

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Innovación Energética Sostenible: Diseño de una red FV
para la Estación de Biodiversidad del Tiputini**

**Carlos Sthefano Alegría Medina
Freddy Sebastián Cáceres Arias
Doménica Juliana Santamaría Guerrón**

Ingeniería Ambiental

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero/a Ambiental

Quito, 16 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Innovación Energética Sostenible: Diseño de una red FV
para la Estación de Biodiversidad del Tiputini**

**Carlos Sthefano Alegría Medina
Freddy Sebastián Cáceres Arias
Doménica Juliana Santamaría Guerrón**

Fernando Nicolas Vela, PhD

Quito, 16 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Carlos Sthefano Alegría Medina
Freddy Sebastián Cáceres Arias
Doménica Juliana Santamaría Guerrón

Códigos: 00322999
00124521
00215302

Cédula de identidad: 1753862018
1724760432
1724235799

Lugar y fecha: Quito, 16 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este estudio aborda el desafío de proporcionar energía sostenible en una de las regiones más biodiversas del planeta: la Amazonía ecuatoriana. Actualmente, la Estación de Biodiversidad del Tiputini (EBT) de la USFQ depende exclusivamente de generadores a diésel, lo que genera impactos ambientales significativos. El proyecto plantea la transición hacia un sistema fotovoltaico que permita reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales. Esto a través del cálculo de la huella de carbono actual de la EBT mediante la norma ISO 14064, la simulación de una red fotovoltaica adaptada a las condiciones climáticas locales en MATLAB y Simulink, y un análisis del ciclo de vida de los paneles solares para determinar su viabilidad técnica, ambiental y económica. Los resultados muestran que la EBT podría cubrir su demanda energética, estimada en 36620.45 kWh anuales, mediante la instalación de un sistema fotovoltaico compuesto por 129 a 144 paneles de 550W. Sin embargo, factores como la densa nubosidad y vegetación limitan la eficiencia de los paneles. Además, debido a limitaciones económicas y técnicas se recomienda únicamente la instalación de 61 paneles de 550W, lo cual satisface el 42.55% de la demanda de la EBT. Por último, se destaca que la implementación del sistema compensaría las emisiones de carbono en un periodo razonable, haciendo viable la transición hacia energías limpias en términos ambientales y económicos. El diseño propuesto es una solución sostenible para áreas remotas y ecológicamente sensibles, que se puede replicar en zonas con características similares de irradiación solar y temperatura.

Palabras clave: Paneles solares, red fotovoltaica, huella de carbono, generadores a diésel, ciclo de vida, simulación, zona remota, irradiación solar, temperatura, periodo de retorno.

ABSTRACT

This study addresses the challenge of providing sustainable energy in one of the most biodiverse regions on the planet: the Ecuadorian Amazon. Currently, the Tiputini Biodiversity Station (EBT) of USFQ relies exclusively on diesel generators, which generates significant environmental impacts. The project proposes the transition to a photovoltaic system that allows reducing dependence on fossil fuels and mitigating environmental impacts. This is done through the calculation of the current carbon footprint of the EBT using the ISO 14064 standard, the simulation of a photovoltaic network adapted to local climatic conditions in MATLAB and Simulink, and a life cycle analysis of the solar panels to determine their technical, environmental and economic viability. The results show that the EBT could cover its energy demand, estimated at 36,620.45 kWh per year, by installing a photovoltaic system composed of 129 to 144 550W panels. However, factors such as dense cloud cover and vegetation limit the efficiency of the panels. Furthermore, due to economic and technical limitations, only the installation of 61 550W panels is recommended, which satisfies 42.55% of the EBT demand. Finally, it is highlighted that the implementation of the system would offset carbon emissions in a reasonable period, making the transition to clean energy viable in environmental and economic terms. The proposed design is a sustainable solution for remote and ecologically sensitive areas, which can be replicated in areas with similar solar irradiation and temperature characteristics.

Keywords: Solar panels, photovoltaic network, carbon footprint, diesel generators, life cycle, simulation, remote area, solar irradiation, temperature, payback period.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1	Antecedentes.....	12
1.2	Justificación.....	13
1.3	Objetivos.....	15
1.4	Alcance.....	16
2	METODOLOGÍA.....	16
2.1	Huella de carbono.....	16
2.1.1	Factor de emisión.....	16
2.1.2	Emisiones directas	22
2.1.3	Emisiones indirectas	25
2.2	Simulación Sistema Fotovoltaico	29
2.2.1	Análisis de los Datos Meteorológicos.....	29
2.2.2	Consumo de Energía de la Estación de Biodiversidad del Tiputini.....	45
2.2.3	Modelo de Simulación de un Panel Solar Fotovoltaico con Baterías y Convertidor.	49
2.3	Análisis del Ciclo de Vida.....	56
3	RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	61
3.1	Huella de carbono.....	61
3.1.1	Modelo Factor de Emisión.....	59
3.1.2	Emisiones Directas de la EBT debido al generador.....	64
3.1.3	Emisiones Indirectas de la EBT debido al transporte de combustible.....	65
3.2	Simulación Sistema fotovoltaico	68
3.3	Análisis del Ciclo de Vida.....	91
4	CONCLUSIONES	97
5	REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Identificación de las fuentes de carbono.....	17
Tabla 2. Consumo de Combustible utilizado en generación eléctrica en el año 2022.	19
Tabla 3. Emisiones de dióxido de carbono en el año 2022.....	21
Tabla 4. Procesamiento de los datos de temperatura e irradiación solar.	32
Tabla 5. Resumen del análisis de las variables: radiación solar y temperatura.	44
Tabla 6. Dispositivos de la Casa de Estudiantes, Huéspedes y Administradores en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.....	46
Tabla 7. Dispositivos de la Casa Tigres en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.	46
Tabla 8. Dispositivos del Laboratorio en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.	47
Tabla 9. Consumo de Energía de la Casa de Estudiantes, Huéspedes y Administradores en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.....	47
Tabla 10. Consumo de Energía de la Casa Tigres en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.....	48
Tabla 11. Consumo de Energía del Laboratorio en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.....	48
Tabla 12. Radiación solar por mes y hora.	54
Tabla 13. Etapas del ciclo de vida.	57
Tabla 14. Emisiones Indirectas de la EBT.	66
Tabla 15. Irradiación Solar Efectiva y Número de Horas de Radiación Solar.....	69
Tabla 16. Número de paneles solares necesarios para cubrir la demanda de la EBT.	70
Tabla 17. Potencia generada por el panel solar.	86
Tabla 18. Área Efectiva Disponible de la EBT.	88
Tabla 19. Escenarios de los Paneles Solares y la Demanda Energética Cubierta.	90
Tabla 20. Emisiones Totales de los Paneles Solares durante su Ciclo de Vida.	92
Tabla 21. Tiempo necesario para devengar las emisiones de los paneles solares durante su ciclo de vida....	93
Tabla 22. Precio de los Paneles Solares.	96
Tabla 23. Tiempo necesario para amortizar la inversión inicial de los paneles solares...96	
Tabla 24. Ahorro de Emisiones y Ahorro Económico según el Número de paneles.	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Modelo básico para el cálculo del factor de emisión de dióxido de carbono...	22
Figura 2.	Modelo para el cálculo de emisiones para cada tipo de combustible.....	23
Figura 3.	Modelo para el cálculo de emisiones directas.	24
Figura 4.	Recorrido para el transporte de combustible desde el poblado más cercano. ...	26
Figura 5.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT- Enero 2024.....	32
Figura 6.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Enero 2024.	32
Figura 7.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Febrero 2024.	33
Figura 8.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Febrero 2024.....	33
Figura 9.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT –Marzo 2024.	34
Figura 10.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Marzo 2024.....	34
Figura 11.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Abril 2024	35
Figura 12.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Abril 2024.....	35
Figura 13.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT –Mayo 2024.	36
Figura 14.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Mayo 2024.....	36
Figura 15.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Junio 2024.....	37
Figura 16.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Junio 2024.	37
Figura 17.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Julio 2024.....	38
Figura 18.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Julio 2024.	38
Figura 19.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Agosto 2024.	39
Figura 20.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Agosto 2024.	39
Figura 21.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Septiembre 2024.	40
Figura 22.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT –Septiembre 2024.....	40
Figura 23.	Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Octubre 2024.....	41
Figura 24.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Octubre 2024.	41
Figura 25.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Noviembre 2024.....	42
Figura 26.	Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Diciembre 2023.	43
Figura 27.	Modelo que incorpora la Potencia Final generada por los paneles.	50
Figura 28.	Segundo modelo de paneles hasta convertidor DC-DC	52
Figura 29.	Sistema simulado hasta la incorporación de la batería.....	53
Figura 30.	Estimación de emisiones para crudo.	61

Figura 31.	Modelo para estimación de emisiones totales.	62
Figura 32.	Modelo para calcular el factor de Emisión.....	62
Figura 33.	Modelo para cálculo de factor de emisión.	63
Figura 34.	Factor de Emisión del 2022 en Ecuador.....	63
Figura 35.	Modelo para calcular la huella de carbono del generador de la EBT.	64
Figura 36.	Huella de Carbono del Generador de la EBT.....	64
Figura 37.	Modelo para calcular las emisiones indirectas por transporte.....	65
Figura 38.	Modelo para calcular las emisiones indirectas por trayecto.....	65
Figura 39.	Huella de Carbono de la EBT debido a las emisiones indirectas.....	67
Figura 40.	Simulación del modelo de un panel solar fotovoltaico de 550W.....	71
Figura 41.	Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor.....	72
Figura 42.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor.....	73
Figura 43.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Enero 2024.....	74
Figura 44.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Febrero 2024.....	75
Figura 45.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Marzo 2024.....	76
Figura 46.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Abril 2024.....	77
Figura 47.	Gráficas de la simulación del panel solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Mayo 2024.....	78
Figura 48.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Junio 2024.....	79
Figura 49.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Julio 2024.	80
Figura 50.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Agosto 2024.....	81
Figura 51.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Septiembre 2024.....	82
Figura 52.	Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Octubre 2024.	83

Figura 53. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Noviembre 2024.	84
Figura 54. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Diciembre 2024.	85

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Ecuador enfrenta una constante tensión entre el desarrollo económico y la protección ambiental. A pesar de ser uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo, el crecimiento económico se ha priorizado frecuentemente sobre la sostenibilidad y la conservación del ambiente. Esta contradicción se ha hecho aún más evidente en el contexto de la reciente crisis energética causada por una grave sequía que afecta a la región, revelando la fragilidad de la matriz energética nacional. Para hacer frente al desabastecimiento eléctrico, el país ha recurrido al uso de generadores de diésel, una medida que, aunque efectiva en términos económicos a corto plazo, ha generado un impacto ambiental significativo [1].

