

**Sistema de generación de energía eléctrica fotovoltaica para autoconsumo con inyección de
excedentes a la red pública en zonas urbanas**

Hernando Nier Contreras

Asesor

Ing. Jairo Luís Gutiérrez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2024

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mi familia y a todas las personas que me han brindado un inmenso apoyo y ánimo inquebrantable durante todo mi proceso formativo. Su aliento ha sido crucial en los momentos en los que parecía desfallecer, enfrentando largas horas de esfuerzo físico y mental. Estudiar mientras se responsable de un hogar y se trabaja en una de las actividades más peligrosas y desgastantes de la industria nacional ha sido todo un desafío, pero contar con su respaldo me ha impulsado a seguir adelante y superar cada obstáculo con determinación. Su amor y comprensión han sido un pilar fundamental en este camino, y estoy profundamente agradecido.

Resumen

Este proyecto aplicado tiene como objetivo principal la implementación de un sistema de autogeneración de energía eléctrica para autoconsumo con inyección de excedentes a la red pública. Para lograrlo, se ha empleado un sistema solar fotovoltaico que aprovecha la alta radiación solar presente en la zona de la costa caribe colombiana, asegurando una generación constante de energía durante todo el año.

El diseño del arreglo solar ha sido cuidadosamente planificado con un sobredimensionamiento en potencia pico de generación. Esta estrategia permite reducir los costos de la factura de energía a cero y, al mismo tiempo, contribuir con la inyección de excedentes a la red pública. De esta manera, la comunidad también puede beneficiarse del uso de energía limpia en sus actividades diarias, y se realiza un importante aporte en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero emitidos principalmente por las centrales térmicas en los procesos de generación eléctrica.

La adopción de este sistema fotovoltaico para autoconsumo y la inyección de excedentes a la red pública no solo promueve un uso más sostenible de la energía en la zona urbana, sino que también contribuye al esfuerzo global para mitigar el impacto del cambio climático. Además, al garantizar una generación constante de energía, se ofrece una solución eficiente y confiable para el suministro eléctrico de la vivienda, impulsando la transición hacia un futuro energético más limpio y sustentable en la región.

Palabras clave: energía solar, autogenerador, On grid, autoconsumo, radiación solar.

Abstract

This applied project has as its main objective the implementation of a self-generation system of electrical energy for self-consumption with surplus injection into the public grid. To achieve this, a photovoltaic solar system has been used that takes advantage of the high solar radiation present in the area of the Colombian Caribbean coast, ensuring a constant generation of energy throughout the year.

The design of the solar array has been carefully planned with an oversizing in peak generation power. This strategy makes it possible to reduce the costs of the energy bill to zero and, at the same time, contribute to the injection of surpluses into the public network. In this way, the community can also benefit from the use of clean energy in their daily activities, and an important contribution is made in reducing greenhouse gas emissions emitted mainly by thermal power plants in the electricity generation processes.

The adoption of this photovoltaic system for self-consumption and the injection of surpluses into the public grid not only promotes a more sustainable use of energy in urban areas, but also contributes to the global effort to mitigate the impact of climate change. In addition, by guaranteeing a constant generation of energy, an efficient and reliable solution is offered for the electrical supply of the home, promoting the transition towards a cleaner and more sustainable energy future in the region.

Keywords: solar energy, autogenerator, on grid, self-consumption, solar radiation.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	12
Justificación	14
Objetivos	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos	15
Marco teórico	16
Energía	16
Diversidad en las Fuentes de Energía.....	16
Perspectivas y Transformaciones de las Fuentes Renovables	16
Energía Solar Fotovoltaica: Conversión de la Radiación Solar en Electricidad	17
Transición Energética: Avanzando Hacia un Futuro Sostenible	18
Descentralización Energética y Generación Distribuida: Abriendo Nuevas Posibilidades	19
Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE):	20
Autogeneración a Gran Escala (AGGE):	20
Generador Distribuido (GD):	20
Panorama del Sistema Energético en Colombia: Desafíos y Oportunidades	21
Avanzando Hacia una Transición Energética Sostenible y Enfrentando el Cambio Climático	22
Marco Normativo para las Energías Renovables en Colombia: Avances y Compromisos.....	23

Diseño Metodológico.....	26
Fase 1 - Revisión Documental	26
Fase 2 - Análisis de Requerimientos	26
Fase 3 - Implementación del Sistema de Generación Fotovoltaica	26
Fase 4 - Evaluación de la Producción Energética de la Planta.....	27
Fase 5 - Optimizar el Funcionamiento de la Planta de Generación	27
Resultado de la Investigación	28
Revisión Documental	28
<i>Problemática Ambiental</i>	28
<i>Consecuencias del Efecto Invernadero en la Salud Humana</i>	30
<i>Cómo Solucionar las Consecuencias del Efecto Invernadero</i>	31
<i>Atlas de Radiación Solar de Colombia</i>	32
<i>Normativas y Regulación</i>	35
Autores Referentes en el Campo de la Energía Solar	36
Análisis de requerimientos	37
Implementación de la planta	39
Criterios Para la Selección de Equipos	41
Presupuesto	45
Planos de Proyecto y Diagrama Unifilar	47
Diagrama de bloques de funcionamiento del proyecto.....	54
<i>Imágenes de implementación</i>	55
Evaluación de la Producción de la Planta	58

Conclusiones	63
Referencias bibliográficas.....	64

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Radiacion Diaria Promedio</i>	34
Figura 2 <i>Grafica de Consumo Mensual</i>	37
Figura 3 <i>Promedio Mensual de Radiacion</i>	38
Figura 4 <i>Características Medidor Bidireccional</i>	44
Figura 5 <i>Simbología Electrica</i>	47
Figura 6 <i>Localización del Proyecto</i>	48
Figura 7 <i>Conexiones Electricas de Paneles e Inversor</i>	49
Figura 8 <i>Conexiones Tablero DC</i>	50
Figura 9 <i>Conexiones Tablero AC</i>	51
Figura 10 <i>Conexiones Tablero Principal de Residencia</i>	52
Figura 11 <i>Conexiones Medidor Bidireccional</i>	53
Figura 12 <i>Esquema Electrico General</i>	54
Figura 13 <i>Montaje de Paneles</i>	55
Figura 14 <i>Montaje de Inversor</i>	55
Figura 15 <i>Montaje Tableros de Proteccion DC y AC</i>	56
Figura 16 <i>Imagen General del Montaje</i>	56
Figura 17 <i>Medidor Bidireccional</i>	57
Figura 18 <i>Graficas de Generacion Solar</i>	58
Figura 19 <i>Emision de CO2</i>	61

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Radiación Promedio Anual</i>	33
Tabla 2 <i>Características de los Paneles</i>	42
Tabla 3 <i>Características del Inversor</i>	43
Tabla 4 <i>Presupuesto</i>	45

Introducción

La búsqueda de soluciones energéticas sostenibles se ha convertido en un imperativo global, especialmente en el contexto de preocupaciones por el cambio climático y el aumento constante de los precios de la energía. En este sentido, el presente informe se centra en la implementación de un sistema de autogeneración de energía eléctrica para autoconsumo con inyección de excedentes a la red pública en la región costera del caribe colombiano.

El proyecto se fundamenta en la instalación de un sistema solar fotovoltaico diseñado para aprovechar la elevada radiación solar característica de esta zona, garantizando así una generación constante de energía a lo largo del año. Con una cuidadosa planificación del arreglo solar, incluyendo un sobredimensionamiento en la potencia pico de generación, se pretende reducir los costos de la factura de energía a cero, mientras se contribuye simultáneamente con la inyección de excedentes a la red pública.

La necesidad de abordar esta problemática se torna aún más evidente al considerar la actual situación del suministro eléctrico en Colombia. A pesar de que el país cuenta con una matriz de generación eléctrica relativamente limpia, con un 66,8% de su capacidad instalada proveniente de hidroeléctricas, el 30,5% restante proviene de centrales térmicas, fuentes de gran contaminación. Mientras tanto, apenas un 1,5% de la generación eléctrica proviene de fuentes de energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica. Esta situación subraya la urgencia de promover alternativas más amigables con el medio ambiente.

Además del impacto ambiental, el creciente costo de la energía eléctrica representa una carga significativa para la economía familiar. Un análisis reciente revela un aumento del 90% en

el precio del kilovatio/hora en tan solo un año, lo que afecta directamente el presupuesto de los hogares, particularmente aquellos de estratos medios y bajos. Ante este panorama, la propuesta de construcción de un sistema de generación de energía eléctrica para autoconsumo e inyección de excedentes a la red pública surge como una alternativa viable y necesaria.

El presente informe no solo tiene como objetivo la implementación práctica de este sistema, sino también la contribución al conocimiento científico en el ámbito de la ingeniería electrónica y la energía renovable. Mediante una revisión exhaustiva de la regulación actual en Colombia, el análisis de requerimientos, estudio de cargas y condiciones geográficas, así como la evaluación y optimización del funcionamiento del sistema, se busca proporcionar información valiosa para futuras investigaciones y proyectos similares. En última instancia, se espera que este proyecto sirva como un modelo replicable, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y sostenibles en un esfuerzo por mitigar el impacto del cambio climático y garantizar un suministro energético eficiente y accesible para todos.

Planteamiento del Problema

El suministro de energía para los hogares y las industrias en centros urbanos y rurales debe presentarse de una manera constante, si esta se presenta de manera amigable con el planeta proporciona un beneficio extra.

La matriz de generación eléctrica colombiana es la sexta matriz más limpia del mundo, el 66.8% (12031MW) de la capacidad instalada proviene de hidroeléctricas. Según cifras de ACOGEN el 30.5% (5493MW) de la generación de energía se obtiene de centrales térmicas, las cuales son fuentes de gran contaminación. Solo el 1.5% (270MW) de la generación eléctrica proviene fuentes de energías renovables no convencionales como la solar y eólica.

Es importante reconocer la importancia que tiene para el planeta la implementación de sistemas de generación de energía con alternativas amigables con el medio ambiente, por tanto, debemos promover la utilización de este tipo de soluciones sostenibles medioambientalmente y que hoy se encuentran al alcance de muchas personas.

Los costos de la energía eléctrica han subido de una forma alarmante, hace apenas un año el kilovatio/hora (KWh) tenía un valor de \$450 pesos y en la última factura de energía su valor llegó a \$855 pesos lo que representa un incremento del 90% siendo un valor extremadamente alto y que afecta la economía familiar; si tomamos como referencia una vivienda promedio de estrato 2 que dispone de un aire acondicionado, la cual tendría en el mes un consumo promedio de 420kWh con un valor bruto de \$359.100 pesos, procedemos a restar el subsidio del gobierno sobre los primeros 173KWh dando un valor neto de \$286.094, se procede a incluir alumbrado público(10% sobre el valor bruto) \$322.004, también se incluye el cobro correspondiente al servicio de aseo (\$22.500) dando como resultado un valor a pagar de \$344.504. Sería entonces

un compromiso que representa aproximadamente 30% de un salario mínimo mensual vigente (SMMLV) el cual para el año 2023 es: \$1.160.000 pesos.

La propuesta que se tiene es la construcción de un sistema de generación de energía eléctrica para autoconsumo e inyección de excedentes a la red pública, a través de un arreglo de paneles solares. La potencia de generación eléctrica del proyecto tendrá un superávit de energía si tomamos como referencia la demanda de energía mencionada, esto permitirá entregar esos excedentes a la red pública para que sea utilizado por las viviendas cercanas y así obtener beneficios económicos que permitirán acelerar el tiempo de amortización de la inversión.

De esta forma se estarán logrando varios objetivos, los cuales son en primer lugar reducir la huella de carbono por consumo de energía eléctrica, lo cual le hace bien al medioambiente y luego de haber amortizado la inversión se estarán recibiendo beneficios económicos los cuales corresponden al dinero que se dejará de pagar mensualmente por la energía consumida en la vivienda y el dinero que debe pagar la compañía de energía eléctrica por la energía inyectada a la red pública.

Justificación

Como ingenieros, se tiene la responsabilidad de buscar soluciones para mejorar el bienestar de las personas, especialmente cuando se enfrentan situaciones con impactos negativos en la economía, el medioambiente y la vida en general.

La ingeniería electrónica es una disciplina poderosa que permite desarrollar proyectos de diversas escalas, aprovechando la electrónica y el software para controlar procesos complejos de manera eficiente. Dada la importancia de aprovechar los recursos naturales y la creciente preocupación por los altos precios de la energía, se ha tomado la decisión de implementar un sistema de aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos, inversores de corriente y otros componentes. Este sistema transformará la radiación solar en energía eléctrica, cubriendo las necesidades de la vivienda y, además, permitirá inyectar excedentes a la red pública. Así, no solo se obtendrán beneficios económicos por el ahorro de energía de la red, sino también por la venta de los excedentes generados.

Este proyecto no solo busca beneficios económicos, sino también contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero, que son responsables del cambio climático. De esta manera, se apoya y promueve la tan necesaria transición energética a nivel global.

