema	Producción anual esperada de energía (real) (kWh/año)
		(W)	/día	/mes						
Paneles solares	80	165	4.5	13,2	59,4	30	1782	21384	79.25%	16946,82

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 21 se muestra la energía que se espera generar con el sistema solar fotovoltaico, de acuerdo con la propuesta técnica de diseño del sistema solar fotovoltaico, y que se ajusta a las necesidades presentes y futuras de las facilidades de la planta de operaciones de Ecopetrol en el municipio de Villeta, los resultados se ajustan a los parámetros de la planta de Ecopetrol de Villeta y aprovecha la infraestructura existente de paneles solares en varias dependencias de la empresa.

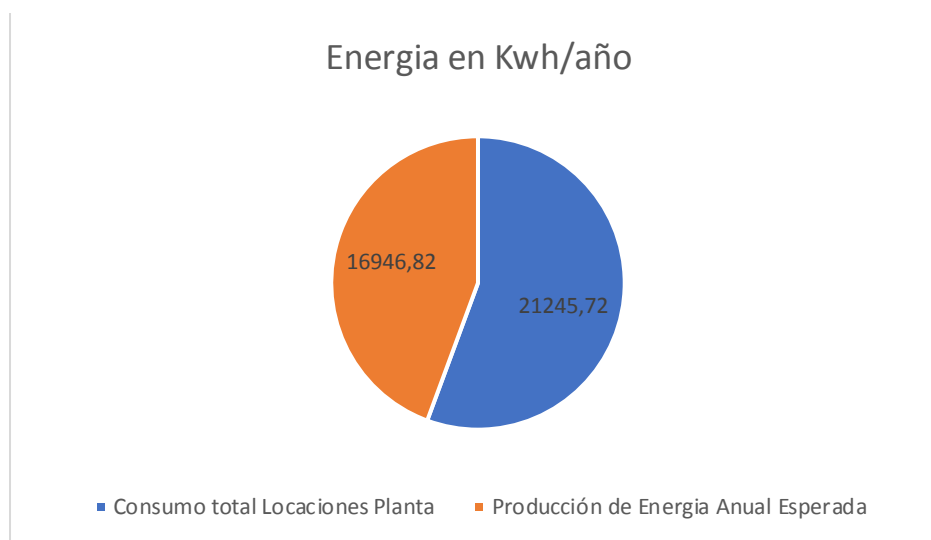
Tabla 22. Resumen consumo total Planta Ecopetrol-Villeta

Consumo total kWh / año	21.246,72
--------------------------------	------------------

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 22, el consumo total de kwh/año es de 21246,72.

Figura 37. Consumo total locaciones vs Producción de Energía Esperada.



Fuente: elaboración propia

Como se muestra en la Figura 37, se realiza una comparación entre lo observado en la Tabla 21, síntesis de energía a generar real e ideal, con un valor de 16946,82 kwh/año y lo que muestra la Tabla 22, consumo de energía total locaciones planta 21246,72 kwh/año, y encontramos que los valores están muy cercanos, que fue uno de los objetivos de la propuesta de diseño del sistema solar fotovoltaico, lograr un balance energético, aprovechar al 100% la energía que se puede generar, de esta manera el ahorro es tangible y significativo.

Figura 38. Panorámica Planta Ecopetrol-Villeta.



Fuente: Planta Ecopetrol-Villeta

En la Figura 38 se sintetizan los resultados del diseño del sistema solar fotovoltaico, se determinó la tipología de la infraestructura que cumple con las necesidades de consumo de energía eléctrica presentes y futuras de uso administrativo en la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta, teniendo en cuenta los requerimientos y las restricciones, se determinaron las necesidades de consumo de energía eléctrica presentes y futuras de las facilidades de uso administrativo de la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta.

7.4.5.2. Análisis resultados financieros

Se estimó la evaluación financiera y ambiental para la ejecución del proyecto de instalación de la infraestructura del sistema solar fotovoltaico, con una inversión inicial de \$44.329.500=, que son los costos de los equipos que se necesitan para realizar el proyecto, calculados en la Tabla 16, en el año 12 se observa una nueva inversión de \$14.800.000= que corresponde a la sustitución de los inversores, cuya vida útil aproximada es de 12 años, y se tienen en cuenta unos costos anuales de mantenimiento de \$1.500.000= durante el primer año y cuyo costo va aumentando cada año, de acuerdo a un IPC estimado del 2 %.

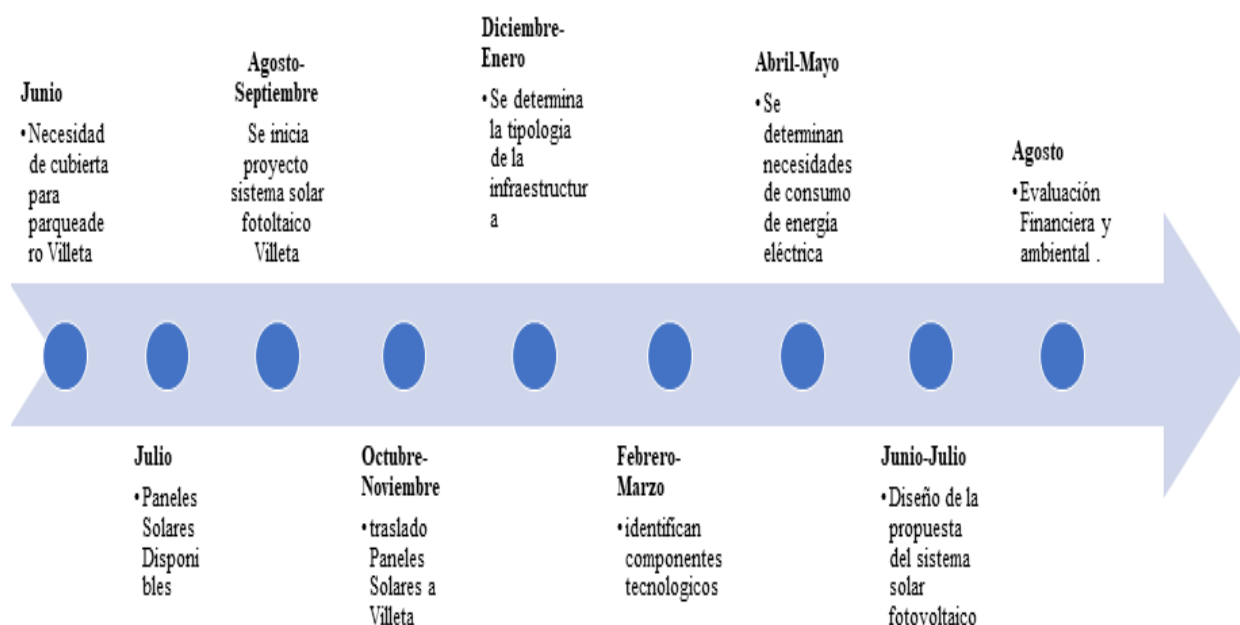
Sobre el flujo de caja libre operacional, se calcula la TIR y el VPN del proyecto, con base en una tasa de descuento del 7 %.