Mientras que las áreas urbanas, habitualmente menos afectadas por problemas de acceso a la energía, se han visto recientemente perjudicadas, las comunidades remotas del país llevan años enfrentando un acceso limitado o nulo a la electricidad. Estas zonas dependen principalmente de combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas, como es el caso de la Estación de Biodiversidad del Tiputini, administrada por la Universidad San Francisco de Quito. Ubicada en la Amazonía ecuatoriana y desconectada de la red eléctrica nacional debido a su ubicación geográfica, esta estación depende exclusivamente de generadores diésel para su operación diaria. Esta situación plantea desafíos ambientales, logísticos y económicos considerables, mientras que llevar electricidad mediante métodos convencionales a esta región implicaría costos elevados, un impacto en la calidad de vida de las comunidades locales y un riesgo considerable para la biodiversidad circundante. Por ello, se vuelve crucial la implementación de tecnologías de energía renovable adaptadas a ecosistemas sensibles como el Tiputini.

En el caso específico del Tiputini, las características únicas de la región presentan limitaciones significativas para la implementación de proyectos energéticos sostenibles. Factores como la abundante biodiversidad, la ubicación geográfica aislada y la alta dependencia del país en recursos hídricos para generar electricidad constituyen desafíos importantes. Históricamente, Ecuador ha basado su matriz energética en la generación hidroeléctrica, alcanzando un 78.58% de la producción total de energía eléctrica en 2023 [2]. Sin embargo, esta dependencia expone al país a vulnerabilidades frente al cambio climático, ya que las sequías prolongadas disminuyen los caudales de los ríos, provocando crisis energéticas. En este contexto, se vuelve indispensable diversificar la matriz energética e incorporar nuevas alternativas sostenibles para garantizar un suministro eléctrico confiable y continuo, especialmente en áreas remotas y ambientalmente sensibles.

Ecuador cuenta con condiciones privilegiadas de irradiación solar y temperaturas estables que favorecen el desarrollo de proyectos fotovoltaicos [3]. No obstante, en la región amazónica, estas ventajas se han visto limitadas por factores geográficos y climáticos, como la densa cobertura forestal y la alta nubosidad, que reducen la disponibilidad de irradiación solar directa. A pesar de estas limitaciones, el aprovechamiento de tecnologías fotovoltaicas adaptadas al entorno amazónico podría representar una solución viable y sostenible para suplir las necesidades energéticas de lugares remotos como la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

1.2 Justificación

El desarrollo de zonas remotas, como la Estación de Biodiversidad del Tiputini en la Amazonía ecuatoriana, depende en gran medida del acceso a fuentes de energía confiables. Actualmente, la dependencia exclusiva de la estación en generadores a diésel plantea serios desafíos ambientales, sociales y económicos. Esta dependencia incrementa la huella de

carbón, degrada los ecosistemas locales, altera procesos ecológicos vitales y contribuye a la pérdida de biodiversidad en una de las regiones más ricas en especies del planeta.

La quema de combustibles fósiles libera grandes cantidades de dióxido de carbono y otros contaminantes como NO_2 , SO_2 y partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$), afectando tanto la calidad del aire como los ecosistemas circundantes. Durante la crisis energética de 2024, se observaron incrementos significativos en estos contaminantes debido al uso generalizado de generadores diésel en el país [4]. A pesar de su viabilidad operativa a corto plazo, el uso prolongado de estos generadores no es una solución sostenible, ya que conlleva altos costos operativos e impactos ambientales graves, limitando el potencial de desarrollo de la estación tanto desde un punto de vista financiero como ambiental.

El Tiputini, además, se encuentra en una región de alta sensibilidad ecológica, donde las actividades antropogénicas, como el uso continuo de generadores eléctricos, representan una amenaza directa a su biodiversidad. Los contaminantes derivados de la combustión de combustibles fósiles pueden acumularse en el suelo, generando toxicidad en la biota local y contribuyendo a fenómenos como la acidificación del suelo, el deterioro de la selva tropical y, en casos extremos, la pérdida total de ecosistemas [5] [6].

A pesar de los desafíos iniciales que implica la inversión en tecnologías de energía renovable, se ha demostrado que estas son más rentables a largo plazo en comparación con las energías convencionales. Al eliminar la necesidad de consumo constante de combustibles fósiles, las energías renovables minimizan las fluctuaciones de costos y garantizan la preservación de los ecosistemas, generando beneficios tanto económicos como ambientales [7]. Por ello, resulta imperativo diversificar la matriz energética en zonas como la Amazonía ecuatoriana, donde la dependencia de los combustibles fósiles y la hidroenergía las hace especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático. Incorporar tecnologías

sostenibles, menos susceptibles a fluctuaciones climáticas, no solo asegura un suministro energético renovable, confiable y viable, sino que también promueve la transición energética en áreas remotas y ambientalmente sensibles, abriendo oportunidades para un desarrollo más sostenible y adaptado a sus necesidades específicas.

1.3 Objetivos

Dado el contexto energético y ambiental expuesto en los antecedentes y la justificación del proyecto. Resulta fundamental establecer objetivos para encontrar soluciones sostenibles con el fin de generar energía en una zona remota y sensible como la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

- **Objetivo General:** Diseñar un sistema de generación fotovoltaica distribuida para la Estación de Biodiversidad del Tiputini (EBT) que contribuya a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y a mitigar sus impactos ambientales.

Para alcanzar este objetivo general se han definido los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo Específico 1:** Determinar la huella de carbono generada por el uso actual de generadores en la EBT.
- **Objetivo Específico 2:** Diseñar y simular un modelo de generación fotovoltaica que permita evaluar el aprovechamiento del recurso solar, así como la viabilidad técnica de instalación del sistema.
- **Objetivo Específico 3:** Evaluar el análisis del ciclo de vida de los componentes del sistema fotovoltaico propuesto para determinar su impacto ambiental.

1.4 Alcance

El presente proyecto abarca el estudio, análisis y propuesta de una solución tecnológica y sostenible para la generación de energía en la Estación de Biodiversidad del Tiputini, ubicada en una zona remota de la Amazonía ecuatoriana. Este alcance incluye la evaluación de la huella de carbono asociada al uso actual de generadores a diésel, el estudio del ciclo de vida de un sistema fotovoltaico y la simulación técnica de la generación a partir de paneles solares. A partir de estos resultados, se determinará la viabilidad técnica, económica y ambiental de la adopción de tecnologías fotovoltaicas que puedan satisfacer la demanda energética, minimizando el impacto ambiental y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. En caso de que la EBT considere factible la solución propuesta, se espera que la implementación del diseño y la transición hacia una matriz energética más limpia puedan llevarse a cabo en el corto plazo, contribuyendo a la sostenibilidad y conservación de un entorno de altísima biodiversidad.

2 METODOLOGÍA

2.1 Huella de carbono

La cuantificación de la huella de carbono permite determinar el impacto ambiental del uso de los generadores y evaluar las implicaciones de esta en dependencia en el ecosistema local. Para ello, primero es necesario determinar el factor de emisión de acuerdo con las características de estudio y posteriormente identificar y cuantificar las fuentes de emisiones primarias y secundarias. Finalmente, calcular el inventario de emisiones.

2.1.1 Factor de emisión

La ISO-14064 es una serie de estándares internacionales desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que proporcionan un marco para la

cuantificación, monitoreo y reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero. La norma se encuentra dividida en tres partes: ISO 14064-1, ISO 14064-2 e ISO 14064-3. La primera se centra en la orientación para las organizaciones sobre la cuantificación e informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. La segunda aborda la orientación para proyectos sobre la cuantificación, seguimiento e informe de la reducción de emisiones o el aumento de remociones de gases de efecto invernadero. Por último, la tercera trata sobre la especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero [8].

Para el cálculo de la huella de carbono en la EBT, de acuerdo con la norma mencionada, se inició por la cuantificación de la cantidad total de GEI emitidos directa o indirectamente según las fuentes de emisión como se describen en la Tabla 1. Se identificó al generador eléctrico como única fuente de emisión directa, mientras que las emisiones relacionadas con el transporte del combustible hacia la EBT como indirectas.

Tabla 1. Identificación de las fuentes de carbono.

Categoría	Tipo de Emisión	Descripción
Alcance 1	Directas	Proviene de fuentes controladas directamente por la organización. Ej: combustible quemado por vehículos, generadores o calderas.
Alcance 2	Indirectas	Emisiones generadas por la producción de la electricidad, calefacción o refrigeración.
Alcance 3	Otras emisiones indirectas	Incluye emisiones generadas por la cadena de suministro, viajes de negocios, transportes de mercancías, residuos, entre otros.

Una vez identificadas las fuentes de emisión se procedió con la recopilación de datos relevantes sobre las actividades que generan emisiones en la estación, por ejemplo:

- Cantidad de combustible consumido en el generador
- Demanda de electricidad
- Distancia recorrida por transporte de combustible

Después se realizó la conversión de las actividades a un valor de emisiones, para ello se utilizó el respectivo factor de emisión asociado a cada actividad. Este factor indica cuántas emisiones de CO_2 se generar por unidad de actividad. Estos factores se obtienen de diferentes bases de datos internacionales como las proporcionadas por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). De acuerdo con esta regulación, la huella de carbono se puede determinar mediante la multiplicación del factor de emisión por la cantidad de actividad realizada, como se detalla en la Ecuación 1.

$$Emisiones [gCO_2] = Factor\ de\ emisión \left[\frac{gCO_2}{kWh} \right] \times Actividad [kWh] \quad (1)$$

De acuerdo con el informe realizado por la Comisión técnica de determinación de factores de emisión de gases de efecto invernadero [9], la metodología para el cálculo del factor de emisión es la relación entre las emisiones totales de dióxido de carbono y la electricidad generada en todo el año de estudio. En la Ecuación 2 se expresa esto, donde, $FE_{m,y}$ corresponde al factor de emisión de CO_2 de las unidades de generación “m” en el año “y” (expresado en $t\ CO_2/MWh$), $FC_{i,m,y}$ corresponde a la cantidad de combustible fósil “i” consumidos en el año “y” de las unidades de generación “m” (expresado en unidades de masa como toneladas), $FE_{CO_2,i,y}$ corresponde al factor de emisión de CO_2 por tipo de combustible “i” en el año “y” (expresado en $t\ CO_2/TJ$), $EG_{m,y}$ corresponde a la energía neta generada en el año “y”

(expresado en MWh), y m representa a todas las unidades de generación conectadas a la red en el año “ y ”.

$$FE_{m,y} = \frac{\sum iFC_{i,m,y} \cdot NCV_{i,y} \cdot FE_{CO2,i,y}}{EG_{m,y}} \quad (2)$$

Para el denominador, el valor de energía bruta total reportado (EG_{2022}) por el operador Nacional de Electricidad CENACE, para el año 2022, es de 28684.62 GWh. Para el numerador, la estimación de emisiones totales de carbono se calcula con la cantidad; el poder calorífico y el factor de emisión de dióxido de carbono (FE_{CO2}) específico para cada tipo de combustible. La Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables está encargada del registro de cantidad de combustible consumido al año, en el Ecuador. Tenemos una amplia variedad de tipos combustibles, siendo el fuelóleo y el diésel los combustibles más consumidos según las estadísticas presentadas en el 2022 [10]; seguidos de otros como el crudo, el gas natural y el bagazo de caña de azúcar; mientras que el residuo, GLP y biogás tiene pequeñas aportaciones. A continuación, se muestra la Tabla 2 con los valores reportados para el año 2022.