La intención que se tiene al desarrollar, analizar los datos y publicar este proyecto es brindar a la sociedad información valiosa sobre cómo llevar a cabo el análisis, ejecución y puesta en marcha de un sistema de generación de energía para autoconsumo de manera efectiva y viable económicamente. Se proyecta que este sistema tenga un corto período de amortización de la inversión, lo que permitirá que más personas se motiven a adoptar este tipo de tecnologías limpias y sostenibles.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema de energía renovable basado en energía solar fotovoltaica para autoconsumo con conexión a red.

Objetivos Específicos

Realizar revisión documental de la regulación actual en Colombia en cuanto a energía renovable.

Analizar requerimientos, estudio de cargas y condiciones geográficas.

Implementar el sistema de generación fotovoltaica ON GRID en una vivienda promedio.

Evaluar la producción energética de la planta en un periodo dado.

Optimizar el funcionamiento de la planta de generación de acuerdo con los datos del comportamiento del sistema.

Marco Teórico

Energía

La energía es la capacidad intrínseca de los cuerpos para ejecutar trabajos específicos, capaz de mutar y transmutarse en diversas manifestaciones energéticas. Cuando se enfoca la atención en la energía eléctrica, se puede definir como una forma de energía engendrada por fluctuaciones potenciales entre dos puntos, dando lugar a la emergencia de una corriente eléctrica que, a su vez, origina la realización de trabajo. No obstante, la energía no se limita a una sola manifestación; en la naturaleza, se manifiesta en múltiples formas (Roldan, 2008).

Diversidad en las Fuentes de Energía

Las fuentes de energía son categorizadas según su origen, dividiéndose en fuentes no renovables (también llamadas convencionales) y fuentes renovables. La distinción central radica en su impacto ambiental y su sostenibilidad. Las fuentes no renovables, como los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), agotan recursos a un ritmo más rápido que su regeneración, lo que desencadena la escasez a largo plazo (Vivanco, 2020). Por otro lado, las fuentes renovables, como la solar y la eólica, son regenerativas y no agotan recursos naturales.

Perspectivas y Transformaciones de las Fuentes Renovables

Las energías renovables han adquirido un papel crucial en la búsqueda de un futuro energético sostenible. A nivel global, los países han emprendido esfuerzos por incorporar estas fuentes en sus matrices energéticas, ajustando políticas orientadas a alterar las formas de generación energética, aunque estas transformaciones a menudo requieren inversiones considerables (Bueno, Rodríguez y Rodríguez, 2016). En 2018, las fuentes renovables representaron un 26,2% del consumo energético mundial, subrayando la necesidad de aumentar

aún más su adopción. Desde 2012, la capacidad instalada de energías renovables ha experimentado un aumento notorio a nivel mundial, pasando de capacidades entre 30 y 40 GW a aproximadamente 100 GW, constituyendo cerca del 60% de las adiciones netas (López, 2016).

La energía renovable, en esencia, se produce de forma sostenible en armonía con el medio ambiente y los aspectos económicos, sociales y políticos. Además, es capaz de regenerarse de manera natural sin intervención humana (López, 2022).

Energía Solar Fotovoltaica: Conversión de la Radiación Solar en Electricidad

La energía solar es una invaluable fuente de energía que aprovecha la radiación electromagnética del sol para generar calor y electricidad. Este proceso se logra mediante el uso de celdas solares, también conocidas como celdas fotovoltaicas, que permiten la conversión directa de la energía luminosa en corriente eléctrica mediante la excitación de electrones y su movimiento a través de la estructura celular (Laborde & Williams, 2016).

Los sistemas fotovoltaicos se categorizan en dos tipos principales: sistemas autónomos y sistemas conectados a la red. Los sistemas autónomos son capaces de abastecer el consumo energético sin depender de la red eléctrica, almacenando el exceso de energía para momentos de mayor demanda. Por otro lado, los sistemas conectados a la red inyectan la energía generada en la red convencional, compartiendo el excedente energético con la comunidad y optimizando la distribución (Perpiñan, 2020).

Los beneficios de la implementación de la energía fotovoltaica son amplios y diversos. Además de ser una fuente de energía limpia y renovable, esta tecnología ofrece una vida útil prolongada para los paneles solares, lo que garantiza una inversión a largo plazo. Los sistemas fotovoltaicos también brindan acceso a electricidad a áreas remotas, donde la infraestructura

energética convencional es inaccesible. Sin embargo, se deben considerar algunas desventajas notables, como el alto costo inicial de instalación de los sistemas, la ocupación de espacio en la instalación y la necesidad de una exposición directa a la luz solar. En temporadas de invierno u otoño, la generación de energía puede verse afectada (Villafuerte, 2019).

Es crucial reconocer que la implementación de la energía solar fotovoltaica requiere abordar factores esenciales. Estos incluyen garantizar la disponibilidad segura y constante del recurso solar, minimizar los impactos ambientales asociados a la instalación y operación de los sistemas, asegurar el acceso a las poblaciones objetivo, incluir aquellas en áreas no interconectadas, y reducir significativamente la dependencia de fuentes energéticas tradicionales (Moreno, Rodríguez, Olaya, Peña y Bustos, 2019).

Transición Energética: Avanzando Hacia un Futuro Sostenible

La transición energética se refiere al cambio gradual del empleo de fuentes de energía convencionales a fuentes de energía renovables, también conocido como el "proceso de descarbonización". Su propósito fundamental radica en mitigar los efectos adversos provocados por la liberación de gases de efecto invernadero, resultado del consumo de energías fósiles (Círculo de Empresarios, 2020).

No obstante, es vital reconocer que la transición energética va más allá de sus implicaciones energéticas. Este proceso tiene la capacidad de generar cambios significativos en diversos niveles, desde políticos hasta empresariales, pasando por aspectos económicos, tecnológicos, sociales y productivos, debido a su naturaleza interdisciplinaria (Bertinat, 2016). Es por esta razón que estas transiciones cobran relevancia a nivel global, con países como Suecia

liderando en índices de preparación y desempeño en este camino hacia un nuevo paradigma energético.

Las metas a nivel mundial plantean la inclusión ambiciosa de las energías renovables hasta alcanzar un 85% para el año 2050, tomando en consideración el crecimiento reciente de la energía eólica y solar. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los esfuerzos de transición han encontrado ciertas dificultades, lo que ha resultado en un avance más lento de lo esperado. La presencia de tecnologías arraigadas en la actualidad y la adopción gradual de fuentes no convencionales son factores que influyen en esta demora, especialmente en los sectores industriales, de transporte e infraestructura, que son los mayores consumidores de energía a nivel global (IRENA, 2018).

La adopción de fuentes de energía renovable no solo tiene el potencial de mitigar los impactos del cambio climático, sino que también puede catalizar cambios profundos en las estructuras socioeconómicas y políticas de las naciones. La dependencia histórica de los combustibles fósiles y los sistemas energéticos tradicionales está siendo desafiada por una visión más sostenible y resiliente del futuro. Esta transformación implica no solo la adopción de tecnologías más limpias, sino también la creación de nuevas oportunidades de empleo, la descentralización de la generación de energía y la reconfiguración de la seguridad energética.

Descentralización Energética y Generación Distribuida: Abriendo Nuevas Posibilidades

Desde el 23 de noviembre de 2021, la Resolución CREG 174 del mismo año ha entrado en vigor. Esta resolución aborda la regulación de aspectos operativos y comerciales que permiten la incorporación de la autogeneración a pequeña escala y la generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). También establece procedimientos para la conexión de

autogeneradores a gran escala con una potencia máxima declarada inferior a 5 MW. En consecuencia, los usuarios ahora tienen la capacidad de producir y vender excedentes de energía eléctrica (autogeneración). Asimismo, las entidades jurídicas que se dedican a la generación distribuida tienen la oportunidad de integrarse al Sistema Interconectado Nacional y comercializar su energía, tal como estipula la Resolución 174 del 2021 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE):

Esta categoría abarca a los clientes que optan por generar energía eléctrica, principalmente para satisfacer sus propias necesidades. La potencia de sus instalaciones de generación es inferior a 1.000 kW (1 MW). Estos se subdividen en dos grupos: aquellos con una capacidad menor a 100 kW y aquellos con capacidad de 100 kW hasta 1.000 kW.

Autogeneración a Gran Escala (AGGE):

Este término se refiere a personas naturales o jurídicas que producen energía principalmente para abastecer sus propias necesidades. Sus instalaciones tienen una potencia instalada que oscila entre 1 MW y 5 MW.

Generador Distribuido (GD):

Se trata de una entidad jurídica que genera energía eléctrica a través de una planta con capacidad nominal instalada menor a 1 MW. Esta planta se encuentra ubicada cerca de los centros de consumo y está conectada al Sistema de Distribución Local (SDL).

La generación distribuida emerge como una alternativa atractiva para que los países garanticen un suministro energético confiable para la población. Además de mejorar la seguridad del servicio, esta forma de generación está relacionada con los avances tecnológicos y las

centrales energéticas locales. Por ello, una de sus principales ventajas es su impacto económico, evidenciado en la reducción de los costos de infraestructura y la creación de redes de suministro proyectadas. Sin embargo, también destaca por sus ventajas técnicas, incluida la disminución de pérdidas en el sistema de distribución, y por sus beneficios socioambientales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la descarbonización y la expansión de la frontera eléctrica (Ramos, 2020).

Panorama del Sistema Energético en Colombia: Desafíos y Oportunidades

En la actualidad, el suministro energético de Colombia reposa en dos sistemas interdependientes: el Sistema Interconectado Nacional, conocido como "SIN", que abastece al 96% de la población mediante una combinación de estaciones de energía térmica y plantas hidroeléctricas, y el Sistema de Zonas No Interconectadas, denominadas "ZNI", que se encargan de cubrir el porcentaje restante (Findeter, 2021).

La eficiencia energética emerge como un pilar fundamental dentro del contexto de la energía renovable, no solo asegurando el acceso energético para la población, sino también ejerciendo un impacto positivo en la economía local y contribuyendo a la sostenibilidad de los territorios (Rue, Letschert, Agarwal , Park y Kaggwa, 2022).

A nivel global, Colombia representa tan solo el 0,28% del consumo energético, lo que lo excluye como un contribuyente significativo a las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es crucial abordar desafíos internos, como las deficiencias en la distribución energética hacia las zonas no interconectadas, que demandan atención y corrección inmediata (G. Corredor, 2018). La proyección energética colombiana para 2034 muestra una diversificación significativa: un 45% proviene de fuentes renovables, como hidroeléctricas y eólicas; un 15,78% de gas;

15,44% de energía solar; 13,19% de carbón; 0,82% de cogeneración; 0,44% de líquidos; 0,19% de biomasa y un 4,85% de otras fuentes (Corredor, 2018).

Factores clave, como la distribución eficiente de los recursos energéticos, juegan un papel determinante en la optimización de la cadena de suministro, la respuesta a la demanda y la expansión de la generación distribuida renovable. Este contexto demanda un aumento progresivo en el porcentaje de energía renovable en el país (Gutiérrez y García, 2021). Sin embargo, la demanda energética en Colombia sigue incrementándose significativamente. Entre 2021 y 2022, esta demanda aumentó un 4%, impulsada por la explotación minera y el transporte. En línea con esta realidad, el país ha establecido la meta de incrementar en un 12% la implementación de fuentes de energía no convencionales (XM, 2022).

Avanzando Hacia una Transición Energética Sostenible y Enfrentando el Cambio

Climático

La transición energética en nuestro territorio se encuentra en pleno desarrollo. Aunque las hidroeléctricas están experimentando un auge en el país en la actualidad, se vislumbra un aumento sustancial en la implementación de energía solar y eólica. Esto cobra especial relevancia al considerar las condiciones climáticas propias de Colombia, que brindan un entorno propicio para una generación eléctrica directa y abundante (Arboleda, 2020).

No obstante, antes de abordar una transición energética integral, resulta imperativo reducir la vulnerabilidad y la pobreza energética mediante mejoras en la infraestructura y la conectividad. Este enfoque, especialmente dirigido a zonas de difícil acceso, podría beneficiarse significativamente tanto al sector de producción de energía como a los sectores consumidores, alentando oportunidades de expansión y reduciendo los riesgos sistémicos potenciales (Cabrales y Delgado, 2022).

En el contexto del cambio climático, es esencial comprender que la liberación de gases de efecto invernadero tiene el potencial de generar daños de gran magnitud en todo el globo. Es importante recordar que estos gases no permanecen estáticos, sino que viajan a través del aire, disminuyendo la calidad ambiental y la capa de ozono a nivel mundial.

El incremento desmedido de la temperatura terrestre e inminente disminución de los recursos naturales ha generado conclusiones claras: la generación eléctrica procedente de fuentes convencionales, la utilización de combustibles fósiles, la deforestación, la industria y el transporte desempeñan un papel central en la problemática del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Corredor, 2018).