7.4.5.3. Análisis resultados Ambientales

Es muy importante, después de todo lo que se he mencionado acerca de los beneficios ambientales, obteniendo un balance general total de ahorro de emisiones de CO₂ de 51.18 TCO₂.

7.4.6. Plan de intervención

Figura 39. Línea de Tiempo del Proyecto.



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la gráfica 40, el proyecto inicio con la necesidad de una cubierta para parqueadero en la planta Villeta de Ecopetrol, se identificaron unos equipos, paneles solares existentes en otras dependencias de la empresa, se confirmó su disponibilidad, se realizaron pruebas técnicas de funcionamiento e integridad, se confirmó que estaban en buen estado, se presentó la idea del proyecto del sistema solar fotovoltaico, se trasladaron los paneles solares a Villeta, se determinó la tipología de la infraestructura necesaria, se identificaron los componentes tecnológicos, y las necesidades de consumo de energía de la planta, se realizó el diseño del sistema solar fotovoltaico, y se realizó la evaluación financiera y ambiental Continuar con una cultura de aprovechamiento de equipos, herramientas, máquinas que no han sido utilizados en otras áreas de la empresa, como se ha venido realizando en el caso de transformadores, motores de bombas, tuberías, etc., es uno de los argumentos de este proyecto, porque estos equipos constituyen un activo que representa un valor económico para la empresa, y

de hecho ya se han trasladado unos paneles solares existentes en otras áreas a la planta de Ecopetrol Villeta, como se analizó los beneficios económicos, ambientales, se pueden replicar en otras plantas de Ecopetrol, y que están distribuidas por todo el país, contando con 54 plantas de la VIT-Vicepresidencia de transporte.

De acuerdo al modelo de contratación, en las plantas existen contratos de mantenimiento y mejoramiento de áreas como las oficinas, bodegas, cuartos de control, parqueaderos, su concepción se presentó al coordinador de la planta, quien está de acuerdo con su ejecución, y lo presentó a la Jefatura de departamento Andina que es la encargada de apropiar los presupuestos para este tipo de proyectos.

7.4.6.1. Plan de acción

Con la satisfacción de que los directivos se motiven a aprobar este proyecto por sus características de economía y de conservación del medio ambiente, se puede afirmar que está alineado con las políticas de transición energética no solo de la empresa, sino del país. El siguiente paso y conseguir la aprobación de los recursos necesarios y descritos en el proyecto, para ejecutar el proyecto en toda su extensión, de manera satisfactoria.

8 CONCLUSIONES

Como resultado del presente documento se determinó la tipología *on grid* como la que aporta más beneficios al proyecto, dado que al contar actualmente con una conexión a la red comercial de ENEL no es necesario implementar sistemas acumuladores de energía, y teniendo en cuenta el alto consumo de energía de la planta de Ecopetrol la instalación de los paneles aportara de forma positiva a la matriz energética de la planta reduciendo el costo mensual a pagar por energía utilizada.

Se logró identificar los componentes tecnológicos del sistema solar fotovoltaico, para implementar el diseño, construcción y operación con sus especificaciones técnicas y elaboración de propuesta formal para su implementación por parte de la empresa.

Se determino las el consumo de energía eléctrica a satisfacer con la implementación} del proyecto, se llevó a buen terminó la realización del trabajo de campo en las instalaciones de la planta de Ecopetrol Villeta, analizando los consumos de los diferentes equipos en las áreas seleccionadas para alimentar con la energía solar fotovoltaica, que será el resultado del proyecto del sistema solar fotovoltaico.

La propuesta presentada en el presente documento, se diseñó con el fin de satisfacer las necesidades de la planta de Ecopetrol en Villeta, de forma de que se aprovechan activos inutilizados de la organización (Paneles solares) y se suple parte de la demanda energética existente en la planta de operaciones de Ecopetrol en Villeta.

Se realizó una evaluación financiera y ambiental para la ejecución del proyecto de instalación de la infraestructura del sistema solar fotovoltaico, con el resultado de un proyecto viable económica y ambientalmente.

La energía que se espera generar satisface parte de la demanda energética de la planta, Por lo cual muy poca energía podría ser suministrada a la red eléctrica, Esto evitando temas como la venta de excedentes de energía al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Este proyecto es importante porque es el primero de una serie de proyectos que la empresa desea implementar en las áreas de Ecopetrol, aprovechar su infraestructura, sus techos, y sirve para continuar incursionando en la energía solar como parte de las energías limpias, y es soporte para la transición energética del país, que debido a las pocas reservas de petróleo y a la escasa exploración, y al rechazo de las comunidades por los proyectos de fracking, puede suplir sus necesidades de energía eléctrica y resultar en un negocio rentable al vender los excedentes.

Impulsa a la empresa a investigar en la generación de energía eléctrica por medio de otros tipos de FNCER, como la energía eólica, energía maremótica, y el desarrollo de nanopartículas derivadas del petróleo con aplicación en paneles solares.

El proyecto cumple con el objetivo de ser amigable con el medio ambiente, porque se logra reducir el consumo energético de una organización como Ecopetrol y su dependencia de las fuentes convencionales de energía, de esta forma impacta positivamente la matriz energética y reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Las ventajas que proporcionan energía limpia, pueden servir de base para desarrollar proyectos en zonas donde no hay cobertura de la red eléctrica, o ZNI zonas no interconectadas, y aprovechar las ventajas de obras por impuestos ante el fisco nacional.