Tabla 2. Consumo de Combustible utilizado en generación eléctrica en el año 2022.

Tipo de Combustible	Unidades	Cantidad de combustible
Fuelóleo	Miles de galones [kgal]	171 062.72
Diésel	Miles de galones[kgal]	157 492.33
Nafta	Miles de galones[kgal]	0
Gas Natural	Miles de millones de pies cúbicos [$kpc \times 10^6$]	13.77

Residuo	Miles de galones [kgal]	14 525.82
Crudo	Miles de galones [kgal]	125 667.51
GLP	Miles de galones [kgal]	5 444.57
Bagazo de caña de azúcar	Toneladas [t]	1 247 454.93
Biogás	Metros cúbicos [m ³]	25 116 511.33

Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2023.

Como se establece en la ecuación 2, para poder hacer la transformación a toneladas de dióxido de carbono, en primer lugar, se debe expresar la cantidad de combustible en unidades de masa. Por ejemplo, para el caso del fuelóleo, cuya densidad es 944 kilogramos por metro cúbico se tendría lo siguiente:

$$1.71 \times 10^8 \text{ gal de fuelóleo} \times \frac{3.785L}{1gal} \times \frac{1m^3}{1000L} \times \frac{944kg}{1m^3} = 611.21 \times 10^6 kg \text{ de fuelóleo}$$

A continuación, se utiliza el poder calorífico específico de cada tipo de combustible, para pasar de unidades de masa a unidades de energía. Siguiendo el ejemplo anterior, el poder calorífico del fuelóleo es de 40.4 TJ/Gg y se obtendría lo siguiente:

$$610.98 \times 10^6 kg \times \frac{1Gg}{1 \times 10^6 kg} \times \frac{40.4TJ}{1Gg} = 24.69 \times 10^3 TJ$$

Finalmente, para expresar esta energía como emisiones de dióxido de carbono al momento de consumirlo, utilizamos un factor de emisión asociado al tipo de combustible. El procedimiento descrito fue realizado para los diferentes tipos de combustible y el resultado de las emisiones de dióxido de carbono de cada uno de ellos se puede observar en la Tabla 3.

$$24.68 \times 10^3 \text{ TJ} \times \frac{77400 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ TJ}} \times \frac{1 \text{ t } CO_2}{1000 \text{ kg } CO_2} = 1.91 \times 10^6 \text{ t } CO_2$$

Tabla 3. Emisiones de dióxido de carbono en el año 2022

Tipo de Combustible	Densidad	Poder calorífico [TJ/Gg]	Factor de emisión de dióxido de carbono [kgCO ₂ /TJ]	Emisiones de dióxido de carbono [tCO ₂]
Fuelóleo	944.0 [kg/m ³]	40.4	77400	1.91 × 10 ⁶
Diésel	845.0 [kg/m ³]	43.0	74100	1.60 × 10 ⁶
Gas Natural	0.042 [lb/f ³]	48.0	56100	0.71 × 10 ⁶
Residuo	944.0 [kg/m ³]	40.4	77400	0.16 × 10 ⁶
Crudo	874.0 [kg/m ³]	42.3	73300	1.29 × 10 ⁶
GLP	5286 [kg/m ³]	47.3	63100	0.033 × 10 ⁶

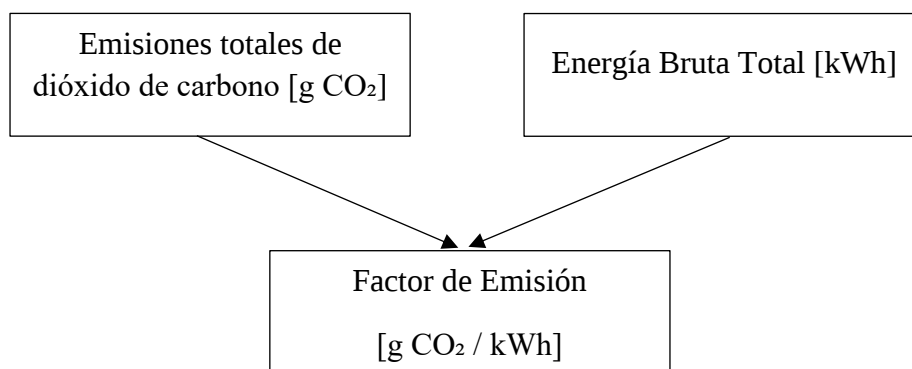
Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2023.

Cabe mencionar que, para este caso, no se toma en cuenta las emisiones generadas por el uso de bagazo de caña de azúcar y biogás ya que su combustión genera dióxido de carbono, pero no hay un aumento neto en el dióxido de carbono atmosférico pues la cantidad de dióxido de carbono fijado en la materia prima biodegradable es igual a la cantidad liberada a través de la combustión de biogás y caña de azúcar [11]. La sumatoria de las emisiones de dióxido de carbono debido a la quema de combustibles en el año 2022 da un valor de $6.93 \times 10^6 \text{ t } CO_2$.

2.1.2 Emisiones directas

Sabiendo que el factor de emisión varía dependiendo del país, el año y la cantidad de combustible quemado, se consideró relevante la elaboración de un modelo con ayuda del software de simulación Vensim® para poder automatizar este cálculo. Esto se realizó partiendo del concepto básico de que el factor de emisión se determina en función de la relación entre las emisiones totales de dióxido de carbono y la energía bruta total; por lo que, se expresó estos parámetros como variables y se propuso el modelo ilustrado a continuación en la figura 1.

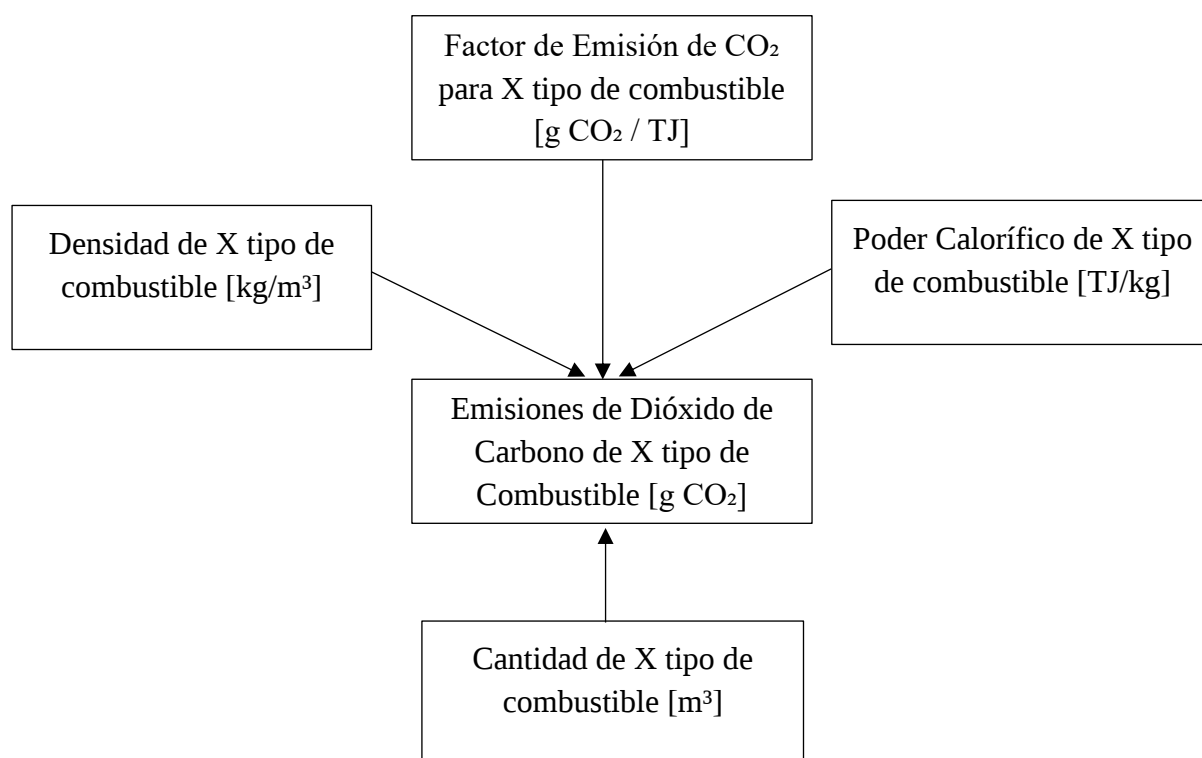
Figura 1. Modelo básico para el cálculo del factor de emisión de dióxido de carbono.



Fuente: Autoría Propia

Si se dividen los parámetros entre fijos y variables; siendo fijos los que se mantiene constantes en el tiempo y variables los que no. Podemos agregar mencionados valores como variables auxiliares en el modelo, a las que podemos ingresar los datos al modelo para la determinación de un nuevo factor de emisión. En este caso las variables fijas serían las características de cada tipo de combustible como la densidad, el poder calorífico y el factor de emisión de dióxido de carbono. Mientras que los datos variables son la cantidad de cada tipo de combustible y la energía bruta total para el año de estudio. Consecuentemente, el modelo se mantendría en su versión básica para la variable de energía bruta, pero se ampliaría para el cálculo de emisiones. Entonces, el modelo sería más extenso porque incluiría cada tipo de combustible como se ve en la figura 2.

Figura 2. Modelo para el cálculo de emisiones para cada tipo de combustible.



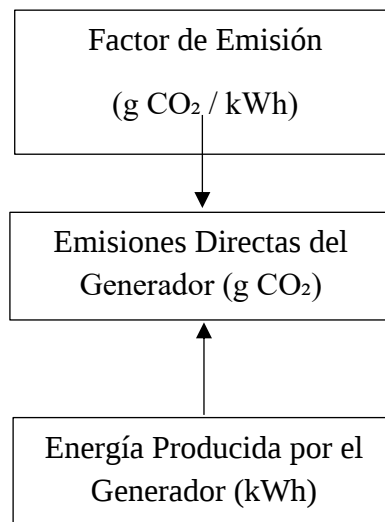
Fuente: autoría propia

Una vez cuantificado el factor de emisión a utilizar, procedemos a determinar el consumo de combustible. Para esto se tomará en cuenta tanto las emisiones directas como las indirectas. Por una parte, la producción de energía mediante uso de generadores a diésel, al ser un proceso de combustión, tiene una producción directa de dióxido de carbono el cual es emitido a la atmosfera. Por otra parte, para el uso del generador se deben llevar a cabo otras actividades las cuales generan dióxido de carbono de manera indirecta, la más significativa es el transporte de diésel desde el poblado más cercano hacia la EBT.