La transición energética demanda el compromiso de los sectores económico, social y ambiental, ya que la adopción de políticas en estos primeros puede impulsar una transición eficiente, equitativa y justa, en beneficio tanto de la población actual como de las generaciones futuras, y no solo de grupos de intereses particulares. En este sentido, es esencial que nuestro país siga siendo un actor responsable a nivel mundial, manteniendo bajas emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez fortalecerá tanto el sistema de energías renovables como el sistema eléctrico en su conjunto (Terlizzi, Gama y Jaramillo, 2021).

Marco Normativo para las Energías Renovables en Colombia: Avances y Compromisos

En Colombia, la consolidación de una transición energética eficaz ha requerido la creación de entidades de soporte clave. Entre ellas, destaca la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), responsable de establecer los requisitos energéticos del país y actualizar los Planes Energéticos. Asimismo, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha

desempeñado un papel fundamental al expedir reglas para asegurar el suministro energético y recuperar el mercado energético (Wiston, 2017).

Los cimientos de la normatividad relacionada con las energías renovables en Colombia se produjeron con la Ley 607 de 2001, marcando los primeros pasos hacia el uso racional de la energía y la exploración de fuentes alternativas. Luego, la Ley 665 de 2013 ratificó el compromiso de nuestro país con el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables, elevando el uso de energías renovables de ser una opción para convertirse en una obligación (Guerra, Montaña y Ascanio, 2021).

En el año siguiente, la Ley 1715 de 2014 establece directrices iniciales para facilitar la adopción de tecnologías innovadoras en el sector energético. Esta ley tiene como objetivo central la reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Además, se publicaron los Decretos 1623 y 2143 en 2015, que enfatizan la prioridad de fuentes de energía renovable en la generación eléctrica y ofrecen incentivos tributarios para fomentar su implementación y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En esa línea, el Decreto 2462 de 2018 se centró en simplificar los trámites requeridos para proyectos de energía renovable con capacidad menor a 10 MW, eliminando la necesidad de presentar un Diagnóstico Ambiental de Alternativas (Presidencia de la República de Colombia, 2021). En el mismo año, el Decreto 1423 establece el monto de regalías para las explotaciones de carbón y su reconocimiento de propiedad privada, considerando la producción de la materia prima (Grupo de Investigación XUÉ y Semillero de Investigación Berión, 2020).

Coincidentemente, se presentó el Plan de Expansión de Referencia Generación y Transmisión

2017-2031, resaltando la importancia del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y la necesidad de fuentes generadoras de energía para reducir el uso de combustibles fósiles (UPME, 2018).

En el ámbito de la Autogeneración a Pequeña Escala y Generación Distribuida, la Resolución CREG 030 de 2018, actualizada

a la Resolución CREG 174 de 2021, abordó temas como la autogeneración, cogeneración, venta de energía y generadores distribuidos. Esta última resolución también establece la contribución obligatoria al Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas (Gutiérrez y García, 2021). En 2021, la Ley 2099 modificó la Ley 1714 de 2014, presentando la economía circular segura como estrategia para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y propone pautas para la transición energética como motor de reactivación económica (Asoenergía, 2022). El mismo año, se lanzó la Hoja de Ruta de la Matriz Energética (MTE) y la Hoja de Ruta del Despliegue de Energía Eólica, que proponen un diagnóstico general de la situación energética del territorio, permitiendo la generación de alternativas para la planificación y desarrollo de políticas efectivas (DNP, 2022).

Diseño Metodológico

El proyecto adopta una metodología de investigación no experimental aplicada, con un enfoque mixto que combina elementos cualitativos y cuantitativos. Para alcanzar los objetivos específicos, se llevaron a cabo las siguientes fases metodológicas:

Fase 1 - Revisión Documental

Se realiza una revisión completa de la legislación y normativas vigentes en el país en relación con la generación fotovoltaica para autoconsumo y la inyección de excedentes a la red pública. Se identifican los requisitos legales y técnicos para la instalación y conexión del sistema, así como las empresas certificadas para llevar a cabo dichos proyectos.

Fase 2 - Análisis de Requerimientos

Se lleva a cabo un estudio detallado de los requisitos energéticos de la vivienda en cuestión y las condiciones geográficas que afectan la eficiencia del sistema. Se considera el consumo promedio diario, los picos de demanda y el potencial de generación solar según la ubicación.

Fase 3 - Implementación del Sistema de Generación Fotovoltaica

Con base en los resultados del análisis anterior, se diseña el sistema fotovoltaico adecuado para cubrir las necesidades energéticas de la vivienda. Se dimensionan los paneles solares, inversores y demás componentes necesarios para su instalación. Se realiza la conexión a la red pública siguiendo las normas y procedimientos establecidos.

Fase 4 - Evaluación de la Producción Energética de la Planta

Se monitorea el rendimiento del sistema durante un período determinado para evaluar la producción energética diaria, semanal y mensual. Se registran los datos y se analizan para identificar patrones de consumo y producción.

Fase 5 - Optimizar el Funcionamiento de la Planta de Generación

Con base en los datos obtenidos en la evaluación, se realizan ajustes y optimizaciones para mejorar el rendimiento del sistema. Se consideran cambios en la orientación de los paneles, el uso de sistemas de almacenamiento de energía y otras estrategias para maximizar la eficiencia.

Resultado de la Investigación

Revisión Documental

Problemática Ambiental

La acción del hombre está provocando un aumento de la temperatura global. Por esa razón, el efecto invernadero ha pasado de ser un gran aliado a ser un riesgo para la supervivencia. La inundación de ciudades costeras, la desertificación de zonas fértiles, el deshielo de masas glaciares y la proliferación de huracanes devastadores son solo algunas de sus principales consecuencias.

El efecto invernadero es un fenómeno natural y beneficioso para nosotros. Determinados gases presentes en la atmósfera retienen parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre tras ser calentada por el sol, manteniendo la temperatura del planeta a un nivel adecuado para el desarrollo de la vida. La acción del hombre —a través de actividades como la industria, la agricultura y la ganadería intensiva o el transporte—, sin embargo, ha aumentado la presencia de estos gases en la atmósfera —principalmente, dióxido de carbono y metano a consecuencia de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas—, haciendo que retengan más calor e incrementando la temperatura del planeta, lo cual se conoce como calentamiento global.

El aumento de la temperatura media terrestre trae consigo la modificación de las condiciones de vida en el planeta. las principales consecuencias de este fenómeno:

Deshielo de Masas Glaciares. El retroceso de los glaciares tiene, asimismo, sus propias consecuencias: la reducción del albedo —el porcentaje de radiación solar que la superficie terrestre refleja o devuelve a la atmósfera—, la subida global del nivel del mar o la liberación de grandes columnas de metano son solo algunas de ellas.

Inundaciones de Islas y Ciudades Costeras. Según el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), durante el periodo 1901-2010 el nivel medio global del mar se elevó 19 centímetros. Se estima que en el año 2100 el nivel del mar será entre 15 y 90 centímetros más alto que el actual y amenazará a 92 millones de personas. Esto se ve reflejado en los informes de la NASA que indican que en el último año el nivel global promedio del mar aumentó en 0,27 centímetros.

Huracanes más Devastadores. La intensificación del efecto invernadero no ocasiona estos eventos climáticos extremos, pero sí aumenta su intensidad. La formación de huracanes tiene que ver con la temperatura del mar —solo se forman sobre aguas que tienen, al menos, una temperatura de 26,51 °C—. En 2022, en España el Mediterráneo llegó a alcanzar los 31 grados, estando el 95 % de los días con una temperatura más cálida de lo habitual.

Migraciones de Especies. Muchas especies animales se verán obligadas a migrar para sobrevivir a las variaciones de los principales patrones climáticos alterados por el aumento progresivo de las temperaturas. Los últimos estudios en Canadá han confirmado que el 66 % de las aves migratorias han llegado antes de que arrancase la primavera y volaron más tarde de lo habitual, esto es debido a que los inviernos son cada vez más cortos. También el ser humano tendrá que desplazarse: según el Banco Mundial, en 2050 el número de personas obligadas a huir de sus tierras por sequías extremas o violentas inundaciones podría llegar a los 140 millones.

Desertificación de Zonas Fértiles. El calentamiento global impacta profundamente en los procesos de degradación del suelo y favorece la desertificación de zonas del planeta, un fenómeno que acaba con todo el potencial biológico de las regiones afectadas convirtiéndolas en terrenos yermos e improductivos. Tal y como reconoció la ONU con motivo del Día Mundial de Lucha contra la Desertificación en 2018, el 30 % de las tierras están degradadas y han perdido su valor real.

En los últimos años, se pierden anualmente casi el 40 % de las tierras degradadas que están a la vez en zonas vulnerables, lo cual está derivando en graves problemas para la seguridad alimentaria de casi 3.000 millones de personas según la ONU.

Impacto en la Agricultura y la Ganadería. El calentamiento global ya ha alterado la duración de la estación de crecimiento en grandes partes del planeta. De igual manera, las variaciones de las temperaturas y las estaciones influyen en la proliferación de insectos, hierbas invasoras y enfermedades que podrían afectar a las cosechas. Lo mismo sucede con la ganadería: las variaciones climáticas afectan directamente a las principales especies de múltiples formas: reproducción, metabolismo, sanidad.

Consecuencias del Efecto Invernadero en la Salud Humana

El efecto invernadero también afecta directamente a la salud humana a través de:

La Escasez de Alimentos. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) afirma que el cambio climático está sembrando serias dudas sobre la disponibilidad de alimentos: en su último informe bienal sobre el estado mundial de la agricultura y la alimentación, alerta de que un descenso en la producción agrícola derivaría en la escasez de alimentos, afectando con mayor severidad al África subsahariana y al Asia meridional.

La Propagación de Enfermedades y Pandemias. Además de los problemas derivados directamente de la contaminación, la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que el calentamiento global provocará que enfermedades infecciosas como la malaria, el cólera o el dengue se propaguen por muchas más zonas del planeta lo cual está muy relacionado con la necesidad de las personas en emigrar debido a los problemas económicos. Por su parte, el calor extremo aumentará y agravará los problemas cardiovasculares y respiratorios. En España, estudios indican que ya han existido casos de Dengue y de Zika por parte de especies autóctonas, aunque siempre de un carácter leve. Si las temperaturas siguen aumentando, existe la opción de que vuelva una de las enfermedades más temibles del continente africano.

¿Cómo Solucionar las Consecuencias del Efecto Invernadero?

Reducir la emisión de los denominados gases de efecto invernadero —como el CO₂ o el CH₄— no es la única solución para frenar el efecto invernadero. Los organismos internacionales también inciden en las siguientes recomendaciones:

Usar energías renovables. Son ellas las que impulsan avances para preservar el medioambiente y paliar la crisis de energías agotables, como pueden ser el gas y o el petróleo.

Emplear el transporte público y otros medios no contaminantes, como el vehículo o la bicicleta eléctrica.

Fomentar la concienciación ecológica entre los ciudadanos y las diferentes administraciones.

Apostar por el reciclaje y la economía circular.

Reducir el consumo de carne y el desperdicio de alimentos.

Consumir productos ecológicos.

Se conoce como acción climática cualquier política, medida o programa con miras a reducir los gases de efecto invernadero, construir resiliencia al cambio climático o apoyar y financiar esos objetivos. El Acuerdo de París (2015) fue el primer gran acuerdo internacional en esa dirección. En la COP21, cuando se firmó, 174 países y la Unión Europea acordaron trabajar con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C.

Atlas de Radiación Solar de Colombia

La UPME y el IDEAM como entidades nacionales encargadas del planeamiento energético y de la mediación de variables ambientales, realiza respectivamente, con mucho esfuerzo de sus funcionarios y directores, un primer trabajo para implementar en el IDEAM las bases de datos y metodologías para la evaluación periódica del recurso solar y la difusión de mapas con su distribución espacial en el territorio nacional.