Por los resultados obtenidos, se concluye que este proyecto es un aporte positivo al impacto en la tarea de luchar contra el cambio climático, colaborar en la seguridad energética, y además lograr beneficios económicos importantes, el desarrollo tecnológico y el aporte a la eficiencia energética.

El presente proyecto contribuye a las acciones estratégicas y sectoriales que permiten lograr las metas de eficiencia energética y seguridad energética, y al cumplimiento de los compromisos internacionales COP21, en materia ambiental.

El proyecto genera un impacto positivo en la competitividad de la empresa y del país, y mejora la calidad de vida de las personas en su entorno laboral, y en la sociedad Villetana en general.

9 RECOMENDACIONES

La optimización consiste en encontrar la mejor respuesta para un problema específico. En este trabajo los problemas relacionados con el costo requerirán que este sea el menor posible.

Sumado a lo anterior está el problema relacionado con la mejor combinación de componentes modulares y no modulares del sistema PV *off-grid*.

Se sugiere hacer una transición a la iluminación tipo led para obtener menos consumo y así lograr más cobertura del sistema de energía solar fotovoltaico. Así mismo, se plantea buscar la mejor tecnología de los componentes existentes en el mercado, pues día tras día hay cambios y mejoras debido al auge de los sistemas solares fotovoltaicos. Una vez se realice el montaje del sistema solar fotovoltaico será necesario evaluar su eficiencia y la conveniencia de expansión y adición de baterías para ampliar el tiempo de respaldo al sistema de la red eléctrica. También, se recomienda evaluar la resistencia y durabilidad de estructuras en plástico reciclado en lugar de estructuras metálicas lo cual ayudaría al índice de conservación del medio ambiente.

Se recomienda realizar gestión para la utilización responsable de la energía, lo cual contribuirá a obtener mejores resultados durante las siguientes fases del presente proyecto, conciencia social para lograr los objetivos de reducción de costos con tecnologías innovadoras, y lograr la participación de los usuarios finales en la implementación de proyectos que promuevan la utilización de energías renovables.

Realizar todas las acciones necesarias para materializar el presente proyecto, y que sea toda una realidad la construcción y el montaje del sistema solar fotovoltaico, y que sea ejemplo para las 54 plantas de la vicepresidencia de transporte de Ecopetrol, distribuidas en todo el territorio nacional, y de todas las instalaciones de la empresa, donde se configure una infraestructura adecuada para el desarrollo de este tipo de proyectos.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Arno Smets, K. J. (2016). *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. UIT Cambridge.
- Becerra, L. (18 de agosto de 2018). Ecopetrol anunció que incursionará en proyectos de energía solar en el Meta. *Editorial La Republica S.A.S.*
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación* (Tercera Edición ed.). Bogotá, D.C., Colombia: Pearson Education, Inc.
- Ecopetrol S.A. (2020). *Asamblea General de accionistas 2020*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/>
- González, C., y Barney, J. (2019). *¿Transición eólica vs descarbonización en la guajira? - Todo es más gaseoso de lo que parece*. Recuperado el 12 de 02 de 2020, de <http://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2019/03/%C2%BFTRANSICIO%CC%81N-EO%CC%81LICA-VRS-DESCARBONIZACIO%CC%81N.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición ed.). (I. E. S.A., Ed.) México, D.F., México: McGraw-Hill Education.
- Impacto TIC. (2018). *Con su parque solar, Ecopetrol se suma a las empresas que producen energías renovables*. Obtenido de <https://impactotic.co/con-su-parque-solar-ecopetrol-se-suma-a-las-empresas-que-producen-energias-renovables/>
- International Energy Agency - IEA. (2018). *Global Energy & CO2 Status Report*. Obtenido de <https://www.iea.org>: <https://www.iea.org/geco/>
- Malhotra, N. (2008). *Investigación de Mercados* (Quinta Edición ed.). México, D.F., México: Pearson Education, Inc.
- Perpiñán, O. (2018). *Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>
- REN21. (2019). *A Comprehensive Annual Overview Of The State Of Renewable Energy*. Obtenido de <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- Smets, A., Jager, K., Isabella, O., Zeman, M., & Van Swaaij, R. (2016). *Solar Energy. The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies and Systems*. Cambridge (Inglaterra): UIT Cambridge Ltd.

- Solar Power Europe. (2019). *Global Market Outlook. For Solar Power / 2019-2023*. Obtenido de http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/09/20190510_SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-for-Solar-Power-2019-2023.pdf?cf_id=3187
- U.S. Energy Information Administration. (2019). *Solar explained. Photovoltaics and electricity*. Obtenido de <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- World Energy Council. (2019). *World Energy Issues Monitor 2019 | Managing the Grand Energy Transition*. Obtenido de <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-issues-monitor-2019-managing-the-grand-energy-transition>
- WWF Colombia. (2019). *El ABC de los compromisos de Colombia para la COP 21*. Obtenido de <https://www.wwf.org.co/>: <https://www.wwf.org.co/?248415/El-ABC-de-los-compromisos-de-Colombia-para-la-COP-21>

11 ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica panel Solar World

Sunmodule
SolarWorld Module
SW 165/175/185 mono



El módulo solar Sunmodule® SW 165/175/185 mono de SolarWorld ofrece un concepto innovador. El proceso de producción completamente automatizado y único en su tipo asegura una altísima precisión y una calidad constante del producto. La producción mecanizada alcanza una altísima homogeneidad de diseño.

Las células monocristalinas de 5^ª están incorporadas en una lámina transparente de EVA (Acetato de Vinilo-Etileno) y protegidas por una cubierta de vidrio reforzado de 3 mm. Por su parte posterior el módulo está sellado con una lámina de Teflón de muy alta calidad. La excelente estabilidad del módulo se debe a su marco de aluminio de unión continua y a la perfección con que el vidrio encaja en ésta.