El enfoque metodológico para cuantificar la huella de carbono debido al uso del generador a diésel en la Estación de Biodiversidad del Tiputini estará basado en la energía producida por combustibles fósiles y la cantidad de combustible consumido en la estación. Para ello, se utilizará la norma internacional ISO 14064 que establece las bases para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero.

El modelo desarrollado para calcular las emisiones directas de los generadores eléctricos en la EBT requiere del factor de emisión calculado previamente y la cantidad de combustible utilizado. En este caso, se necesitaron los valores descritos anteriormente sobre la densidad y poder calorífico del diésel. Para calcular las emisiones directas del generador se aplicó el modelo que se ve en la Figura 3.

Figura 3. Modelo para el cálculo de emisiones directas.



Fuente: autoría propia.

Para calcular la energía producida por el generador (kWh) se utiliza, como dice la norma, el número de galones de diésel consumidos al año por la EBT en las fuentes fijas a diésel. Se realizó el cálculo de la Ecuación 3 para obtener la cantidad de energía producida al año a partir de los galones de combustible.

$$Energía\ producida\ (kWh) = PCd \left(\frac{TJ}{Gg} \right) \times Densidad \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times Diésel\ Consumido\ (gal) \quad (3)$$

Donde PCd es el poder calorífico, la densidad es la del diésel, la eficiencia utilizada fue 0.35 y se utilizó factores de conversión que permitan cambiar las unidades de Gg a kg, de metro cúbico a galones, de TJ a kJ y de kJ a kWh.

De esta manera, se obtuvo que la energía generada por 5025.69 galones quemados durante el año es igual a 192015 kWh. Posteriormente este valor fue multiplicado por el factor de emisión para obtener las emisiones directas del generador en la estación.

2.1.3 Emisiones indirectas

Con relación a las emisiones indirectas, el transporte desde la ciudad del Coca hacia la estación de biodiversidad Tiputini es un proceso dividido en tres tramos. Este recorrido, es realizado por agua y tierra, por ende, existe una generación de CO_2 debido al uso de motores de gasolina y diésel respectivamente. El aporte a la huella de carbono de cada tramo dependerá del factor de emisión del medio de transporte y la distancia a recorrer.

Estos tramos se dividen por diferentes medios de transporte como se ve en la Figura 4, siendo los tramos azules por el río y el tramo rojo por carretera. Para poder cuantificar la huella de carbono debido a las emisiones indirectas se utilizó el modelo Vensim para poder relacionar las variables de distancia, velocidad y factores de emisión de la gasolina y diésel con la eficiencia de sus respectivos motores. El primer trayecto es realizado por río, una distancia de 43 km es recorrida en lancha hasta llegar a Pompeya. Posteriormente, se realiza un tramo por tierra, 65 km son recorridos hasta la Estación Científica Yasuní de la Pontificia Universidad Católica (PUCE). Por último, el trayecto final hacia la Estación de Biodiversidad del Tiputini se realiza navegando por río, recorriendo una distancia de 60 kilómetros.

Figura 4. Recorrido para el transporte de combustible desde el poblado más cercano.



Fuente: Autoría propia

En primer lugar, determinamos el aporte generado por el recorrido realizado en lancha (tramo 1, tramo 3). Por la topografía del lugar, la lancha es el medio más utilizado para el transporte de suplementos a las comunidades, entre ellos, el combustible. Según un estudio realizado por la Universidad Internacional del Ecuador en el año 2021 [12]; la lancha más común en la Amazonia ecuatoriana es la denominada lancha cisterna, la cual utiliza un motor fuera borda Yamaha 115hp. En el mismo documento, indican una velocidad común a la que se mueven estas lanchas, se utilizará 10 nudos, lo cual equivale a 18km/h. Con este dato se calcula el tiempo de viaje $t = \frac{d}{v}$. El tiempo del primero y el tercer trayecto es el siguiente.

$$t_{tramo\ 1} = \frac{43\ km}{18\ \frac{km}{h}} = 2.3889\ h$$

$$t_{tramo\ 3} = \frac{60\ km}{18\ \frac{km}{h}} = 3.3333\ h$$

De igual manera, a partir de fichas técnicas del motor Yamaha se obtienen los datos de consumo de combustible y capacidad. Se decidió utilizar 38 L de gasolina/h y una capacidad del tanque de combustible de 24 L. Se obtiene lo siguiente.

$$\text{Litros de gasolina}_{\text{tramo 1}} = 2.3889 \text{ h} \times 38 \frac{\text{L gasolina}}{\text{h}} = 90.77 \text{ L gasolina}$$

$$\text{Litros de gasolina}_{\text{tramo 3}} = 3.3333 \text{ h} \times 38 \frac{\text{L gasolina}}{\text{h}} = 126.66 \text{ L gasolina}$$

Se investigó un factor de emisión de CO₂ debido a la gasolina, el valor utilizado es 2.35 kgCO₂/L gasolina. El siguiente cálculo muestra la cantidad de CO₂ producida debido al transporte de combustible, en lancha, a la estación Tiputini.

$$\text{CO}_2 \text{ generado}_{\text{tramo 1}} = 90.77 \text{ L gasolina} \times 2.35 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{L gasolina}} = 213.33 \text{ kg CO}_2$$

$$\text{CO}_2 \text{ generado}_{\text{tramo 3}} = 126.66 \text{ L gasolina} \times 2.35 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{L gasolina}} = 297.66 \text{ kg CO}_2$$

Finalmente, se obtiene un total de 511.00 kg CO₂ producidos por el transporte en lancha desde el Coca hasta la estación de biodiversidad Tiputini. Considerando que la compra de combustible es realizada cada 15 días se calculará un valor anual con las emisiones de CO₂ debido al transporte en lancha.

Para el segundo tramo del transporte del combustible, el cual es desde Pompeya hasta la Estación Científica Yasuní (PUCE), se utiliza un medio terrestre. Para este estudio, se consideró las camionetas más utilizadas en la Amazonía ecuatoriana capaz de transportar los galones adquiridos por la estación Tiputini con la frecuencia indicada. Se trata de un (Chevrolet® D-Max 4x4) vehículo tipo camioneta con un propulsor a diésel de 2.5 litros y 16 válvulas, que produce una potencia máxima de 130 caballos (hp) a 3.600 rpm. Según especificaciones del fabricante, esta camioneta tiene un consumo promedio de 8.6 litros de diésel por cada 100 kilómetros de recorrido.

El tiempo de viaje será considerando la distancia entre los dos puntos y, debido a las características de las carreteras del lugar, se utilizará una velocidad de 40km/h que es la

velocidad máxima permitida al interior del Bloque 16, por ser un área de operación petrolera con estrictas medidas de seguridad para el tráfico vehicular. Con estos datos se obtiene el tiempo de viaje, el cual es de 1.63 h.

$$\text{Litros de diesel}_{\text{tramo } 2} = 1.63h \times 0.086 \frac{L \text{ diesel}}{km} \times 40 \frac{km}{h} = 5.61 L \text{ diesel}$$

El factor de emisión de CO_2 debido al diésel es de $74100 \text{ kgCO}_2/L$, y la eficiencia de combustión reportada para el motor de la camioneta oscila entre 40 % y 50 %, por lo que tomaremos un valor promedio de 45 %.

Entonces, al igual que en el procedimiento para las emisiones directas, se realizó el siguiente cálculo que permite obtener la cantidad de energía producida al año a partir de los galones de combustible utilizados.

$$\text{Energía}(kWh) = PCd \frac{TJ}{Gg} \times \text{Densidad} \frac{kg}{m^3} \times \text{Eficiencia} \times \text{Diésel Consumido galones}$$

Donde PCd es el poder calorífico, la densidad es la del diésel, la eficiencia utilizada fue 0.45 y se utilizó factores de conversión que permitan cambiar las unidades de Gg a kg, de metro cúbico a litros, de TJ a kJ y de kJ a kWh. Así entonces:

$$\text{Energía}(kWh) = 43 \frac{TJ}{Gg} \times \frac{1Gg}{10^6kg} \times \frac{10^9kJ}{1Tj} \times 0.00028 \frac{kWh}{kJ} \times 845 \frac{kg}{m^3} \times \frac{1m^3}{10^3L} \times 0.45 \times 5.61 L$$

De esta manera, se obtuvo que la energía generada por 5.61 litros de diésel quemados en un viaje es igual a 25.68 kWh. Luego, si consideramos que por cada vez que se transporta el combustible, la camioneta realiza un viaje de ida y un viaje de retorno, obtenemos un valor de 51.37 kWh por cada ingreso. Posteriormente, como se realizan, en promedio, dos ingresos al mes, se obtiene un valor de 102.36 kWh al mes, y finalmente un valor de 1228.32 kWh al año.

Finalmente, este valor fue multiplicado por el factor de emisión del diésel de 74100 $kgCO_2/TJ$, para obtener las emisiones indirectas del uso de la camioneta para el transporte terrestre de combustible entre la población de Pompeya y la Estación Científica Yasuní (PUCE).

2.2 Simulación Sistema Fotovoltaico

Para el diseño de la red FV se procedió en primer lugar a procesar los datos meteorológicos asociados a la irradiación solar y temperatura. Posteriormente se cuantificó la demanda energética de la EBT y finalmente, se procedió a la simulación de la red.

2.2.1 Análisis de los Datos Meteorológicos.

Para desarrollar la simulación de la red fotovoltaica existen dos parámetros fundamentales: la irradiación solar y la temperatura del sitio. Estos valores permiten determinar cuál será la potencia máxima y la energía generada por un panel fotovoltaico en un lugar específico. Por esta razón, es importante realizar un análisis detallado de los datos meteorológicos ya que la Estación de Biodiversidad del Tiputini se encuentra en un bosque lluvioso primario de tierras bajas, el cual se caracteriza por ser una zona con lluvias frecuentes, altos niveles de humedad atmosférica y alta nubosidad.

En este caso, la irradiación solar es la energía incidente que recibe por unidad de área una superficie durante un periodo determinado y es medida normalmente en Wm^{-2} . Además, la irradiación solar total es igual a la suma de la radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada. Donde la radiación directa se refiere a la energía solar que llega a la superficie de la Tierra sin desviarse o sufrir algún proceso de dispersión en la atmósfera, la radiación difusa es la energía solar que llega a la superficie de la Tierra después de ser dispersada en la atmósfera y la radiación reflejada es la energía que se refleja de la superficie terrestre y depende del albedo [13].

Por otro lado, la temperatura es un factor clave en la instalación de sistemas fotovoltaicos ya que todos los paneles solares tienen un rango de temperatura óptima de funcionamiento. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta, la cantidad de energía que produce un panel disminuye debido a que la resistencia aumenta y la velocidad de la corriente eléctrica también disminuye. Esto significa que la temperatura juega un papel importante en el proceso de conversión fotovoltaica debido a que un aumento en la temperatura de funcionamiento óptima (superior a 25°C) tiene un efecto negativo en la eficiencia eléctrica de los módulos fotovoltaicos [14].