En general, Colombia tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose la península de La Guajira, con un valor pro- Atlas de Radiación Solar de Colombia con un promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento. Las isolíneas de radiación fueron definidas con los datos de la red radiométrica del periodo 1980-2002, lo cual permitió establecer una aproximación de la distribución del recurso solar en el país. Esta información es una referencia de gran utilidad para disciplinas como la Arquitectura, la

Biología, la Ecología, la Agronomía, la Ingeniería Energética y la Medicina, entre otras. Una aproximación a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones es:

Tabla 1

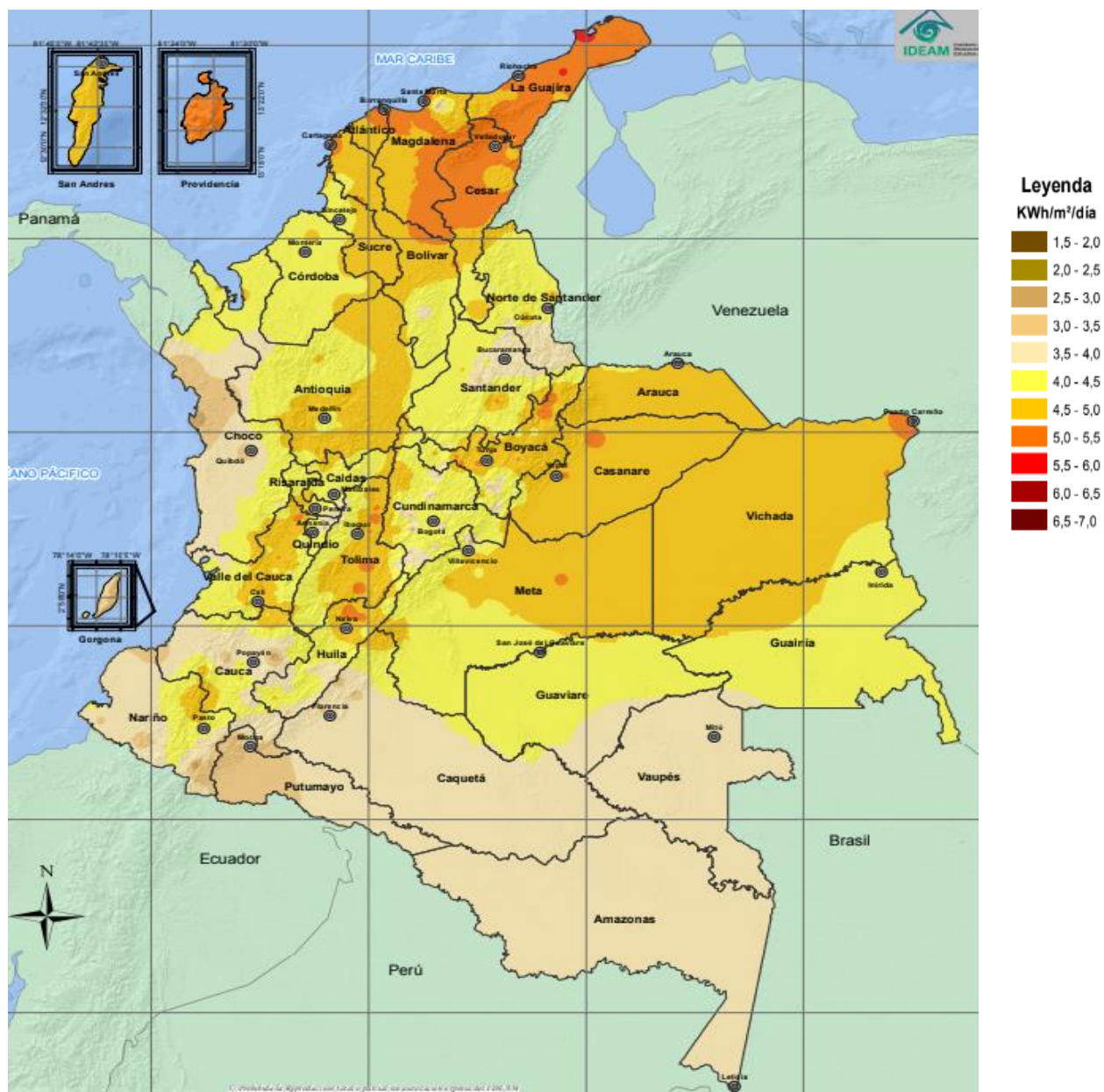
Radiación Promedio Anual

Región	kWh/m ² /año
Guajira	2.190
Costa atlántica	1.825
Orinoquia	1.643
Amazonia	1.551
Costa pacífica	1.278
Andina	1.643

Fuente. Elaboración propia

Figura 1

Radiación Diaria Promedio



Fuente. Tomado de (IDEAM, 2014) <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Normativas y Regulación

Fue necesario llevar a cabo una revisión exhaustiva de la legislación y las normativas vigentes en nuestro país, que en este caso corresponde a: Ley 1715 de 2014, que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional. Así mismo, autoriza la entrega de excedentes de energía a la red por parte de los autogeneradores y le otorga a la CREG la facultad de establecer los procedimientos para la conexión, operación, respaldo y comercialización de energía de la autogeneración a pequeña escala y de la generación distribuida.

Resolución CREG 174 de 2021, donde se regulan los aspectos operativos y comerciales para permitir la integración de la Autogeneración a Pequeña Escala (AGPE), de la Generación Distribuida (GD) al Sistema Interconectado Nacional (SIN). En esta Resolución, se establecen los mecanismos que permiten a los usuarios que generan energía para su propio consumo, conectarse al Operador de Red (OR) de manera fácil y sencilla.

Resolución CREG 135 de 2021, en la cual se establecen los mecanismos de protección y deberes de los usuarios del servicio público domiciliario de energía eléctrica que ejercen la actividad de Autogeneración a Pequeña Escala y entregan o venden sus excedentes al Comercializador que le presta el servicio.

Para ello, se analizaron detalladamente las leyes y regulaciones pertinentes, identificando los procedimientos y permisos requeridos para la implementación exitosa del proyecto. Así mismo, se asegura cumplir con los estándares de seguridad y calidad establecidos para este tipo de instalaciones.

Autores Referentes en el Campo de la Energía Solar

A través de una investigación intensa de la literatura en el ámbito de la energía solar, se ha puesto de relieve la destacada contribución de escritores cuyos trabajos han enriquecido y ampliado el conocimiento en este campo tan crucial. Entre las obras y autores más destacados, destacan:

Joseph P O'Connor, autor de "energía solar autónoma", ha proporcionado una visión integral de los principios básicos y las aplicaciones prácticas de la energía solar, facilitando la comprensión tanto para especialistas como para el público general.

Amador Martínez Jiménez, en su libro "Dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas", ha ofrecido una guía práctica para la instalación y el uso de sistemas solares en viviendas, fomentando la adopción a nivel doméstico y la transición hacia una energía más limpia.

Miguel Pareja Aparicio, en su obra "radiación solar y su aprovechamiento energético", ha explorado los vínculos entre la energía solar y la sostenibilidad, resaltando cómo esta fuente de energía puede contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y la conservación del medio ambiente.

Pedro Francisco García_Martin, autor de "energía solar fotovoltaica para todos", ha investigado sobre el funcionamiento y aplicaciones de la energía solar, demostrando cómo los sistemas solares pueden optimizar la producción y la eficiencia.

Estos escritores han dejado una huella duradera en el ámbito de la energía solar a través de sus obras. Sus contribuciones han abarcado desde los fundamentos teóricos hasta las aplicaciones prácticas en diversos contextos. Como resultado, su trabajo ha promovido una

mayor comprensión, adopción y desarrollo de la energía solar en las comunidades de todo el mundo, allanando el camino hacia un futuro energético más sostenible.

Análisis de Requerimientos

Para implementar un sistema de autogeneración de energía eléctrica fotovoltaica, es importante realizar un análisis muy riguroso de los requerimientos para asegurar que el sistema sea efectivo, seguro y adecuado para las necesidades específicas de la vivienda. Algunos de los realizados son los siguientes:

Cuantificación el consumo eléctrico actual de la vivienda. Esto implica evaluar los aparatos eléctricos y dispositivos que se utilizan y determinar la demanda energética diaria y mensual.

En la siguiente grafica se describe el consumo promedio en los últimos seis meses:

Figura 2

Grafica de Consumo Mensual



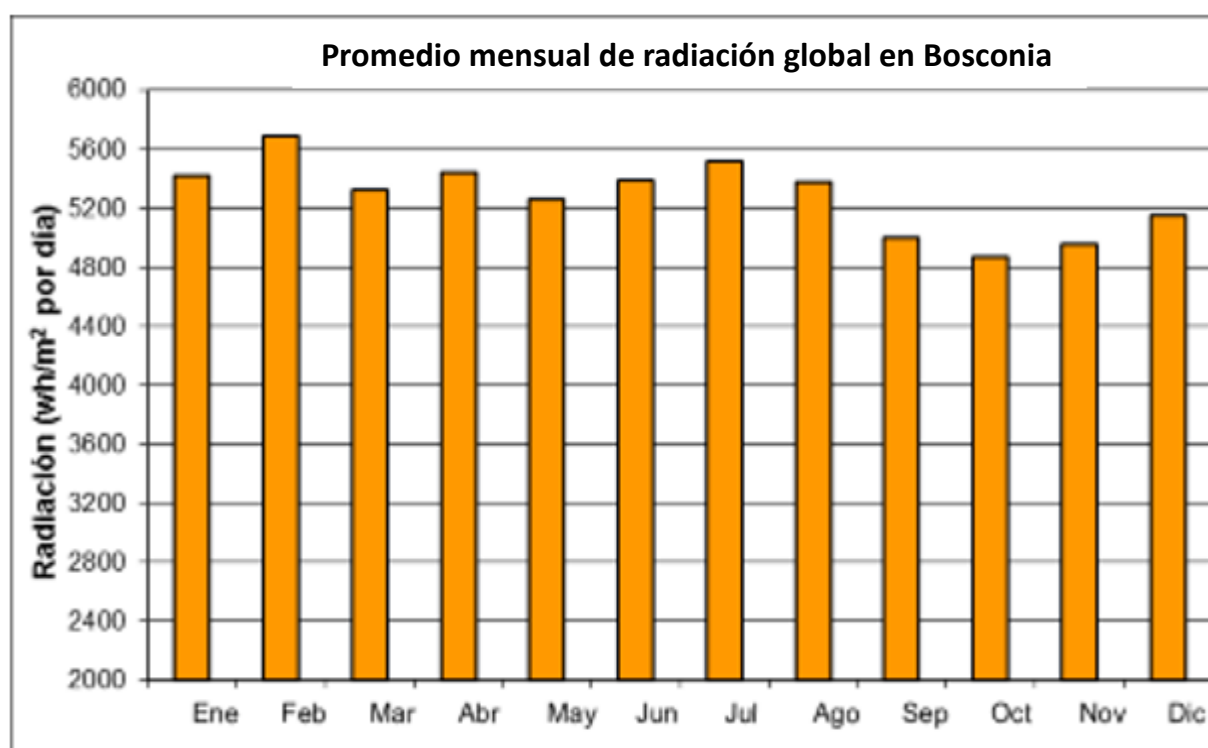
Fuente. Factura de energía propia

Teniendo en cuenta el consumo promedio diario de **13.92kWh** se puede inferir que la producción diaria debe ser superior a ese valor.

Se evalúa la cantidad de radiación solar disponible en el lugar donde se instalarán los paneles fotovoltaicos. Esto es fundamental para determinar la eficiencia esperada del sistema y la capacidad de generación de energía. En el municipio de Bosconia las horas solares pico de radiación solar (HSP) son de **5.0 a 5.5** horas.

Figura 3

Promedio Mensual de Radiación



Fuente. Tomado de (IDEAM, 2014) <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

En la imagen se presenta el promedio de radiación solar en Bosconia, evidenciándose el alto grado de radiación que tiene la zona.

Se determina el espacio disponible para la instalación de los paneles fotovoltaicos, considerando la orientación, inclinación y sombreado potencial. La ubicación adecuada es esencial para optimizar el rendimiento del sistema. Luego se procede a determinar el tipo y la capacidad adecuada del inversor y los paneles que transformarán la energía fotovoltaica en electricidad alterna utilizable. Se realiza un análisis del factor costo/beneficio. Se evalúan los requisitos y procedimientos para la conexión del sistema a la red eléctrica. Esto incluye la coordinación con la compañía eléctrica y la obtención de los permisos necesarios. Así mismo, se evalúan los requisitos de mantenimiento del sistema y las garantías ofrecidas por los proveedores de los equipos. También es muy importante considerar el impacto ambiental del proyecto y se asegura de que cumpla con prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Implementación de la Planta

Luego de realizar el análisis de requerimientos y determinar la viabilidad geográfica, se define un plan de acción para implementar el proyecto, el cual consiste en realizar los cálculos para conocer el dimensionamiento de la planta, teniendo en cuenta los datos de radiación de la zona y el análisis de carga.

Inicialmente es necesario establecer el promedio de consumo mensual (PCM) del último año (debido a que la vivienda es de construcción reciente solo se cuenta con datos de consumo de los últimos seis meses), este valor se usará para calcular el promedio de consumo diario (PCD) el cual se define como: 13.92kWh, luego se establecen las horas de sol pico (HSP) de acuerdo a la información obtenida de IDEAM equivale de **5 a 5.5** horas, pero por seguridad tomaremos el valor más bajo (5 HSP), se define un porcentaje de pérdidas (P) teniendo en cuenta aspectos como reducción de potencia por temperatura en paneles, resistencia eléctrica de cables, eficiencia del inversor, etc., este valor será de (P = 25%).

Teniendo clara la información anterior, es necesario hallar la potencia pico de generación (WP), la cual será encontrada usando la siguiente ecuación:

$$PCD * P / HSP = WP$$

Realizamos la operación:

$$\frac{13.92kWh * 1.25}{5h} = 3.48kW$$

Luego, teniendo la potencia pico de generación la dividimos por la potencia pico de los paneles a adquirir. Debido a disponibilidad del mercado se preseleccionan paneles de 345W.

$$\frac{3.48kW}{0.345kW} = 10 \text{ unidades}$$

El análisis concluye que, para alcanzar la potencia pico de generación calculada, serán necesarios 10 paneles de 345W. Sin embargo, dado que el objetivo principal del proyecto es asegurar una reducción total del cobro en la factura de energía, se ha decidido aumentar la capacidad de generación en un 20%. En consecuencia, la cantidad de paneles necesarios serán 12 unidades, entregando una potencia pico de 4140W.