La caja de conexión en la parte posterior del módulo es plana y compacta; su montaje tiene lugar mediante un novedoso proceso patentado. La caja de conexión no presenta cavidades, es impermeable y resistente a la radiación ultravioleta, los microbios y la temperatura. Este producto plano y compacto, de calidad suprema, es la solución ideal para cualquier campo de aplicación.

Módulo	
Largo:	1610 mm
Ancho:	810 mm
Altura:	34 mm
Marco:	Aluminio
Peso:	15 kg

Actualización: Abril 2006

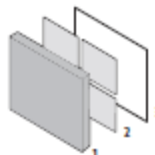


SolarWorld AG
Kurt-Schumacher-Straße 12-14
53113 Bonn/Germany
Tel.: +49-228-55920-0
E-Mail: service@solarworld.de
www.solarworld.de



SolarWorld Module SW 165/175/185 mono

Estructura



- 1] Parte anterior: vidrio reforzado
- 2] 72 células solares monocristalinas 125 mm x 125 mm incorporadas en EVA (Acetato de Vinilo-Etileno)
- 3] Parte posterior: lámina de Tedlar

Comportamiento bajo condiciones estándar de prueba

	165 Wp	175 Wp	185 Wp
Potencia en el punto de máx. potencia (P_{max})	165 Wp	175 Wp	185 Wp
Tensión a potencia máxima (V_{mpp})	35,3 V	35,7 V	36,0 V
Corriente a potencia máxima (I_{mpp})	4,7 A	4,9 A	5,1 A
Tensión en circuito abierto (V_{oc})	44,1 V	44,4 V	44,5 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	5,2 A	5,4 A	5,5 A

Comportamiento a 800 W/m², NOCT, AM 1,5

	125 Wp	131 Wp	138 Wp
Potencia en el punto de máx. potencia (P_{max})	125 Wp	131 Wp	138 Wp
Tensión a potencia máxima (V_{mpp})	32,7 V	33,1 V	33,4 V
Corriente a potencia máxima (I_{mpp})	3,8 A	4,0 A	4,1 A
Tensión en circuito abierto (V_{oc})	40,9 V	41,1 V	41,2 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	4,2 A	4,4 A	4,5 A

Pequeña reducción de la eficiencia en el comportamiento con carga parcial a 25°C: A 200 W/m² se alcanza el 95 % (+/- 3 %) de la eficiencia bajo condiciones estándar de prueba (1000 W/m²).

Materiales empleados

Células por módulo	72
Tipo de célula	Silicio monocristalino
Medidas de la célula	125 x 125 mm

Parámetros característicos del comportamiento térmico

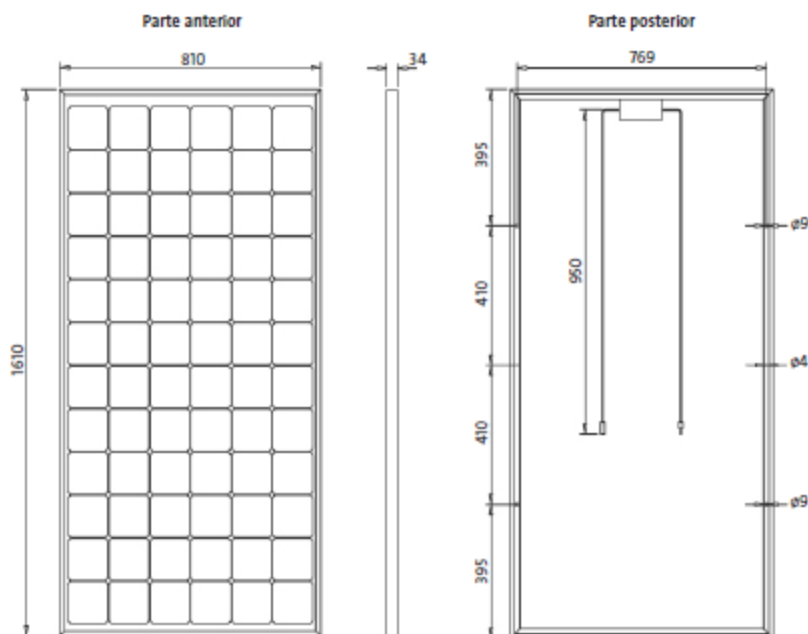
NOCT	46°C
TK I_{sc}	0,06 %/K
TK V_{oc}	-0,35 %/K

Parámetros característicos para la integración óptima en el sistema

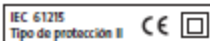
Tensión máxima del sistema	715 V
Carga máxima de corriente inversa	No aplicar tensiones externas al módulo mayores que el valor de V_{oc} .

Datos sobre potencia y desviaciones límites de manufactura

Potencia nominal	165/175/185 Wp +/- 3 %
Caja de conexión	IP 65
Enchufe	MC tipo 4



Los módulos están certificados según:



SolarWorld AG se reserva el derecho de cambiar las especificaciones.
Esta hoja de datos se corresponde con EN 50380.
Esta hoja de datos también está disponible en inglés.

Anexo 2. Ficha técnica inversor Fronius Symo



IP65



Tecnología HF



Gar. 5/7 años ampliable



Características principales

• Sistema de Montaje

Algo que caracteriza y diferencia de otros inversores, es la separación física entre la zona de conexión y la zona de potencia del inversor. Ambas están totalmente separadas. La zona de conexión es fijada al muro y cableada antes de instalar la zona de potencia. De este modo y a la hora de ofrecer servicio, no es necesario descablear el aparato. El Fronius Service Partner tan solo desmonta la parte de potencia. Gracias a esta solución no se pierde la configuración del inversor.

• Diseño SuperFlex

El diseño SuperFlex de Fronius combina todos los requisitos de diseño del sistema en un solo inversor. Dos seguidores MPP junto con un amplio rango de tensión de entrada, garantizan la máxima flexibilidad. Cada entrada de corriente continua, y por tanto cada seguidor MPP, es capaz de adaptarse a la potencia nominal del inversor. El resultado es un inversor para cada aplicación. Gracias al diseño SuperFlex, un solo inversor puede hacer frente a cualquier reto, incluyendo diferentes orientaciones del tejado, el sombreado de una o dos series de módulos fotovoltaicos, o el uso de módulos residuales.