Por estas razones, se decidió realizar un análisis de las variables meteorológicas de temperatura y radiación solar. Para ello, se utilizó los datos proporcionados por la página web Ambient Weather Network [15]. La cual posee información en vivo de diferentes variables como la temperatura, dirección del viento, velocidad del viento, humedad, precipitación y radiación solar. Los datos son obtenidos a partir de una pequeña estación meteorológica colocada en la Estación de Biodiversidad del Tiputini. Para este caso, se descargó la información disponible desde diciembre del 2023 hasta noviembre del 2024 para la radiación solar y desde enero del 2024 hasta octubre del 2024 para la temperatura.

El análisis fue realizado con ayuda de la herramienta MatLab[®], la cual es una plataforma de programación y cálculo utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear gráficas. Esta permitió leer los archivos y datos descargados de manera rápida y sencilla. Para obtener un análisis completo se decidió evaluar los datos por cada mes. Esto debido a que, al no existir estaciones marcadas en Ecuador, realizar un análisis anual podría ocultar información crucial sobre los patrones de radiación solar, como los meses con mayor o menor intensidad y las horas pico diarias de radiación.

Para obtener valores promedio de la temperatura y radiación solar por cada mes, se decidió crear el perfil diurno de los datos recolectados. De esta manera, se podría observar los datos promedio de cada hora durante todo el mes. La estación meteorológica tiene una resolución temporal de 5 minutos, es decir proporciona datos de todas las variables cada 5 minutos, por lo que, en una hora se obtienen 12 datos de cada variable. Por ello, primero se decidió calcular un promedio de estos 12 datos y obtener un solo valor de radiación y temperatura para cada hora del día. Esto permitió obtener 24 datos por día, correspondientes a cada hora. Posteriormente, para esos datos se calculó un nuevo promedio, pero esta vez considerando todos los datos del mes. Es decir, todos los valores del mes correspondientes a una determinada hora del día fueron promediados, obteniendo 24 datos por mes, los cuales corresponden a las 24 horas del día. El análisis de ambas variables se encuentra detallado en las Figuras 5-26 de la Tabla 4.

Tabla 4. Procesamiento de los datos de temperatura e irradiación solar.

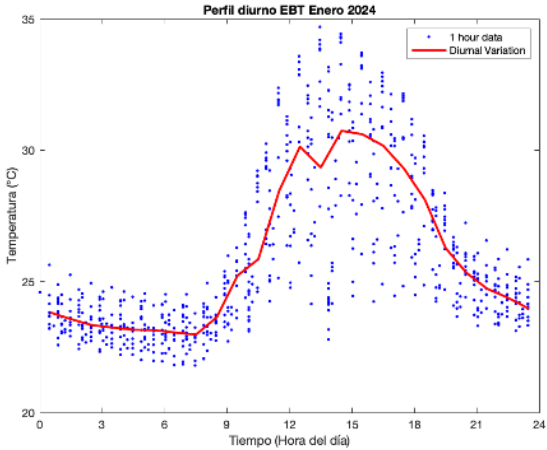
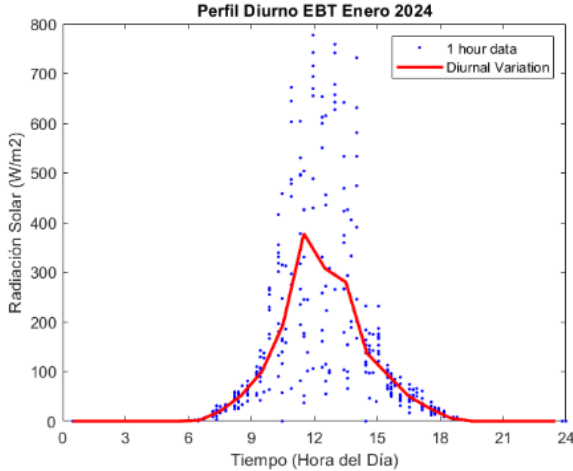
Temperatura	Radiación	Descripción
Figura 5. Perfil diurno de la temperatura en la EBT- Enero 2024 	Figura 6. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Enero 2024. 	En las figuras 5 y 6 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de enero del 2024. La temperatura más alta es de 31°C y ocurre a las 3pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores iguales y superiores a 30°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 377.56 W/m² y ocurre entre las 11 am y 12pm. Además, entre las 11am y 2pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 300 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 147.76 W/m².

Figura 7. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Febrero 2024.

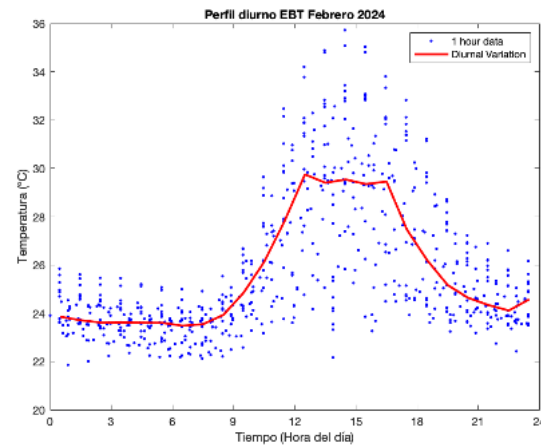
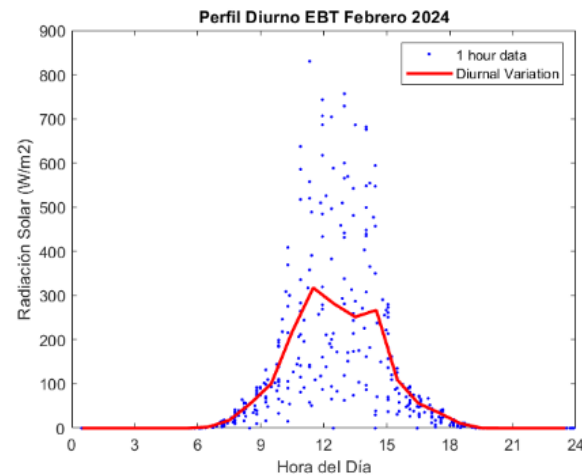


Figura 8. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Febrero 2024.



En las figuras 7 y 8 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de febrero del 2024. La temperatura más alta es de 30°C y ocurre a las 12pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores iguales y superiores a 29°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 317.4 W/m^2 y ocurre entre las 11 am y 12pm. Además, entre las 11 am y 3pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 200 W/m^2 . El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 148.20 W/m^2 .

Figura 9. Perfil diurno de la temperatura en la EBT –Marzo 2024.

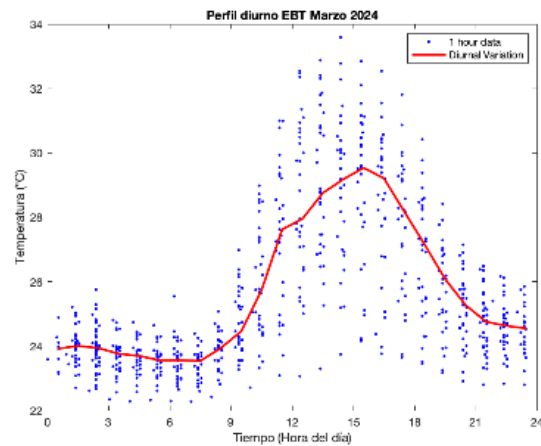
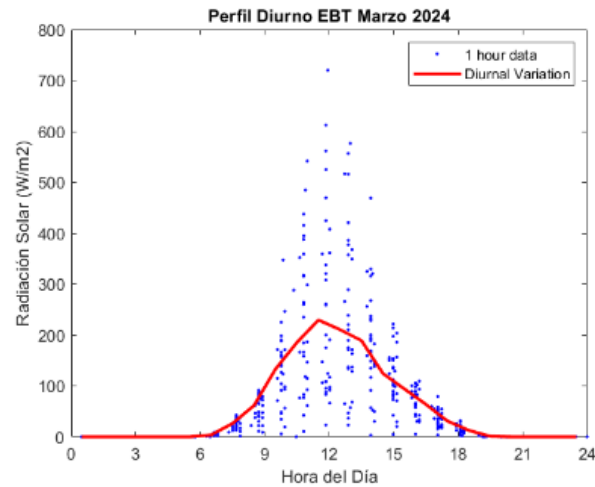


Figura 10. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Marzo 2024.



En las figuras 9 y 10 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de marzo del 2024. La temperatura más alta es de 29°C y ocurre a las 3pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores iguales y superiores a 28°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 229.43 W/m² y ocurre entre las 11 am y 12pm. Además, entre las 10 am y 2pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 185 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 110.05 W/m².

Figura 11. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Abril 2024

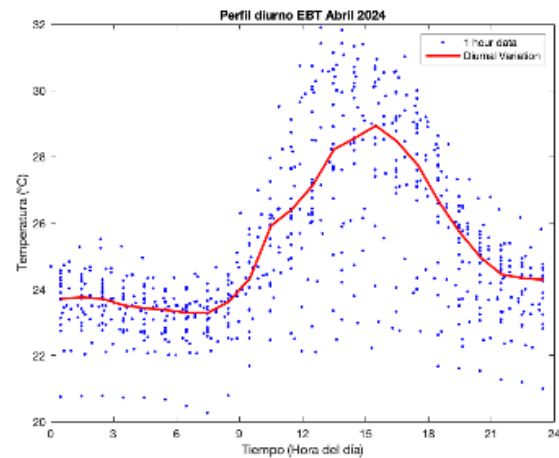
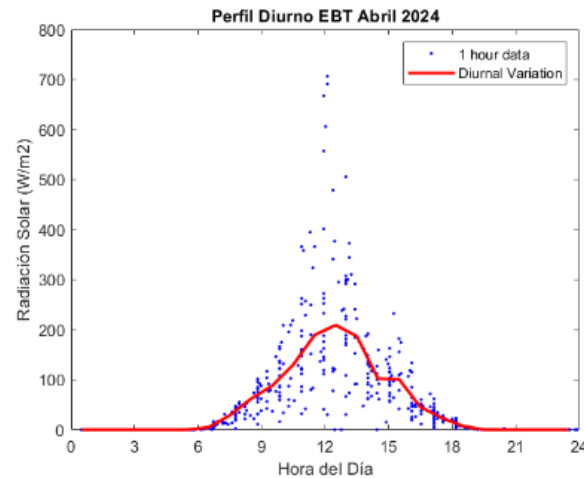


Figura 12. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Abril 2024.



En las figuras 11 y 12 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de abril del 2024. La temperatura más alta es de 29°C y ocurre a las 4pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores entre 26°C y 29°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 209.24 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 11 am y 1pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 200 W/m². Además, el promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 97.66 W/m².

Figura 13. Perfil diurno de la temperatura en la EBT –Mayo 2024.