El inversor se calcula de acuerdo con la potencia de pico generación en AC la cual debe ser de por lo menos de 3.48kW, en este caso se preselecciona un inversor ON GRID de 3.6kW y potencia máxima en DC de 5040W.

Las protecciones en DC se calculan multiplicando la I_{sc} (corriente de corto circuito) de cada String por un factor de seguridad de 1.56.

$$9.31A * 1.56 = 14.5A$$

Debido a que este valor no es comercial, se establece un valor de 16A en las protecciones DC.

Las protecciones en AC se calculan multiplicando la corriente máxima del circuito por un factor de seguridad de 1.56.

$$17.2A * 1.56 = 26.8A$$

Debido a que este valor no es comercial, se establece un valor de 25A en las protecciones AC.

Criterio Para la Selección de Equipos

Luego de realizar una preselección de los equipos más importantes, la selección lleva a cabo un análisis exhaustivo considerando diversos aspectos clave: calidad, eficiencia, durabilidad y costo. Estos criterios son fundamentales para asegurar que los equipos seleccionados cumplan con los estándares más altos en términos de rendimiento, confianza y economía, garantizando así el éxito y la eficacia del proyecto en su conjunto.

Se ha optado por utilizar paneles de la marca Jinko Solar, los cuales cuentan con una potencia pico de 345W y utiliza tecnología monocristalina. Esta elección se basa en la valoración de su alta eficiencia en condiciones de poca luz, como en días nublados, aunque en condiciones normales pueden verse afectadas por la temperatura. A pesar de esta consideración, se ha determinado que esta tecnología es la mejor opción, principalmente debido a su relación costo-beneficio en comparación con la tecnología policristalina. Los paneles monocristalinos, además de superar las certificaciones exigidas por la reglamentación colombiana, ofrecen una garantía de producción de energía del 80% a 25 años, lo que proporciona una mayor confianza en su desempeño a largo plazo.

En resumen, la elección de los paneles Jinko Solar monocristalinos se ha fundamentado en su eficiencia en condiciones de poca luz, su adecuada relación calidad-precio, el cumplimiento de las normativas locales y la garantía de producción energética a lo largo de su vida útil. Estas características hacen de esta opción la más adecuada para asegurar el máximo rendimiento y beneficio en el proyecto.

Tabla 2*Características de los Paneles*

Características de los Paneles	
Marca	JINKO
Potencia máxima (Pmp)	345 W
Tensión de circuito abierto (Voc)	47.3 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.31 A
Tensión en la potencia máxima (Vmp)	38.9 V
Corriente en la potencia máxima (Imp)	8.87 A
Eficiencia del módulo nm	17.78%
Certificación	RETIE

Fuente. Elaboración propia

Se ha optado por un inversor de la marca Growatt, específicamente el modelo MIN 3600TL-X, debido a sus características sobresalientes y adecuadas para el proyecto. Este inversor cuenta con las certificaciones requeridas por la regulación nacional: UL1741, IEEE1547, además de otras pertinentes en la Unión Europea, lo que asegura su conformidad con los estándares de seguridad y funcionamiento.

El inversor MIN 3600TL-X de Growatt destaca por su alta eficiencia, alcanzando un notable 98,7%. Asimismo, su diseño incluye características valiosas como doble MPPT para optimizar la captura de energía solar, un voltaje máximo en CC de hasta 550V, monitoreo en línea gratuito, protecciones SPD II, interruptor de CC, control de exportación, entre otras funcionalidades esenciales.

Una de las ventajas de esta elección es su costo relativamente bajo en relación con su rendimiento y las prestaciones que ofrece. Esta combinación de eficiencia, funcionalidades avanzadas y un precio competitivo posiciona al inversor Growatt MIN 3600TL-X como una

excelente opción para el proyecto. Este equipo genera certeza de que contribuirá significativamente a la eficiencia y el éxito global del sistema de generación de energía eléctrica.

Tabla 3

Características del Inversor

Características del Inversor	
Máximo voltaje VDC	550V
Máxima corriente de entrada A DC	16 ^a
Datos de Salida	
Potencia nominal AC (220V)	3600W
Corriente máxima de salida	16 ^a
Frecuencia a la red CA	50Hz/60Hz \pm 5Hz
Factor de potencia ajustable	< 0.8 >
Certificaciones y Seguridad	
Certificación	UL1741
Conexión a RED	IEEE1547

Fuente. Elaboración propia

Se opta por el medidor bidireccional de la marca ISKRA modelo: MT-174 debido a su capacidad para cumplir con los rangos de tensión y corriente requeridos. Además, este medidor cuenta con las certificaciones necesarias según las normativas aplicables, lo que respalda su conformidad con los estándares de calidad y seguridad establecidos.

Figura 4*Características Medidor Bidireccional*

Especificaciones técnicas			MT174-D2 DIN	MT174-T1 DIN
Tensión nominal	Un		3x120/208 V	
Rango de tensión			0,8 - 1,15 Un	
Corriente	Corriente base	In	5 A	1 A
	Corriente máxima	Imax	120 A	6 A
Clase de Exactitud	Energía activa		Clase 1 (IEC 62053-21 NTC 4052)	
	Energía reactiva		Clase 2 (IEC 62053-23 NTC 4569)	
	Energía aparente		Clase 2	
Reloj tiempo real	Precisión		Mejor que ± 3 min/año a 23°C	
	Alimentación de respaldo		Pila Li: 5 años operac. hasta 20 años	
Rango temp. IEC 62052-11	Operación		-40°C...+60°C, extend. -40°C...+70°C	
	Almacenamiento		-40°C ... +80°C	
Protección ingreso polvo y agua			IP54	
Consumo			0.6 W / 10 VA (sin RS485) 0.8 W / 10 VA (con RS 485)	

Fuente. Tomado de [https://suneoenergy.com.co/medidor-bidireccional-iskra-mt174-3f2f1f-](https://suneoenergy.com.co/medidor-bidireccional-iskra-mt174-3f2f1f-208120vac60hz-con-protocolos-1)

[208120vac60hz-con-protocolos-1](https://suneoenergy.com.co/medidor-bidireccional-iskra-mt174-3f2f1f-208120vac60hz-con-protocolos-1)

Los componentes menores, como cables, tuberías y sistemas de protección fueron escogidos siguiendo una meticulosa evaluación basada en criterios de calidad y una sólida relación costo-beneficio, cumpliendo también las certificaciones exigidas por la norma. Cada uno de estos elementos desempeña un papel fundamental en el funcionamiento integral del sistema, por lo que su elección fue realizada con el objetivo de asegurar un rendimiento óptimo y una inversión eficiente.

Presupuesto

Se realiza un análisis económico para evaluar la viabilidad del proyecto. Esto incluye el cálculo del costo total de inversión, el tiempo de retorno de la inversión, los ahorros esperados en la factura de energía y los posibles beneficios fiscales o incentivos gubernamentales. En la siguiente tabla se detalla el tipo y costo de cada componente:

Tabla 4

Presupuesto

Cant.	Descripción	Costo unitario	Costo total
1	Inversor Growatt 3.6kW	\$2.600.000	\$2.600.000
12	Panel solar Jinko 345W	\$800.000	\$9.600.000
1	Equipo de monitorización ShineWIFI-X	\$350.000	\$350.000
1	Tablero y protecciones DC	\$600.000	\$600.000
1	Tablero y protecciones AC	\$400.000	\$400.000
90	Cableado fotovoltaico por metro	\$4.800	\$432.000
6	Tubería galvanizada certificada	\$65.000	\$390.000
1	Obra civil construcción estructura paneles	\$2.600.000	\$2.600.000
1	Certificación RETIE	\$2.500.000	\$2.500.000
1	Medidor bidireccional	\$880.000	\$880.000
1	Servicio de ingeniería, estudio de conexión y asesoría	\$2.300.000	\$2.300.000
1	Otros accesorios	\$600.000	\$600.000
		Total	\$23.252.000

Fuente. Elaboración propia

Después de haber definido los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto se procede a realizar los trámites pertinentes con el operador de red para garantizar la disponibilidad de red y adjuntar la documentación necesaria para iniciar el trámite de solicitud de conexión como AGPE.

La documentación necesaria incluye:

- a.** Formulario de conexión simplificado.
- b.** Certificado de capacitación o experiencia en la instalación tipo.
- c.** Manual de inversores o dispositivos que controlan la inyección.
- d.** Archivo de disponibilidad de red
- e.** Demostración de normas de inversores
- f.** Diagramas unifilares, conexión de sistema a tierra, esquema de protecciones, distancias de seguridad y cuadro de cargas
- g.** Certificación RETIE de la instalación (se debe entregar después de la aprobación del proyecto, pero antes de la solicitud de entrada en operación).

Planos de Proyecto y Diagrama Unifilar

Figura 5

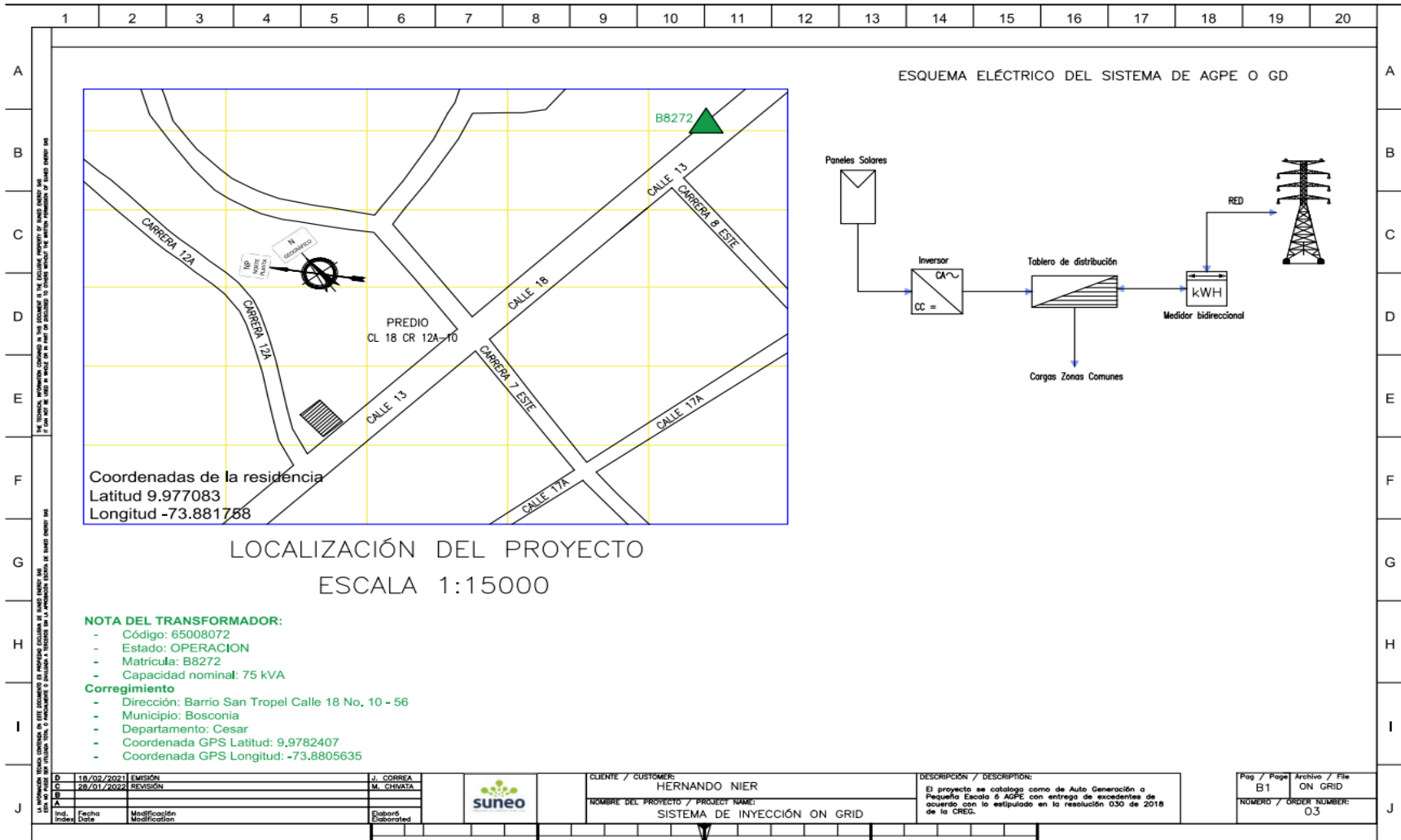
Simbología Eléctrica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	SIMBOLOGIA ELECTRICA																			
B																				
C	PANELES FOTOVOLTAICOS	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO BIPOLAR	FUSIBLES	DPS	BATERIA	INVERSOR DC/AC	INVERSOR DC/AC													
D																				
E																				
F	INTERRUPTOR DIFERENCIAL	BORNAS DE CONEXIÓN	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO TRIPOLAR	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO MONOPOLAR	MEDIDOR BIDIRECCIONAL TRIFASICO	MEDIDOR BIDIRECCIONAL	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN													
G																				
H																				
I	PUESTA A TIERRA																			
J	ID: 18/09/2024 EMISIÓN 28/01/2022 REVISIÓN		J. CORREA M. CHAVATA				CLIENTE / CUSTOMER: HERNANDO NIER NOMBRE DEL PROYECTO / PROJECT NAME: SISTEMA DE INYECCIÓN ON GRID				DESCRIPCIÓN / DESCRIPTION: El proyecto se cataloga como de Auto Generación o Pequeño Exento ó AGPE con entrega de excedentes de acuerdo con lo estipulado en la resolución 030 de 2018 de la CREC.				Pag / Page: A1 / ON GRID Archivo / File: NUMERO / ORDER NUMBER: 0.3					