• Interface WLAN integrado

Es muy importante para Fronius que el sistema de monitorización se caracterice por ser sencillo y fácil de usar. Con el Fronius Datamanager, nos convertimos en el primer fabricante de inversores en ofrecer un Interface WLAN integrado en el propio inversor. El inversor se conecta a Internet sin cables adicionales, y garantiza una perfecta visualización del funcionamiento del sistema FV.

• Smart Grid Ready

Los inversores de Fronius están listos para las Redes Inteligentes del futuro. Diseñados y equipados perfectamente, los inversores cumplen con los requisitos técnicos de las redes del futuro, incorporando una serie de funciones inteligentes denominadas funciones avanzadas de red. Entre éstas, se incluyen las funciones de control, para una óptima inyección de energía reactiva y efectiva.

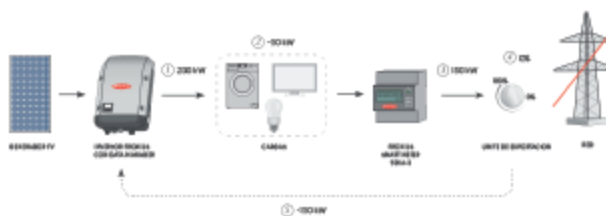
• Seguimiento inteligente GMPP

El seguimiento inteligente GMPP es el nuevo algoritmo de seguidores MPP que adapta su comportamiento de forma dinámica buscando el punto óptimo de funcionamiento. La particularidad que tiene el seguimiento inteligente GMPP es que comprueba de forma automática la totalidad de la curva característica periódicamente y encuentra el punto de máxima potencia (GMPP), incluso en sombreados parciales.

Sistema Zero Feed-In

Limite la exportación de energía a la red gracias al sistema Zero Feed-in de Fronius. Ejemplo:

1. El sistema FV produce 200 kW
2. Autoconsumo de 50 kW
3. Posible exportación a red de 150 kW
4. Fije el límite de exportación al 0% en el Datamanager 2.0
5. El inversor reduce la salida de potencia en 150 kW para cumplir con la exigencia del 0%