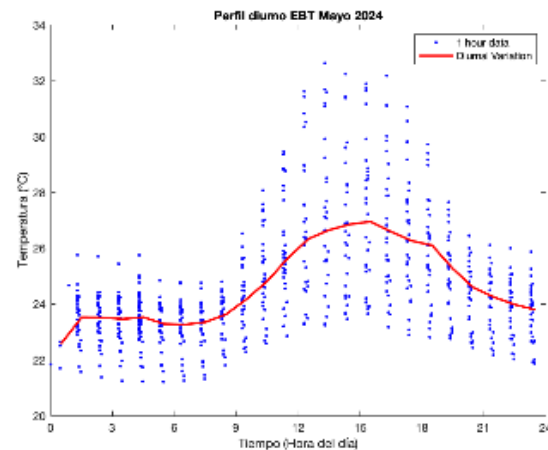
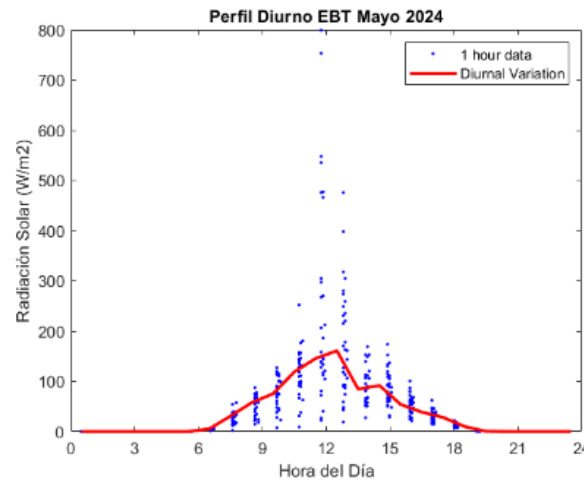


Figura 14. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Mayo 2024.



En las figuras 13 y 14 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de mayo del 2024. Se puede establecer que la temperatura más alta es de 27°C y ocurre a las 3pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores entre 25 y 27°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 160.88 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 10 am y 3pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 100 W/m². Además, el promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 77.76 W/m².

Figura 15. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Junio 2024

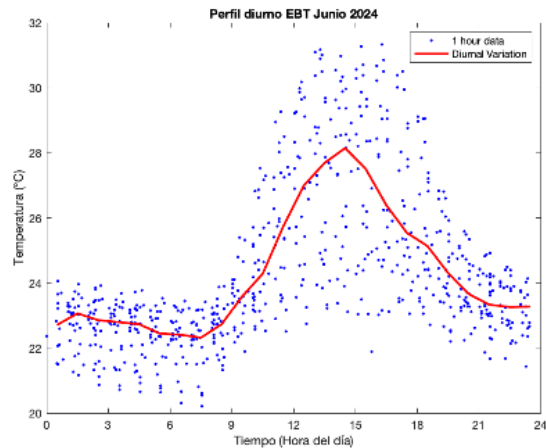
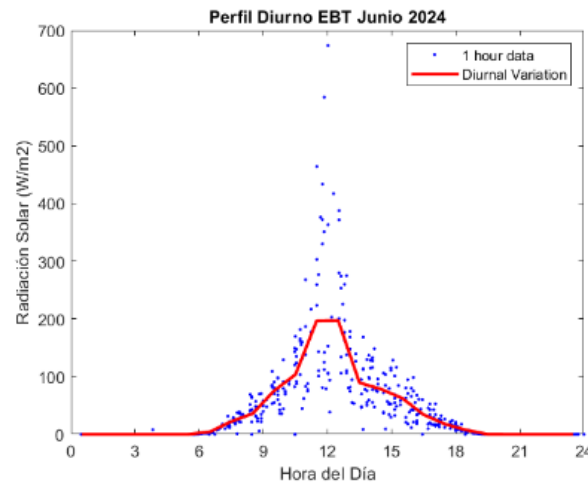


Figura 16. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Junio 2024.



En las figuras 15 y 16 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de junio del 2024. La temperatura más alta es de 28°C y ocurre a las 3pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores iguales y superiores a 26°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 197.34 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 10 am y 1pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 100 W/m². Además, el promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 75.68 W/m².

Figura 17. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Julio 2024.

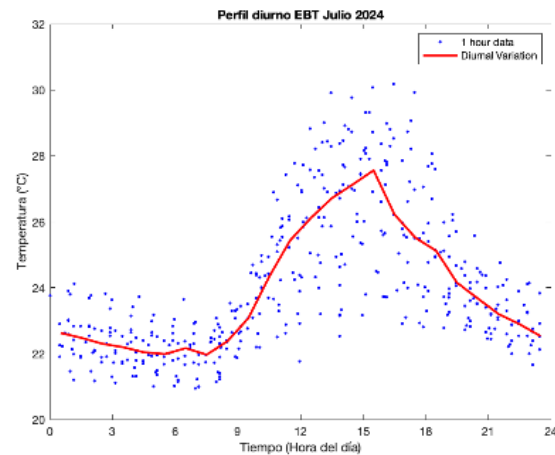
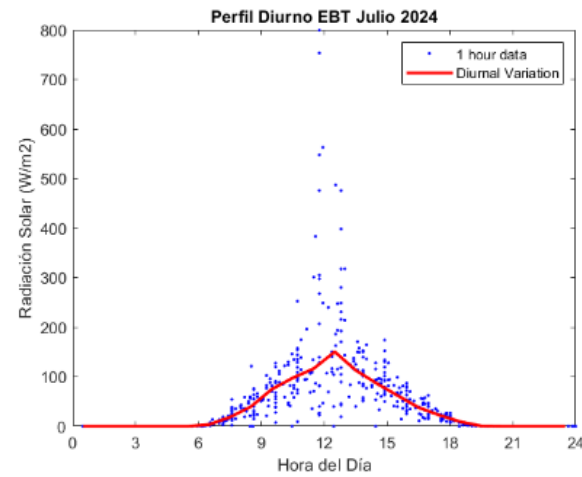


Figura 18. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Julio 2024.



En las figuras 17 y 18 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio durante el mes de julio del 2024. La temperatura más alta es de 28°C y ocurre a las 4pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores entre 25 y 28°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 142.03 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 11 am y 2pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 100 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 72.54 W/m².

Figura 19. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Agosto 2024.

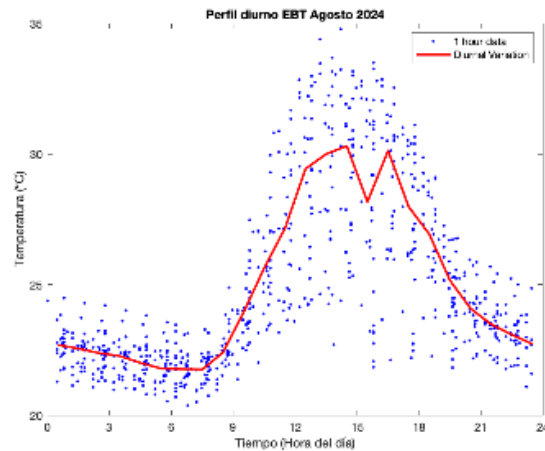
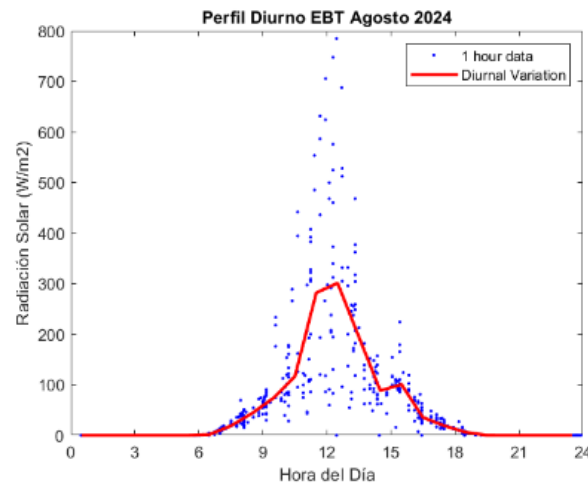


Figura 20. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Agosto 2024.



En las figuras 19 y 20 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de agosto del 2024. La temperatura más alta es de 30°C y ocurre a las 2pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores iguales y superiores a 27°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 301.10 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 11 am y 1pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 280 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 108.11 W/m².

Figura 21. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Septiembre 2024.

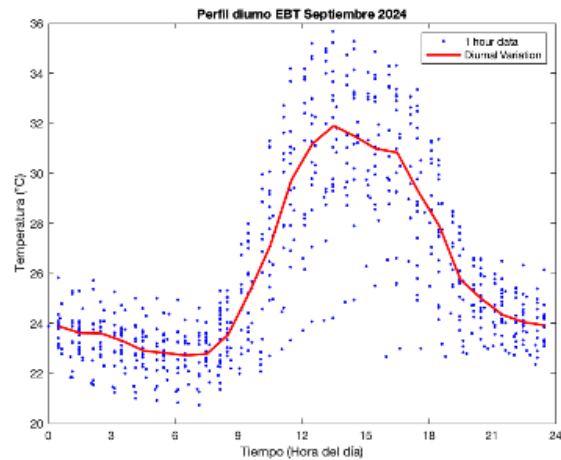
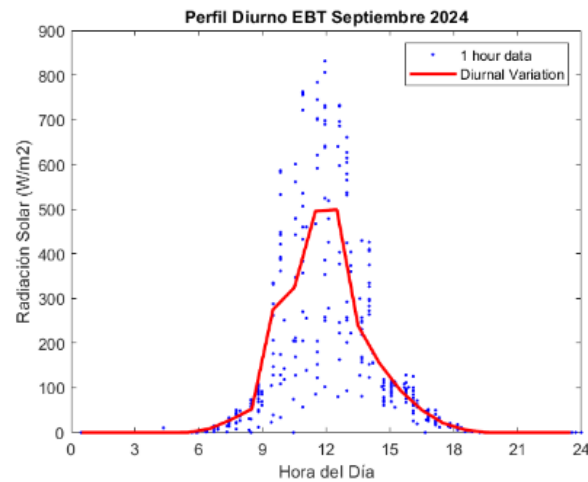


Figura 22. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT –Septiembre 2024.



En las figuras 21 y 22 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de septiembre del 2024. La temperatura más alta es de 32°C y ocurre a la 1pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores superiores a 30°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 498.84 W/m² y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 11 am y 1pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores cercanos a 500 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 173.28 W/m².

Figura 23. Perfil diurno de la temperatura en la EBT – Octubre 2024.