Fuente. Elaboración propia

Figura 6

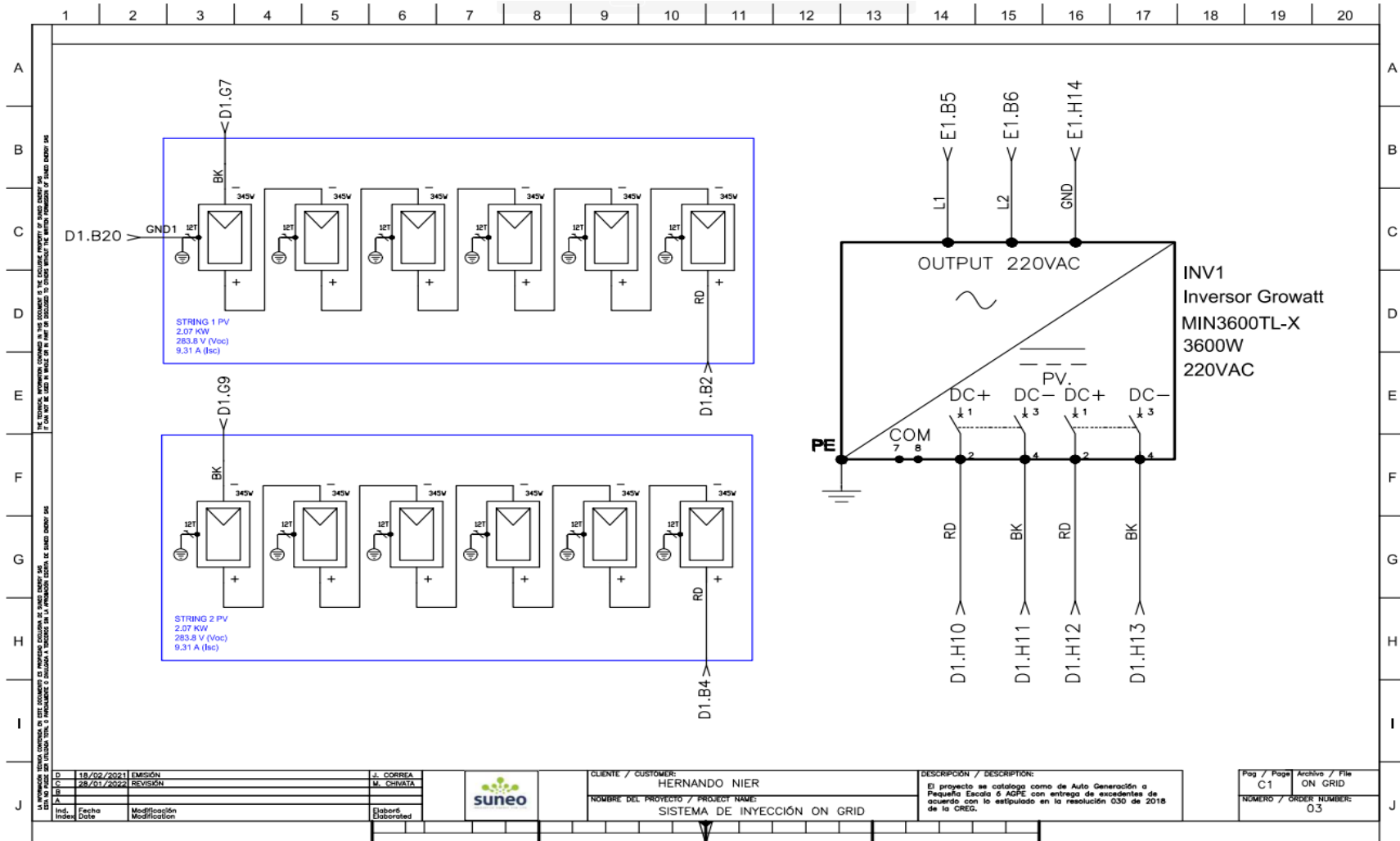
Localización del Proyecto



Fuente. Elaboración propia

Figura 7

Conexiones Eléctricas de Paneles e Inversor

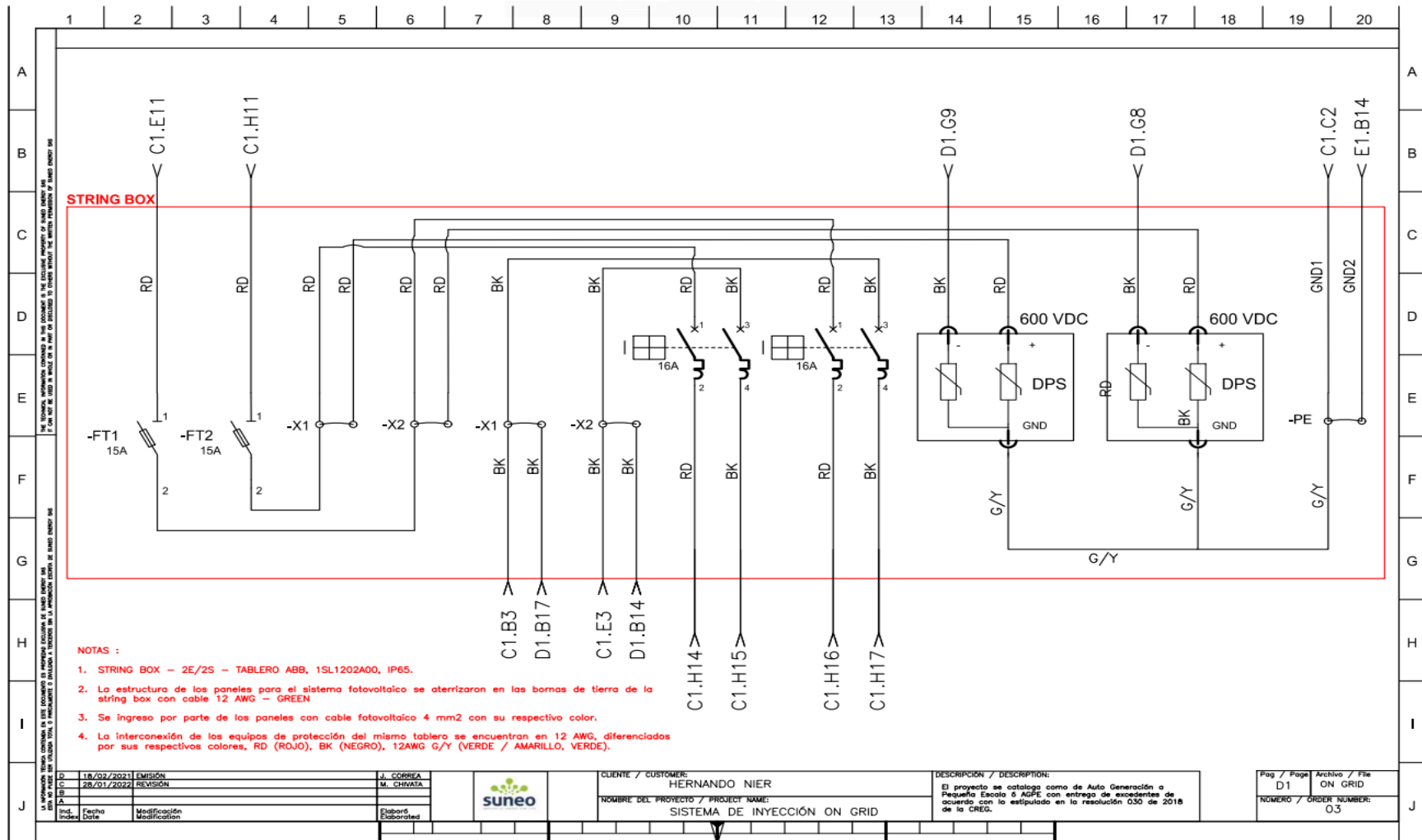


D	18/02/2021	EMISIÓN	J. CORREA	CLIENTE / CUSTOMER:	HERNANDO NIER	DESCRIPCIÓN / DESCRIPTION:	El proyecto se cataloga como de Auto Generación a Pequeña Escala ó AGPE con entrega de excedentes de acuerdo con lo estipulado en la resolución 030 de 2016 de la CREG.	Page / Page	C1	Archivos / File	ON GRID
C	28/01/2022	REVISIÓN	M. CHIVATA	NOMBRE DEL PROYECTO / PROJECT NAME:	SISTEMA DE INYECCIÓN ON GRID			NUMERO / ORDER NUMBER:	03		
A											
J	Fecha / Ingreso	Modificación / Modification	Elaborado / Elaborated								