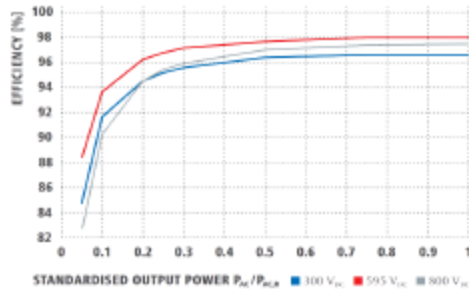




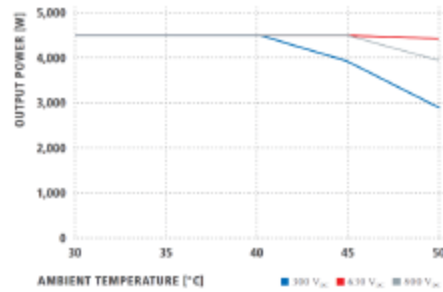
Curvas de rendimiento

1. Fronius Symo 4.5-3-S

FRONIUS SYMO 4.5-3-S EFFICIENCY CURVE

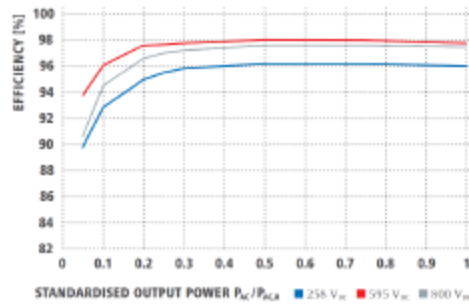


FRONIUS SYMO 4.5-3-S TEMPERATURE DERATING

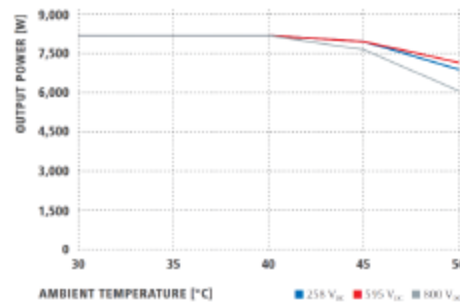


2. Fronius Symo 8.2-3-M

FRONIUS SYMO 8.2-3-M EFFICIENCY CURVE

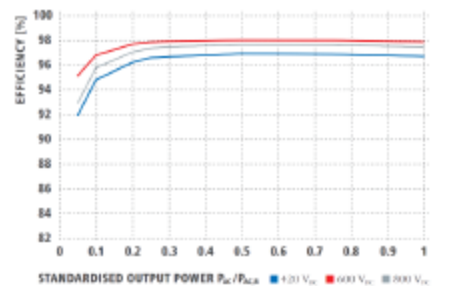


FRONIUS SYMO 8.2-3-M TEMPERATURE DERATING

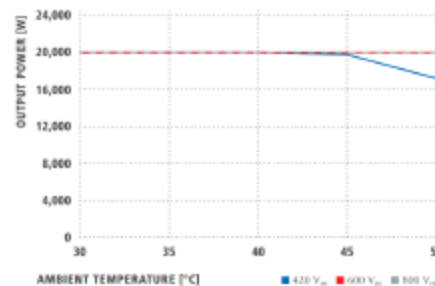


3. Fronius Symo 20.0-3-M

FRONIUS SYMO 20.0-3-M EFFICIENCY CURVE



FRONIUS SYMO 20.0-3-M TEMPERATURE DERATING



Características Técnicas

Fronius Symo	3.0-3-S	3.7-3-S	4.5-3-S	3.0-3-M	3.7-3-M	4.5-3-M
Datos de entrada						
Corriente máxima de entrada (I _{in,max} /I _{in,max}) ¹	16.0 A / 16.0 A					
Corriente máx. de cortocircuito FV (I _{sc,MPP})	24.0 A / 24.0 A					
Voltaje mínimo de entrada (U _{in,min})	150 V					
Voltaje de alimentación en arranque (U _{in,star})	200 V					
Voltaje nominal de entrada (U _{in,n})	595 V					
Voltaje máximo de entrada (U _{in,max})	1000 V					
Rango voltaje MPP (U _{mppt} min - U _{mppt} max)	200-800 V	250-800 V	300-800 V	210-800 V		
Numero de seguidores MPP	1			2		
Numero de conexiones DC (FV)	3			2+2		
Salida max. desde generador FV (P _{dc,max})	6.0 kWpeak	7.4 kWpeak	9.0 kWpeak	6.0 kWpeak	7.4 kWpeak	9.0 kWpeak
Datos de salida						
Salida AC nominal (P _{ac,n})	3000 W	3700 W	4500 W	3000 W	3700 W	4500 W
Potencia máx. de salida	3000 W	3700 W	4500 W	3000 W	3700 W	4500 W
Corriente AC de salida (I _{ac,max})	4.3 A	5.3 A	6.5 A	4.3 A	5.3 A	6.5 A
Conexión a red (long. de cable)	3NPE 400 V / 230 V o 3-NPE 380 V / 220 V (+20% / 30%)					
Frecuencia (long. de cable)	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)					
Distorsión armónica total	< 3%					
Factor de potencia (cos φ _{ac})	0.70-1 ind. / cap.			0.85-1 ind. / cap.		
Datos generales						
Dimensiones (altura x ancho x largo)	645 x 431 x 204 mm					
Peso	16.0 kg			19.9 kg		
Grado de protección	IP 65					
Clase de protección	1					
Categoría sobretensión (DC / AC) *	2 / 3					
Diseño del inversor	Sin transformador					
Enfriamiento	Enfriamiento por aire regulado					
Instalación	Instalación en interior y exterior					
Rango de temperatura ambiente	-25 - +60°C					
Humedad permitida	0 - 100%					
Altitud máxima	2000 m. / 3200 m. (sin restringir/rango de voltaje restringido)					
Tecnología de conexión DC	Terminales de tornillo 3 x DC+ y 3 x DC - 16 mm ²			Terminales de tornillo 4 x DC+ y 4 x DC - 16 mm ²		
Tecnología de conexión AC	Terminales de tornillo de 5 polos AC 2.5 - 16 mm ²			Terminales de tornillo de 5 polos AC 2.5 - 16 mm ²		
Certificados y conformidad con estándares	OVE / ÖNORM E 8001-4-712, DIN V VDE 0126-1-1, VDE AR N 4105, IEC 62109-1-2, IEC 62116, IEC 61727, AS 4777-2, AS 4777-3, AS 3100, UNE 206007-1, GB3/2, SO 4777, CEI 0-27, NRS 097					
Consumo nocturno	< 1 W					
Eficiencia						
Eficiencia máxima	96.5 %					
Eficiencia europea	96.2 %	96.7 %	97.0 %	96.5 %	96.9 %	97.2 %
η al 5% P _{ac} , ²	80.3/83.6/79.1 %	83.4/86.4/80.6 %	84.8/88.5/82.8 %	79.8/85.1/80.8 %	81.6/87.8/82.8 %	83.4/90.3/85.0 %
η al 10% P _{ac} , ²	87.8/91.0/96.2 %	90.1/92.5/88.7 %	91.7/93.7/90.3 %	86.5/91.6/87.7 %	87.9/93.6/90.5 %	89.2/94.1/91.2 %
η al 20% P _{ac} , ²	92.6/95.0/92.6 %	93.7/95.7/93.6 %	94.6/96.3/94.5 %	90.8/95.3/93.0 %	91.9/96.0/94.1 %	92.8/96.5/95.1 %
η al 25% P _{ac} , ²	93.4/95.6/93.8 %	94.5/96.4/94.7 %	95.2/96.8/95.4 %	91.9/96.0/94.2 %	92.9/96.6/95.2 %	93.5/97.0/95.8 %
η al 30% P _{ac} , ²	94.0/96.3/94.5 %	95.0/96.7/95.4 %	95.6/97.2/95.9 %	92.8/96.5/95.1 %	93.5/97.0/95.8 %	94.2/97.3/96.3 %
η al 50% P _{ac} , ²	95.2/97.3/96.3 %	96.9/97.6/96.7 %	96.4/97.7/97.0 %	94.3/97.5/96.5 %	94.6/97.7/96.8 %	94.9/97.8/97.2 %
η al 75% P _{ac} , ²	95.6/97.7/97.0 %	96.2/97.8/97.3 %	96.6/98.0/97.4 %	94.9/97.8/97.2 %	95.0/97.9/97.4 %	95.1/98.0/97.5 %
η al 100% P _{ac} , ²	95.6/97.9/97.3 %	96.2/98.0/97.5 %	96.6/98.0/97.5 %	95.0/98.0/97.4 %	95.1/98.0/97.5 %	95.0/98.0/97.6 %
Eficiencia de adaptación MPP	> 99.9 %					
Instrumentos de protección						
Medida de insulación DC	SI					
Comportamiento en sobrecarga	Desplazamiento del punto de operación, limitación de potencia					
Desconector DC	SI					
Protección ante potencia Inversa	SI					
Interfases						
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solarweb, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)					
6 entradas y 4 entradas/salidas digitales	Interfaz receptora de mando a distancia					
USB (A Socket) ⁴	Data logging, actualización del inversor vía USB flash drive					
2 x RS422 (RJ45)	Fronius Solar net					
Salida de señal ⁴	Gestión de la energía (salida de relé flotante)					
Datalogger y Servidor web	Incluidos					
Entrada externa ⁴	Intertaz SO-Meter / Entrada para protección ante sobretensión					
RS485	Modbus RTU SunSpec o conexión del medidor					

1. Aplicable a los Fronius Symo 3.0-3-M, 3.7-3-M, 4.5-3-M. 2. Y a U_{mppt-min} / U_{ac} / U_{mppt-max}. 3. Conforme a IEC 62109-1
 4. También disponible en la versión light. 5. 16 mm² sin cable y virolas