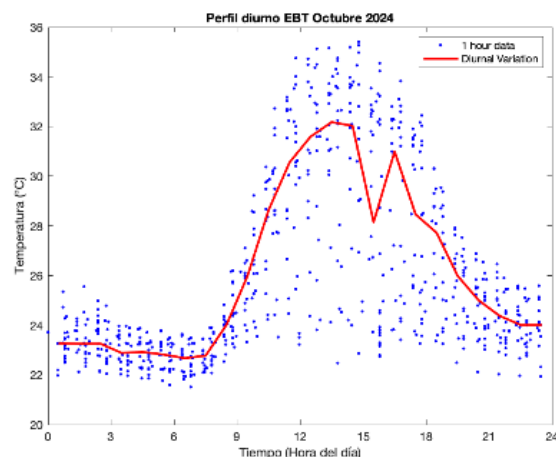
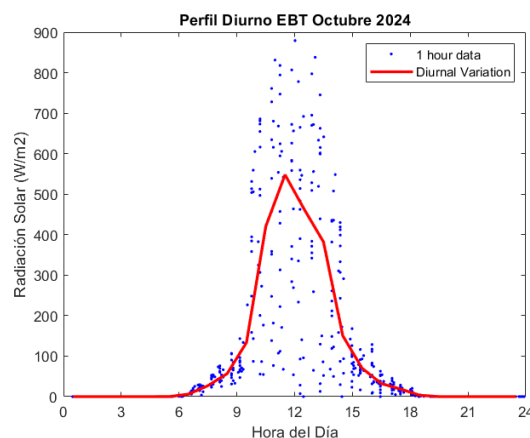
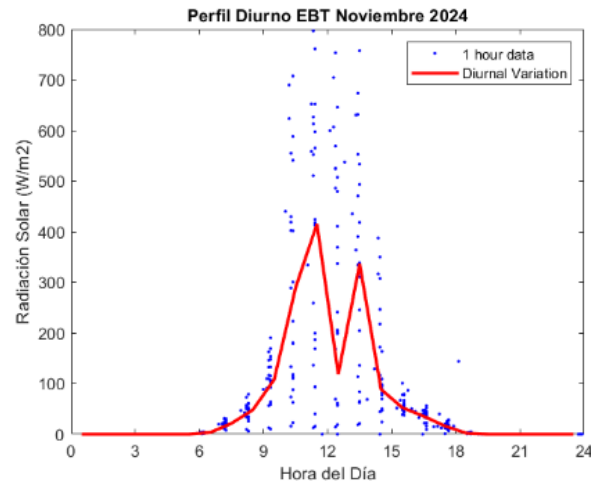


Figura 24. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Octubre 2024.



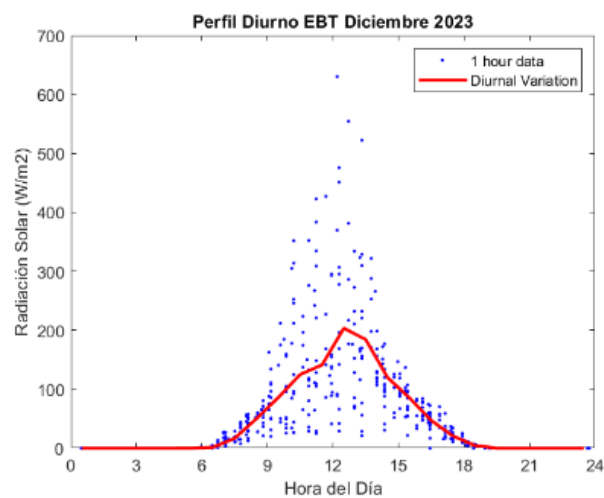
En las figuras 23 y 24 se puede observar el perfil diurno de la temperatura promedio y la radiación solar promedio durante el mes de octubre del 2024. Se puede establecer que la temperatura más alta es de 32°C y ocurre a las 2pm. Además, durante las horas pico de radiación la temperatura alcanza valores superiores entre 29 y 32°C. Por otra parte, la radiación solar máxima es de 547.98 W/m² y ocurre entre las 11 am y 12pm. Además, entre las 10 am y 2pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 400 W/m². El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 183.51 W/m².

Figura 25. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Noviembre 2024.



En la figura 25 se puede observar el perfil diurno de la radiación solar promedio durante el mes de noviembre del 2024. La radiación solar máxima es de 415.32 W/m^2 y ocurre entre las 11 am y 12pm. Además, entre las 10 am y 2pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 300 W/m^2 . Además, el promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 139.73 W/m^2 .

Figura 26. Perfil diurno de la radiación solar en la EBT – Diciembre 2023.



En la figura 26 se puede observar el perfil diurno de la radiación solar promedio durante el mes de diciembre del 2023. Se puede establecer que la radiación solar máxima es de 203.32 W/m^2 y ocurre entre las 12 pm y 1pm. Además, entre las 10 am y 3pm se hallan las horas pico de radiación solar, registrando valores superiores a 100 W/m^2 . El promedio de la radiación solar entre las 6am y 6pm es igual a 90.91 W/m^2 .

A continuación, se muestra la Tabla 5 que resume la información principal de la radiación solar y la temperatura de cada mes. Se colocará los valores máximos, lo promedios y el número de horas pico. La información presentada en esta tabla será crucial para optimizar los resultados de los simuladores desarrollados, ya que la zona de la EBT se caracteriza por no contar con cielos despejados de forma regular. La alta presencia de nubes afecta significativamente los valores máximos de radiación solar, lo que podría limitar el aprovechamiento óptimo de la potencia generada por los paneles solares.

Tabla 5. Resumen del análisis de las variables: radiación solar y temperatura.

Mes	Temperatura [°C] en horas pico de radiación	Radiación Solar Máxima [W/m ²]	Radiación Solar [W/m ²] y horas pico	Promedio de Radiación Solar entre 6am y 6pm
Enero	29°C – 30°C	377.56 W/m ²	300 W/m ² 11am a 2pm	147.76 W/m ²
Febrero	28°C – 30°C	317.40 W/m ²	200 W/m ² 11am a 3pm	148.20 W/m ²
Marzo	28°C – 30°C	229.43 W/m ²	185 W/m ² 10am a 2pm	110.05 W/m ²
Abril	26°C – 29°C	209.24 W/m ²	200 W/m ² 11am a 1pm	97.66 W/m ²
Mayo	25°C – 27°C	160.88 W/m ²	100 W/m ² 10am a 3pm	77.76 W/m ²
Junio	26°C – 28°C	197.34 W/m ²	100 W/m ² 10am a 1pm	75.68 W/m ²
Julio	25°C – 28°C	142.03 W/m ²	100 W/m ²	72.54 W/m ²

			11am a 2pm	
Agosto	27°C – 30°C	301.10 W/m ²	280 W/m ² 11am a 1pm	108.11 W/m ²
Septiembre	30°C – 32°C	498.84 W/m ²	500 W/m ² 11am a 1pm	173.28 W/m ²
Octubre	30°C – 32°C	547.98 W/m ²	400 W/m ² 10am a 2pm	183.51 W/m ²
Noviembre	---	415.32 W/m ²	300 W/m ² 10am a 2pm	139.73 W/m ²
Diciembre	---	203.32 W/m ²	100 W/m ² 10am a 3pm	90.91 W/m ²

2.2.2 Consumo de Energía de la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Para conocer, en que cantidad, el sistema de paneles fotovoltaicos puede reemplazar el uso del generador eléctrico es necesario calcular el consumo energético de la estación. De esta manera, se podrá obtener la energía que pueden producir los paneles y se comparará con la energía requerida para cubrir las necesidades de los diferentes edificios. El consumo energético se refiere a la cantidad de energía requerida por las personas de un determinado lugar para disfrutar de condiciones confortables y normalmente es medida en kilovatios-hora (kWh). Es decir, indica la demanda de la electricidad debido al uso de diferentes electrodomésticos, elementos de iluminación, y aparatos electrónicos durante un periodo de tiempo [16]

En este caso, para calcular el consumo energético de la estación se utilizó la información proporcionada por la estación sobre el inventario de dispositivos que poseen en el lugar. Se encontró los valores de la potencia máxima de cada dispositivo, el número de horas utilizado diariamente y el número de dispositivos de cada tipo. Los valores proporcionados por la

estación para los parámetros mencionados estaban divididos en tres secciones, los cuales se pueden observar en las Tablas 6, 7 y 8. Para calcular los kWh de cada dispositivo se utilizó la Ecuación (4):

$$Demanda\ Energética\ (kWh) = P(W) \times t(horas) \times n \times \frac{1kW}{1000W} \quad (4)$$

Donde P es la potencia en Watts, t es el número de horas que se utiliza el dispositivo y n es el número de dispositivos. Además, se incorpora un factor de conversión de W a kW.

Tabla 6. Dispositivos de la Casa de Estudiantes, Huéspedes y Administradores en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Aparato	Potencia Máxima Simultánea [W]	Uso Diario [horas]
44 lámparas Led	396	6
24 tomacorrientes	4800	4
1 Router	36	24

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Tabla 7. Dispositivos de la Casa Tigres en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Aparato	Potencia Máxima Simultánea [W]	Uso Diario [horas]
20 lámparas Led	180	6
10 tomacorrientes	2000	5
1 secadora	1800	4
2 lavadoras	3600	4
1 Router	36	24
2 aire Acondicionado	1800	6

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Tabla 8. Dispositivos del Laboratorio en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Aparato	Potencia Máxima Simultánea [W]	Uso Diario [horas]
20 lámparas Led	180	6
10 tomacorrientes	2000	5
1 Router	36	24
4 aire Acondicionado	3600	6

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Con estos valores se calculó la demanda energética diaria y anual para la estación de Biodiversidad del Tiputini. Teniendo en cuenta que en las Tablas 6, 7 y 8 se colocó la potencia máxima simultánea, es necesario resaltar que se calculó una potencia máxima individual para cada dispositivo. Para ello, se dividió la potencia máxima simultánea entre el número de dispositivos. Con ese valor de potencia y el número de horas se calculó el consumo de energía en kWh con la Ecuación (4) para cada dispositivo, con el fin de hallar el consumo energético total de cada sección de la Estación de Biodiversidad del Tiputini. Los valores del consumo de energía para la casa de estudiantes, huéspedes y administradores, la casa Tigres y el laboratorio se encuentran en las Tablas 9, 10 y 11.

Tabla 9. Consumo de Energía de la Casa de Estudiantes, Huéspedes y Administradores en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Aparato	Potencia Máxima Individual [W]	Consumo de Energía [kWh]
44 lámparas Led	9	2.38
24 tomacorrientes	200	19.20
1 Router	36	0.86
Total		22.44

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Tabla 10. Consumo de Energía de la Casa Tigres en la Estación de Biodiversidad del Tiputini

Aparato	Potencia Máxima Individual [W]	Consumo de Energía [kWh]
20 lámparas Led	9	1.08
10 tomacorrientes	200	10.00
1 secadora	1800	7.20
2 lavadoras	1800	14.40
1 Router	36	0.86
2 aire Acondicionado	900	10.80
Total		44.34

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Tabla 11. Consumo de Energía del Laboratorio en la Estación de Biodiversidad del Tiputini.

Aparato	Potencia Máxima Individual [W]	Consumo de Energía [kWh]
20 lámparas Led	9	1.08
10 tomacorrientes	200	10.00
1 Router	36	0.86
4 aire Acondicionado	900	21.60
Total		33.54

Fuente: Estación de Biodiversidad del Tiputini, 2024.