Fuente. Elaboración propia

Figura 8

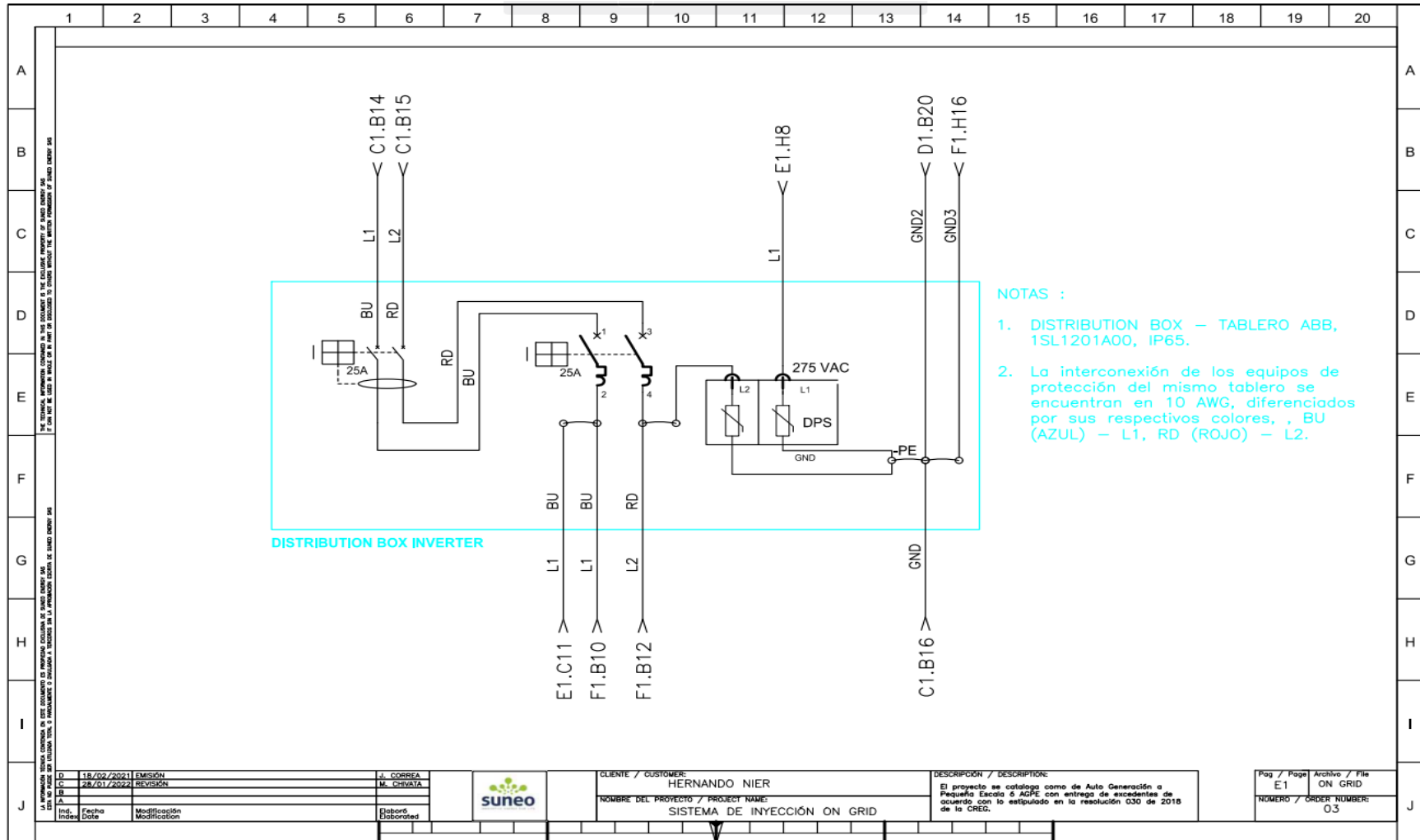
Conexiones Tablero DC



Fuente. Elaboración propia

Figura 9

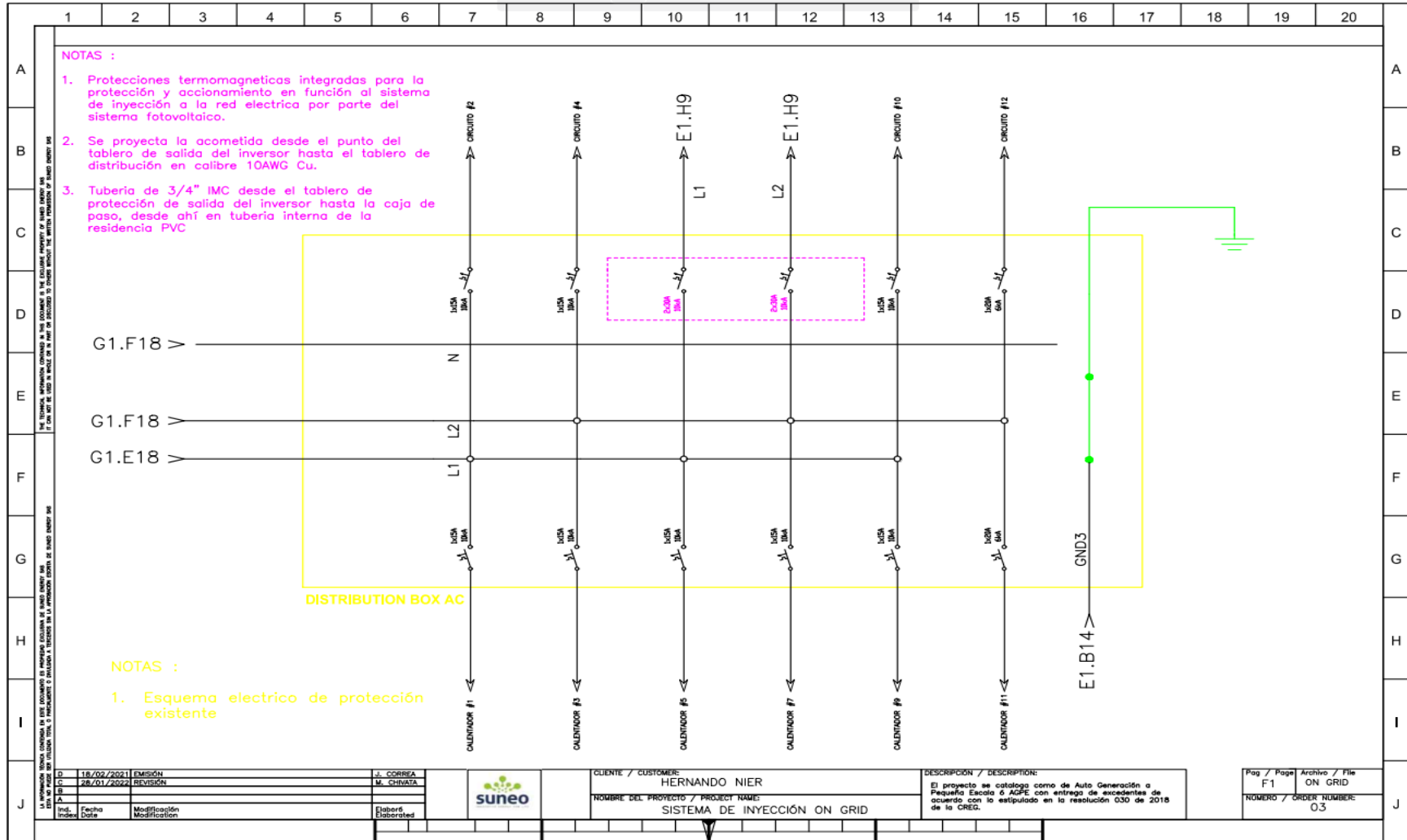
Conexiones Tablero AC



Fuente. Elaboración propia

Figura 10

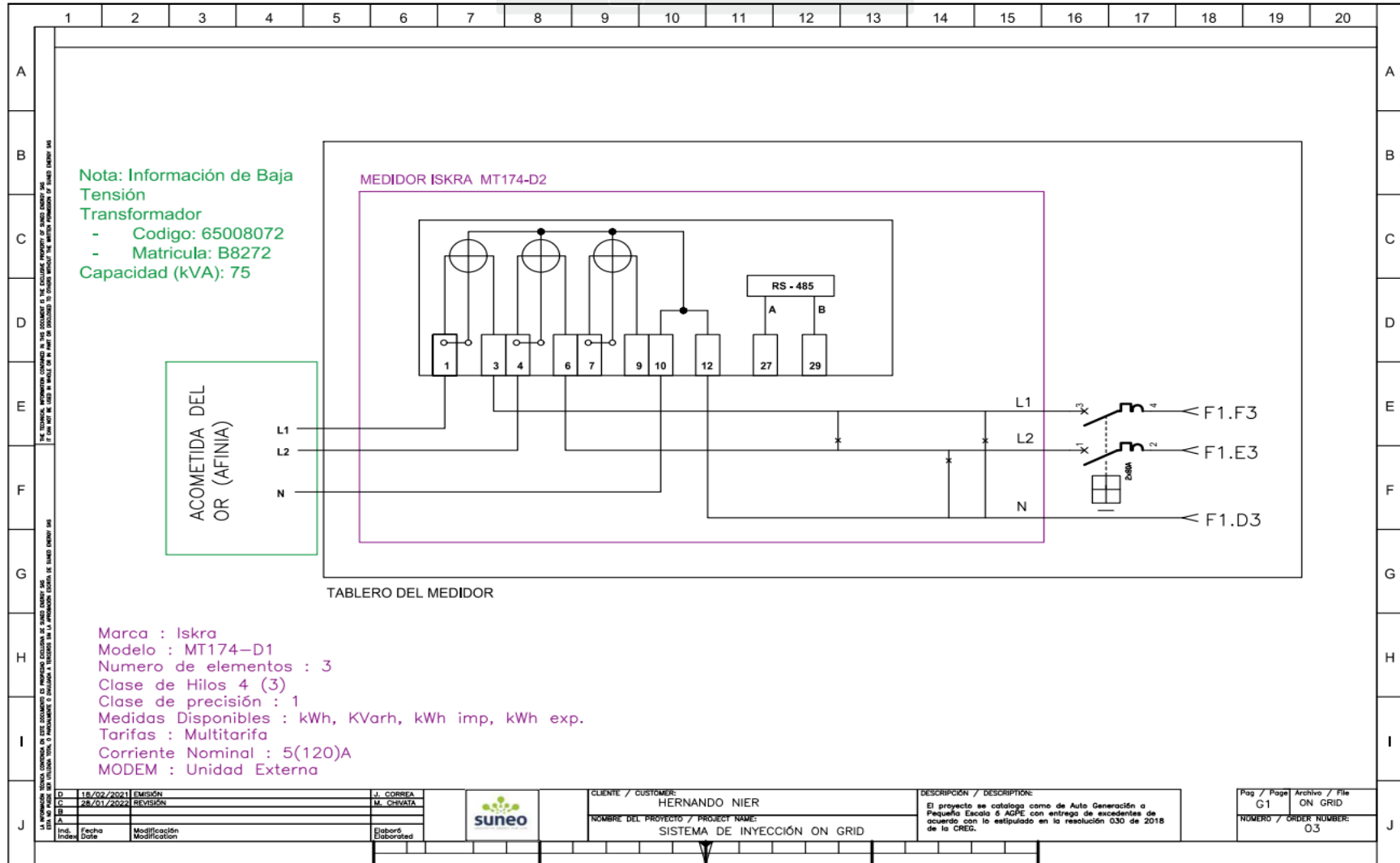
Conexiones Tablero Principal de Residencia



Fuente. Elaboración propia

Figura 11

Conexiones Medidor Bidireccional



Fuente. Elaboración propia

Luego de recibir la aprobación por parte del Operador de red (OR) la normativa establece un periodo de seis (6) meses para la entrada en operación (prorrogable 3 meses más), durante este tiempo se procedió con la instalación del sistema fotovoltaico en el lugar determinado. Siguiendo las instrucciones del fabricante de los equipos, se procedió a configurar y parametrizar el inversor de acuerdo con los requisitos de red.

Teniendo listo el montaje de los equipos y habiendo realizado algunas pruebas de funcionamiento se contrató a una empresa que realizara el dictamen de inspección y verificación del cumplimiento del RETIE. El dictamen de dicha inspección fue: “APROBADO”.

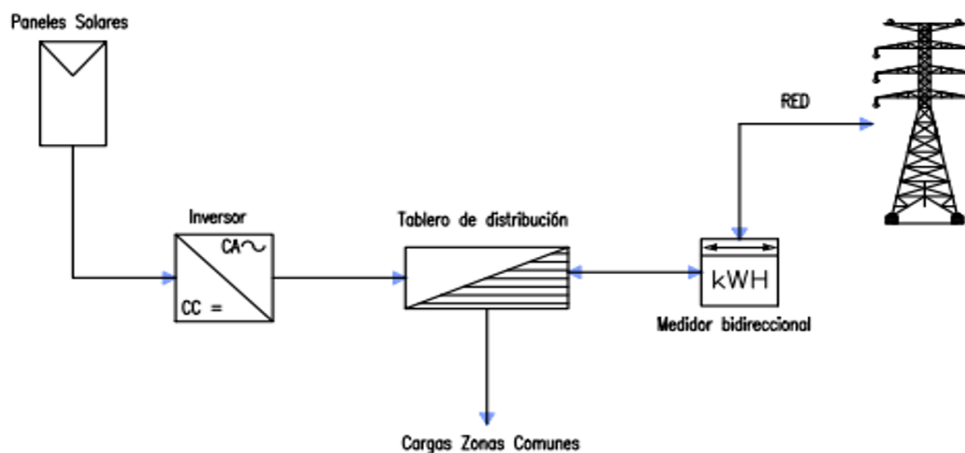
Se procedió a solicitar la visita de conexión, en la cual se realizó una inspección del proyecto por parte del operador de red y se instaló el medidor bidireccional que guardará el registro de los valores de energía consumidos y exportados en cada momento del día.

Diagrama de Bloques de Funcionamiento del Proyecto

En el siguiente diagrama de bloques se representa el esquema eléctrico de funcionamiento del proyecto de Auto Generación de Pequeña Escala (AGPE).

Figura 12

Esquema Eléctrico General



Fuente. Elaboración propia

Imágenes de Implementación

Figura 13

Montaje de Paneles



Fuente. Elaboración propia

Figura 14

Montaje de Inversor



Fuente. Elaboración propia

Figura 15

Montaje Tableros de Protecciones DC y AC



Fuente. Elaboración propia

Figura 16

Imagen General de Montaje



Fuente. Elaboración propia

Figura 17*Medidor Bidireccional*

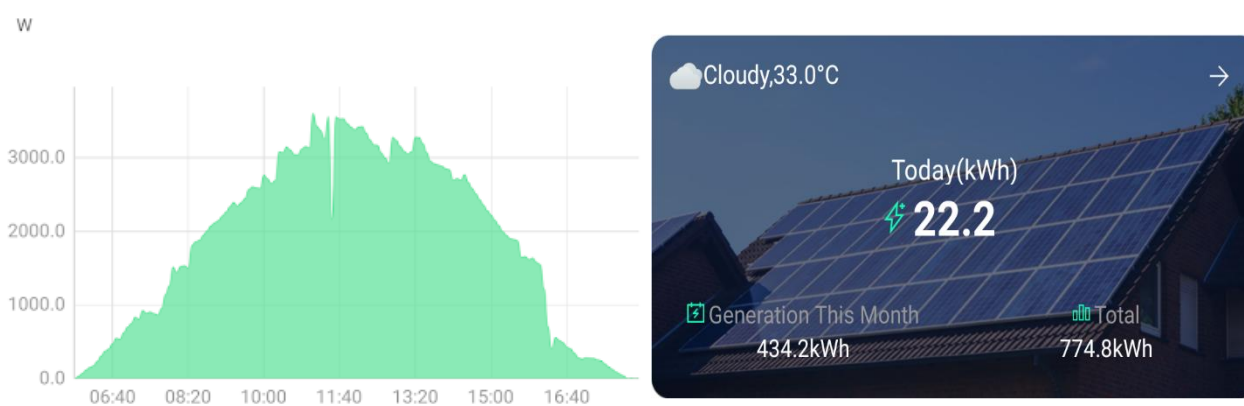
Fuente. Elaboración propia

Evaluación de la Producción de la Planta

Se realiza prueba de funcionamiento y se obtienen los datos reales que permiten realizar las proyecciones que den certeza de la eficiencia de funcionamiento y periodos de amortización de la planta solar.