Fronius Symo	5.0-3-M	6.0-3-M	7.0-3-M	8.2-3-M
Datos de entrada				
Corriente máxima de entrada (I _{AC max} /I _{DC max})	16.0 A / 16.0 A			
Corriente máx. de cortocircuito FV (I _{MPPL/MPPL})	24.0 A / 24.0 A			
Voltaje mínimo de entrada (U _{AC min})	150 V			
Voltaje de alimentación en arranque (U _{AC start})	200 V			
Voltaje nominal de entrada (U _{AC, V})	595 V			
Voltaje máximo de entrada (U _{AC max})	1000 V			
Rango voltaje MPP (U _{MPP min} - U _{MPP max})	163-800 V	195-800 V	228-800 V	267-800 V
Número de seguidores MPP	2			
Número de conexiones DC (FV)	2+2			
Salida Max. desde generador FV (P _{AC max})	10.0 kWpeak	12.0 kWpeak	14.0 kWpeak	16.4 kWpeak
Datos de salida				
Salida AC nominal (P _{AC V})	5000 W	6000 W	7000 W	8200 W
Potencia máx. de salida	5000 W	6000 W	7000 W	8200 W
Corriente AC de salida (I _{AC nom})	7.2 A	8.7 A	10.1 A	11.8 A
Conexión a red (Rango de salida)	3NPE 400 V / 230 V o 3-NPE 380 V / 220 V (+20% / 30%)			
Frecuencia (Rango de frecuencia)	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)			
Distorsión armónica total	< 3%			
Factor de potencia (cos φ _{AC V})	0.85-1 ind. / cap.			
Datos generales				
Dimensiones (altura x ancho x largo)	645 x 431 x 204 mm			
Peso	19.9 kg		21.9 kg	
Grado de protección	IP 65			
Clase de protección	1			
Categoría sobretensión (DC / AC) ¹	2 / 3			
Diseño del inversor	Sin transformador			
Enfriamiento	Enfriamiento por aire regulado			
Instalación	Instalación en interior y exterior			
Rango de temperatura ambiente	-25 - +60°C			
Humedad permitida	0 - 100%			
Altitud máxima	2000 m / 3400 m. (Sin restringir/rango de voltaje restringido)			
Tecnología de conexión DC	Terminales de tornillo 4 x DC+ y 4 x DC - 16 mm ²			
Tecnología de conexión AC	Terminales de tornillo de 5 polos AC 2.5 - 16 mm ² 3			
Certificados y conformidad con estándares	OVE / ÖNORM E 8001-4-712, DIN V VDE 0126-1-1, VDE AR N 4105, IEC 62109-1-2, IEC 62116, IEC 61727, AS 4777-2, AS 4777-3, AS 3100, UNE 206007-1, G83/2, SO 4777, CEI 0-21, NRS 097			
Consumo nocturno	< 1 W			
Eficiencia				
Eficiencia máxima	96.5 %			
Eficiencia europea	97.3 %	97.5 %	97.6 %	97.7 %
η al 5% P _{ac,r} ³	84.9/91.2/85.9 %	87.8/92.6/87.8 %	88.7/93.1/89.0 %	89.8/93.8/90.6 %
η al 10% P _{ac,r} ³	89.9/94.6/91.7 %	91.3/95.6/93.0 %	92.0/95.9/94.7 %	92.8/96.1/94.5 %
η al 20% P _{ac,r} ³	93.2/96.7/95.4 %	94.1/97.1/95.9 %	94.5/97.3/96.3 %	95.0/97.6/96.6 %
η al 25% P _{ac,r} ³	93.9/97.2/96.0 %	94.7/97.5/96.5 %	95.1/97.6/96.7 %	95.5/97.7/97.0 %
η al 30% P _{ac,r} ³	94.5/97.4/96.5 %	95.1/97.7/96.8 %	95.4/97.7/97.0 %	95.8/97.8/97.2 %
η al 50% P _{ac,r} ³	95.2/97.9/97.3 %	95.7/98.0/97.5 %	95.9/98.0/97.5 %	96.2/98.0/97.6 %
η al 75% P _{ac,r} ³	95.3/98.0/97.5 %	95.7/98.0/97.6 %	95.9/98.0/97.6 %	96.2/98.0/97.6 %
η al 100% P _{ac,r} ³	95.2/98.0/97.6 %	95.7/97.9/97.6 %	95.8/97.9/97.5 %	96.0/97.8/97.5 %
Eficiencia de adaptación MPP	> 99.9 %			
Instrumentos de protección				
Medida de insulación DC	Sí			
Comportamiento en sobrecarga	Desplazamiento del punto de operación, limitación de potencia			
Desconector DC	Sí			
Protección ante polaridad inversa	Sí			
Interfaces				
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solar.web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)			
6 entradas y 4 entradas/salidas digitales	Interfaz receptora de mando a distancia			
USB (A Socket) ⁴	Detallogging, actualización del inversor vía USB flash drive			
2 x RS422 (RJ45)	Fronius Solar Net			
Salida de señal ⁴	Gestión de la energía (salida de relé flotante)			
Detalle y Servidor web	Incluidos			
Entrada externa ⁴	Interfaz SO-Meter / Entrada para protección ante sobretensión			
RS485	Modbus RTU SunSpec o conexión del medidor			

1. Conforme a IEC 62109-1

2. 16 mm² sin cable y virolas3. Y a U_{MPP min} / U_{OCV} / U_{MPP max}

4. También disponible en la versión light

Características Técnicas

Fronius Symo	10.0-3-S	12.5-3-S	15.0-3-S	17.5-3-M	20.0-3-M
Datos de entrada					
Corriente máxima de entrada <small>(de red a la red)</small>	27.0 A / 16.5 A ¹		33.0 A / 27.0 A		
Corriente total máx. útil de entrada <small>(de red a la red)</small>	43.5 A		51.0 A		
Corriente máx. de cortocircuito FV <small>(max. I_{sc})</small>	40.5 A / 24.8 A		49.5 A / 40.5 A		
Voltaje mínimo de entrada <small>(U_{in min})</small>			200 V		
Voltaje de alimentación en arranque <small>(U_{in start})</small>			200 V		
Voltaje nominal de entrada <small>(U_{in nom})</small>			600 V		
Voltaje máximo de entrada <small>(U_{in max})</small>			1000 V		
Rango voltaje MPP <small>(U_{mppt min} - U_{mppt max})</small>	270-800 V	320-800 V	370-800 V	420-800 V	
Numero de seguidores MPP	2				
Numero de conexiones DC (FV)	2+2				
Salida máx. desde generador FV <small>(P_{max})</small>	15.0 kWpeak	18.8 kWpeak	22.5 kWpeak	26.3 kWpeak	30.0 kWpeak
Datos de salida					
Salida AC nominal <small>(P_{nom})</small>	10000 W	12500 W	15000 W	17500 W	20000 W
Potencia máx. de salida	10000 VA	12500 VA	15000 VA	17500 VA	20000 VA
Corriente AC de salida <small>(I_{out max})</small>	14.4 A	18.0 A	21.7 A	25.3 A	28.9 A
Conexión a red <small>(range de voltaje)</small>	3NPE 400 V / 230 V o 3-NPE 380 V / 220 V (+20% / 30%)				
Frecuencia <small>(range de frecuencia)</small>	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)				
Distorsión armónica total	1.8 %	2.0 %	1.5 %	1.5 %	1.3 %
Factor de potencia <small>(cos φ ac)</small>	0-1 Ind. / cap.				
Datos generales					
Dimensiones (altura x ancho x largo)	725 x 510 x 225 mm				
Peso	34.8 kg		43.4 kg		
Grado de protección	IP 66				
Clase de protección	1				
Categoría sobretensión (DC / AC) ³	1 + 2/3				
Diseño del inversor	Sin transformador				
Enfriamiento	Enfriamiento por aire regulado				
Instalación	Instalación en interior y exterior				
Rango de temperatura ambiente	-40 - +60°C				
Humedad permitida	0 - 100%				
Altitud máxima	2000 m. / 3200 m. (sin restringir/rango de voltaje restringido)				
Tecnología de conexión DC	Terminales de tornillo 6 x DC+ y 6 x DC- 16 mm ²				
Tecnología de conexión AC	Terminales de tornillo de 5 polos AC 2.5 - 16 mm ²				
Certificados y conformidad con estándares	ÖVE / ÖNORM E 8001-4-712, DIN V VDE 0126-1-1, VDE AR N 4105, IEC 62109-1-2, IEC 62116, IEC 61727, AS 4777-2, AS 4777-3, AS 3100, UNE 206007-1, G83/2, SO 4777, CEI 0-21, NRS 097				
Consumo nocturno	< 1 W				
Eficiencia					
Eficiencia máxima	98.0 %		98.1 %		
Eficiencia europea	97.4 %	97.6 %	97.8 %	97.8 %	97.9 %
η al 5% Pac ²	87.9/92.5/89.2 %	88.7/93.1/90.1 %	91.2/94.8/92.3 %	91.6/95.0/92.7 %	91.9/95.2/93.0 %
η al 10% Pac ²	87.8/91.0/96.2 %	91.2/94.9/92.8 %	93.4/96.0/94.4 %	94.0/96.4/95.0 %	94.8/96.9/95.8 %
η al 20% Pac ²	94.6/97.3/96.1 %	95.4/97.3/96.6 %	95.9/97.4/96.7 %	96.3/97.6/96.9 %	96.3/97.8/97.1 %
η al 25% Pac ²	95.4/97.3/96.6 %	95.4/97.6/97.0 %	96.2/97.6/97.0 %	96.4/97.8/97.2 %	96.7/97.9/97.4 %
η al 30% Pac ²	95.6/97.5/96.9 %	95.9/97.7/97.2 %	96.5/97.8/97.3 %	96.6/97.9/97.4 %	96.8/98.0/97.6 %
η al 50% Pac ²	96.3/97.9/97.4 %	96.4/98.0/97.5 %	96.9/98.1/97.7 %	97.0/98.3/97.7 %	97.0/98.3/97.8 %
η al 75% Pac ²	96.5/98.0/97.6 %	96.5/98.0/97.6 %	97.0/98.1/97.8 %	97.0/98.1/97.8 %	97.0/98.1/97.7 %
η al 100% Pac ²	96.5/98.0/97.6 %	96.5/97.8/97.6 %	97.0/98.1/97.7 %	96.9/98.1/97.6 %	96.8/98.0/97.6 %
Eficiencia de adaptación MPP	> 99.9 %				
Instrumentos de protección					
Medida de insulación DC	SI				
Comportamiento en sobrecarga	Desplazamiento del punto de operación, limitación de potencia				
Desconector DC	SI				
Protección ante polaridad inversa	SI				
Interfases					
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solar web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)				
6 entradas y 4 entradas/salidas digitales	Interfaz receptora de mando a distancia				
USB (A Socket) ⁴	Data logging, actualización del inversor vía USB flash drive				
2 x RS422 (RJ45)	Fronius Solar net				
Salida de serie ⁴	Gestión de la energía (salida de red ⁴ fotante)				
Data logger y Servidor web	Incluidos				
Entrada externa ⁴	Interfaz SO-Meter / Entrada para protección ante sobretensión				
RS485	Modbus RTU SunSpec o conexión del medidor				

1. 14.0 A para voltajes < 420 V

2. Y a U_{mppt max} / U_{in} / U_{mppt min}

3. Conforme a IEC 62109-1

4. También disponible en la versión light



Dirección: Pol.Ind. "Els Mollons", C/Torners, 6. 46970, Alaquàs, Valencia.

Teléfono: 96 151 70 50

www.saclimafotovoltaica.com

Anexo 3. Definiciones

DEFINICIONES	
Abreviatura	Significado
I	Corriente
SFV	Sistema Solar Fotovoltaico
W	Vatio
Kwh	Kilovatio hora
Kwp	Kilovatio pico
GW	Gigavatio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
TW	Teravatio
W/Per cápita	Vatio per cápita
On-grid	Conectado a la red
DC	Corriente directa
AC	Corriente Alterna
PV	Fotovoltaico
off-grid	sistemas autónomos
fnrcr	Fuentes no convencionales de energías renovables
Pp	Potencia pico
Pr	Potencia real
Pn	Potencia nominal
THDv	la tasa de armónicos de tensión que viene impuesta por la red
THDI	la tasa armónica de la corriente que inyecta el inversor
Isc	Corriente de cortocircuito
BAU	
Ipv	