Figura 18

Graficas de Generación Solar



Fuente. Elaboración propia

La activación del inversor se produce ligeramente antes de las 6:00 am, momento a partir del cual inicia el proceso de sincronización con la red y la administración de la energía, ajustándola en correspondencia con la potencia solar en cada instancia del día. El análisis gráfico exhibe el patrón de entrega de energía del sistema, destacándose el pico de máxima potencia alrededor de las 11:40 am, con un registro aproximado de 3300W. A medida que disminuye la intensidad de la radiación solar, se observa una reducción proporcional en la generación de energía, hecho que se manifiesta igualmente cuando nubes transitorias interfieren en el proceso de producción (tales momentos de caída abrupta son visualizables en la gráfica). El inversor culmina su operación a las 6:00 pm.

Tras un mes de funcionamiento (agosto de 2023), resulta factible derivar estimaciones con respecto a la producción anual de la instalación. Basados en la producción energética de este período, cifrada en 549 kWh, y en una medición con las pautas de radiación proporcionadas por el IDEAM (Figura 3), se puede concluir preliminarmente que este valor tenderá a constituir la media de generación a lo largo del año. Naturalmente, hay que considerar la posibilidad de fluctuaciones en la producción mensual a lo largo de todas las estaciones del año.

Este desempeño del sistema concuerda satisfactoriamente con las proyecciones iniciales, generando un alto grado de satisfacción, especialmente en lo relativo al factor crítico del "tiempo de amortización". A la luz de los datos de generación obtenidos y considerando la demanda energética estimada para la vivienda, en torno a 450 kWh/mes, puede inferirse que el periodo de recuperación de la inversión se verá consumado en un lapso no superior a 7 años. Transcurrido este intervalo, los ahorros generados por el proyecto se traducirán en beneficios económicos palpables, los cuales experimentarán un incremento en consonancia con el aumento del costo por kWh en el tiempo.

Es imperativo considerar que este proyecto, además de su innegable interés económico, ostenta un marcado compromiso ambiental. El sobredimensionamiento del proyecto ha sido concebido para permitir la generación y entrega de una proporción significativa de energía en calidad de excedentes, los cuales no serán computados ni como consumo directo ni como créditos de energía, sino que hallarán valoración con base en las cotizaciones en bolsa del mercado de energía nacional y se considerará como un aporte hacia la reducción de la huella de carbono generada en otras actividades. En este sentido, los 100 kWh excedentes de energía resultantes serán compensados por el operador de la red (en este caso, AFINIA) a un precio fluctuante en el rango de 200 a 350 pesos. Esta modalidad representa, sin embargo, una subutilización

considerable de la producción energética, dado que el valor cobrado por el Operador de red por kWh consumido roza los 900 pesos.

Este sobredimensionamiento ejerce una influencia directa en el periodo de amortización. La necesidad de adquirir un mayor número de paneles solares y otros componentes para generar estos excedentes ha elevado el valor de la inversión total. Si el enfoque hubiera estado exclusivamente en satisfacer las demandas energéticas del hogar, el tiempo requerido para recuperar la inversión habría sido significativamente menor. En esta modalidad llamada “Consumo directo”, cada kWh consumido durante el día (cuando la producción solar coincida al menos con la demanda de la vivienda) habría sido valorado al mismo precio al que se vende en la red, es decir, al costo unitario del kWh de ese mes. Las instancias de consumo en horas desprovistas de generación solar (noches o madrugadas) se habrían compensado mediante el mecanismo denominado "Crédito de energía", el cual implica la devolución de la energía entregada a la red en días en que la producción exceda la demanda doméstica, pero que no exceda la demanda global del mes. En este contexto, la Resolución CREG 174 de 2021 estipula que el operador de la red solo tendría derecho al pago por el uso de su infraestructura, reflejado en el componente "C" del Costo Unitario por cada kWh compensado, que para el presente mes se cotiza en 126 pesos.

A través de un análisis más detenido, acentuando la perspectiva económica, se infiere que resulta sumamente ventajoso emprender un proyecto que genere una cantidad de energía equiparable o ligeramente superior a la demanda doméstica. En tal escenario, la energía volcada a la red adquiere una valoración más beneficiosa para el consumidor y, además, la inversión requerida y el periodo de amortización disminuirían notablemente. Tomando como referencia el

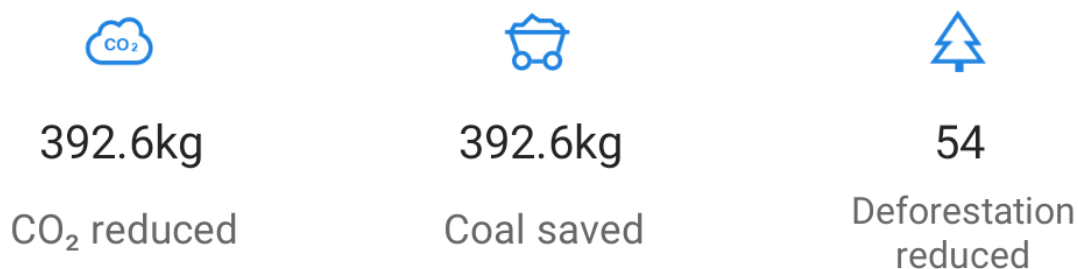
proyecto actual, es estimable que se podría haber reducido el periodo de amortización en al menos siete meses.

En aproximadamente dos meses de funcionamiento, se ha generado un total de 981 kilovatios-hora (kWh) de energía, si se toma como referencia el factor de emisión de CO₂ global dará como resultado en un ahorro significativo de 392,6 kilogramos de dióxido de carbono (CO₂) que de otro modo habrían sido liberados a la atmósfera. Este logro subraya de manera evidente la importancia de adoptar tecnologías energéticas más limpias en la transición hacia un futuro más sostenible.

En el contexto colombiano, conocido por su matriz energética limpia, el impacto es un poco menos notable, debido a que cada kWh de energía que se genera en Colombia en promedio se emiten solo 164 gramos de CO₂, lo que resalta la fortaleza de la matriz energética colombiana. Estos resultados no solo demuestran nuestra contribución activa a la lucha contra el cambio climático, sino también la relevancia de seguir invirtiendo en tecnologías energéticas limpias.

Figura 19

Emisión de CO₂



Fuente. Elaboración propia

Optimización de Funcionamiento de la Planta de Generación Solar

Para optimizar la planta de generación se debe analizar minuciosamente la producción energética del sistema, monitorear su rendimiento a lo largo de un período específico y evaluar la generación diaria, semanal y mensual de energía. Todos estos datos se registran y someten a un detallado análisis para detectar patrones de consumo y producción. Una vez recopilada y analizada la información, se procede a determinar los aspectos que podrían mejorar el funcionamiento del sistema. Además, se implementa un plan de mantenimiento preventivo con el propósito de garantizar el máximo rendimiento energético y reducir los riesgos de posibles caídas de producción.

Este enfoque integral y metódico asegura un rendimiento óptimo y sostenible del sistema de generación de energía, lo que resulta en beneficios tanto económicos como ambientales. La combinación de análisis riguroso, optimización y mantenimiento proactivo permite alcanzar los objetivos establecidos, asegurando así una generación eficiente y confiable de energía a lo largo del tiempo. Además, el monitoreo constante y el análisis de datos son fundamentales para ajustar y mejorar el sistema según sea necesario, lo que garantiza que la instalación funcione de manera óptima en todo momento y se adapte a cualquier cambio en las condiciones o demandas energéticas.

Conclusiones

Se ha dado claridad de las intenciones y el alcance del proyecto que busca dar solución al problema en cuestión, de este modo y siendo conscientes de las limitaciones presentes, se ha planteado una solución que permite ser desarrollada cumpliendo las condiciones establecidas por la universidad.

El sistema fotovoltaico con conexión a red propuesto es viable desde el punto de vista financiero y puede ser implementado, puesto que se espera recuperar la inversión en aproximadamente 7 años a partir de la fecha de implementación. Además, se determina su sostenibilidad ambiental, dejando de emitir gases de efecto invernadero al medioambiente, contribuyendo con ello a la mitigación del calentamiento global y, por consiguiente, al cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Gutiérrez A. y García J., «Fuentes de Energía Renovable, Recursos Energéticos Distribuidos y Almacenamiento en Colombia: una revisión de la normatividad,» Economía y Finanzas, n° 21, 2021
- Laborde M. & Williams R., (2016). Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y naturales, Energía solar, Buenos Aires.
- Ackerman, S. E., y Com, S. L. (2013). Metodología de la investigación. Buenos Aires, AR: Ediciones del Aula Taller. (pp. 31 - 44).
<https://elibronet.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/76246?page=31>
- Acolgen (2022) Matriz de generación eléctrica colombiana.
<https://acolgen.org.co/#:~:text=La%20matriz%20de%20generaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica,son%20plantas%20de%20fuentes%20renovables.>
- Asoenergía, «Informe Sectorial No. 52,» Asociación Colombiana de Grandes Comunidades de Energía Industriales y Comerciales, Bogotá D.C., 2022.
- Círculo de empresarios, Transición energética para un futuro sostenible: retos y oportunidades, Documentos Círculo, 2020.
- Córdoba, M. (2011). Formulación y evaluación de proyectos. Ciclo de vida de los proyectos. (pp. 8-16) <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/ereader/unad/69169?page=23>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP, «Política de Transición Energética (CONPES 4075),» Bogotá D.C., 2022.

- Ramos E. «La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación,» Forseti: Revista de derecho, vol. 8, n° 11, pp. 7-35, 2020.
- Vivanco E. Energías renovables y no renovables: Ventajas y desventajas de ambos tipos de energía, Santiago de Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2020.
- Climate consulting by selectra. (2022) <https://climate.selectra.com/es/que-es/energias-renovables>
- Estadísticas del Sector Eléctrico Colombiano (27 de marzo de 2022) Comisión de regulación de energía y gas CREG. <https://www.creg.gov.co/sectores-que-regulamos/energia-electrica/estadisticas-del-sector-electrico-colombiano>
- Moreno F, Rodriguez L, Olaya L, Peña M y Bustos O. (2019). Evaluación de desarrollo para la implementación de la energía fotovoltaica en el municipio de Tame-Arauca, Bogotá D.C.: Corporación Universitaria UNITEC, X.
- Findeter. (2021). «Estudio del sector energético colombiano,» Financiera de Desarrollo Territorial, Colombia.
- Corredor G. (2018) «Colombia y la transición energética,» Ciencia y Política, vol. 13, n° 23, pp. 107-125, 2018.
- Grupo de Investigación XUÉ y Semillero de Investigación Berión, Regulación del Sector Energético, Bogotá D.C.: Región Central, 2020.
- Arboleda J. (2020). «Colombia entró en la era de la transición energética,» Revista de Energías Renovables de la Universidad EAFIT.
- Roldán J. (2008) Fuentes de energía, Madrid: Paraninfo.

Galán M. (2009). Metodología de la investigación <http://manuelgalan.blogspot.com/2009/09/que-es-un-diseno-basico-metodologico.html>

Badii M, Guille A. & Abreu J. (2016). «Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation),» Daena: International Journal of Good Conscience, vol. 11, n° 1, pp. 141-155.

Guerra M, Montaña J & Ascanio N. (2021). «Implementación de energías renovables como garantía al derecho fundamental a un ambiente sano en Colombia,» CES Derecho, vol. 12, n° 2, pp. 87-106.

Ministerio de Minas y Energía. (2021). Transición energética: un legado para el presente y futuro de Colombia, Bogotá D.C.: Gobierno de Colombia.

Bertinat P. (2016). «Transición energética justa. Pensando la democratización energética,» ANÁLISIS - FRIEDRICH EBERT STIFTUNG, n° 1.

Provisión de agua potable (27 de marzo de 2022) ABC en el este.

<https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/provision-de-agua-potable-627628.html>

Solarama mayoristas en energía solar. (2019). ¿Qué es un panel solar y cómo funciona?

<https://solarama.mx/blog/que-es-un-panel-solar/>

Luz, (2022). ¿Qué es el suministro de energía eléctrica? <https://energia.roams.es/luz/suministro-energia/>

BBVA, (2021). ¿Qué es la energía eléctrica? Energía Eléctrica.

<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-electrica/>

De la Rue S, V. Letschert S, Agarwal, Park W & Kaggwa U. (2022). «Energy efficiency improves energy access affordability,» Energy for Sustainable Development, vol. 70, pp. 560-568,

Smartgrid, (2022). Suministro eléctrico, todo sobre redes inteligentes.

<https://www.smartgridsinfo.es/suministro-electrico>

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Plan de expansión de referencia, generación y transmisión 2017-2031, Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía, 2018.

Villafuerte W, (2019). Implementación de un sistema fotovoltaico autónomo, Arequipa:

Universidad Continental.

López Y, (2016). Energía eólica. Integración a la red eléctrica, Santiago de Cali: Universidad

Autónoma de Occidente.