Con estos valores se obtuvo que el consumo energético diario es aproximadamente 100.33 kWh, mientras que, el consumo energético anual sería aproximadamente 36620.45 kWh.

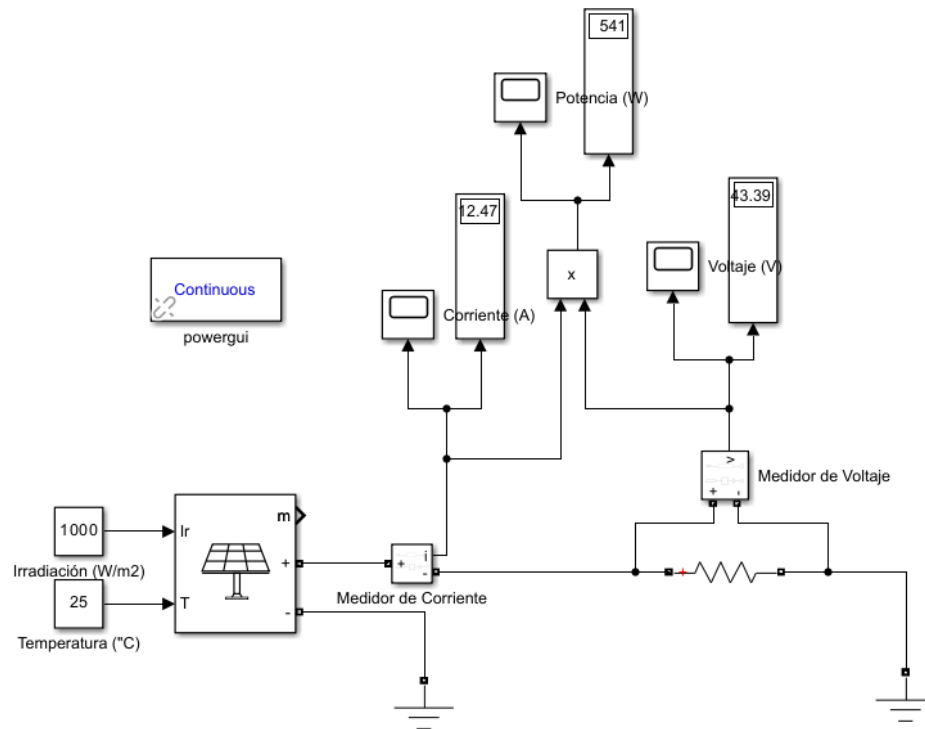
2.2.3 Modelo de Simulación de un Panel Solar Fotovoltaico con Baterías y Convertidor.

La simulación del panel fotovoltaico fue realizada en el software Simulink[®]. Esta es una herramienta de modelado y simulación gráfica integrada en MATLAB[®], es ideal para analizar sistemas dinámicos y diseñar sistemas de control. Funciona mediante diagramas de bloques que representan a distintos componentes del sistema. En este caso, los bloques utilizados son los componentes de una instalación fotovoltaica, su objetivo principal es la estimación de voltaje, corriente y potencia de un panel solar a partir de distintas entradas de temperatura e irradiación. Se realizaron dos modelos en el programa, el primero es la simulación del panel, aparatos electrónicos y cableado; mientras que la segunda muestra la simulación del panel conectado al banco de baterías. La primera permite conocer la potencia que se puede extraer del sistema y la segunda para poder apreciar cómo se carga y se descarga a medida que cambia la radiación solar.

Para el primer modelo, es un tipo de simulación constante. El bloque “Powergui” permite esta función, la cual es ideal para simular sistemas eléctricos en tiempo continuo. El primer bloque que se insertó en la hoja de trabajo es, “PV array”, el cual representa un panel fotovoltaico. Se utilizó un panel solar compuesto por módulos de 144 celdas cada uno. Este panel tiene unas especificaciones técnicas que incluyen un voltaje de corriente abierta (V_{oc}) de 49.9 V y una corriente de circuito corto (I_{sc}) de 14.00 A. Además, su voltaje a máxima potencia (V_{mp}) es de 41.95 V, mientras que su corriente a máxima potencia (I_{mp}) es de 13.11 A. Estas características permiten que el panel genere energía de manera eficiente bajo distintas condiciones ambientales, asegurando su rendimiento en diversas aplicaciones. Posteriormente, los valores de temperatura e irradiación solar son conectados directamente al panel por medio del bloque “constant” esto permite ingresar un valor constante a la simulación del panel. Como se ven en la Figura 27, los bloques para medir la corriente y el voltaje generado por el panel

serán conectados al terminal positivo. Los nombres son “medidor de corriente” y “medidor de voltaje”.

Figura 27. Modelo que incorpora la Potencia Final generada por los paneles.



A cada uno de los medidores se los relacionó con los bloques “display” y “scope”. Permite visualizar el valor correspondiente a la corriente o voltaje del panel, y muestra las señales durante la simulación, correspondientemente. A continuación, la potencia del panel es generada por el producto entre la corriente y el voltaje, en la simulación se utilizó el bloque “product”. De igual manera, se añade los bloques “scope” y “display” al bloque “product” para poder visualizar el valor de potencia y las gráficas de las variaciones de las señales.

Finalmente, sobre las conexiones entre los bloques, es importante mencionar que la corriente es medida en serie y el voltaje en paralelo. En Simulink es posible hacer estas conexiones en paralelo para una resistencia, proporcionada por el bloque “Series RLC branch”.

Tanto los bloques de panel solar como la resistencia son conectados a tierra desde sus terminales negativos, esto es realizado con el bloque “ground”.

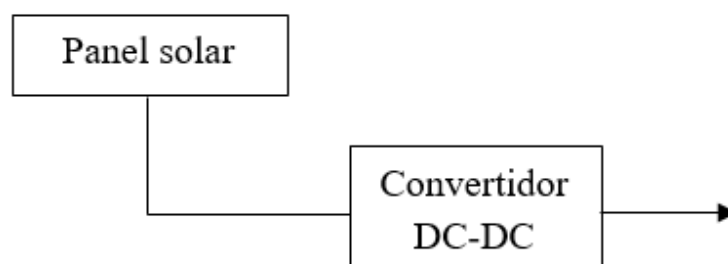
Para el segundo caso, se utilizó la misma configuración eléctrica del panel del primer modelo. De igual manera, conectado al panel, se encuentran dos constantes ajustables que representan la irradiación solar y la temperatura. La constante de irradiación solar, expresada en W/m^2 , se utiliza para replicar diferentes niveles de energía solar disponibles, mientras que la constante de temperatura, expresada en $^{\circ}C$, permite ajustar el efecto de las condiciones térmicas sobre el rendimiento del panel. Este enfoque facilita la simulación y el análisis del comportamiento del sistema fotovoltaico en diferentes escenarios.

El panel está conectado a un bus selector, que toma como entrada el voltaje (V_{pv}) y la corriente (I_{pv}) producidos por el panel para hacer el monitoreo y la transmisión de las variables eléctricas generadas. El voltaje indica la diferencia de potencial generada, mientras que la corriente refleja el flujo de energía eléctrica. Esta herramienta organiza y dirige estas variables hacia otros subsistemas, facilitando el control y la optimización del sistema. Además, para el monitoreo de las mismas variables a lo largo del sistema, se conectan medidores de corriente y voltaje, que registran el flujo de energía y los valores de voltaje.

El siguiente proceso en un sistema fotovoltaico es la conexión a un convertidor, como se ve en la Figura 28. Sin embargo, en nuestro modelo se requieren de pasos intermedios. Primero, para poder extraer la máxima potencia de la corriente y voltaje generados por el panel (i_{pv} y v_{pv}) se utiliza el algoritmo MPPT. De este, se extrae el ciclo de trabajo (duty) para ingresar los valores a un convertidor DC – DC. Este convertidor regula el voltaje de salida del panel, asegurando que se mantenga en niveles óptimos para el correcto funcionamiento del sistema. Además, adapta el voltaje generado a las necesidades específicas de los componentes conectados, como sistemas de almacenamiento de energía o cargas directas. Posteriormente,

La energía convertida (s_boost) fluye a través de sus terminales positivo y negativo hacia un conjunto formado por un IGBT (Transistor Bipolar de Puerta Aislada) y un diodo. Este conjunto tiene la función de optimizar la eficiencia del panel al permitir un control preciso del flujo de energía hacia los componentes posteriores.

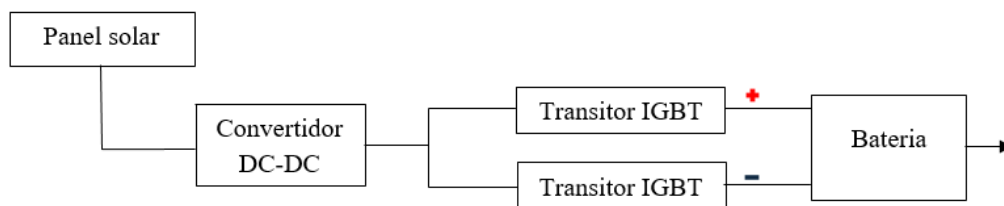
Figura 28. Segundo modelo de paneles hasta convertidor DC-DC



Cabe mencionar que, durante esta etapa y los siguientes pasos, la corriente fluye a través de varios componentes eléctricos como inductancias, resistencias y capacitores. Las inductancias, conectadas en serie, actúan como filtros que suavizan las fluctuaciones de corriente, mientras que las resistencias, también en serie, limitan el flujo de corriente, protegiendo los componentes del sistema. Los capacitores, conectados en paralelo, estabilizan la señal de voltaje al almacenar energía temporalmente y compensar variaciones.

El último proceso de este tipo de sistemas son las conexiones a baterías. En este modelo, el circuito sigue avanzando hasta alcanzar dos IGBT/diodos ubicados antes de la batería, diseñados para trabajar con corriente positiva y negativa. El flujo bidireccional de energía generado asegura que la batería pueda tanto almacenar como suministrar energía según sea necesario. Como se ve en la Figura 29, una vez que la corriente fluye a través de los IGBT positivo y negativo, se conecta hacia la batería del sistema.

Figura 29. Sistema simulado hasta la incorporación de la batería.



Para la simulación se determinó para la batería un voltaje nominal de 12 V y una capacidad nominal de 100 Ah, lo que la hace adecuada para almacenar y suministrar energía en aplicaciones de pequeña o mediana escala. Además, un estado de carga del 45 %, lo que representa su nivel actual de energía disponible en relación con su capacidad máxima. Esta configuración permite evaluar tanto la capacidad de carga de la batería, a medida que recibe energía del sistema fotovoltaico, como su capacidad de descarga cuando suministra energía a las cargas conectadas.

En el momento que se ejecuta la simulación se generan gráficas que muestran la variación de distintos componentes como voltaje, corriente, potencia con respecto a un cambio de temperatura e irradiación solar. En el eje x del gráfico se ubica el tiempo de la simulación. Esta puede ser tan corta como un par de segundo hasta un tiempo infinito. La simulación fue realizada con los datos de la Tabla 12. Se utilizaron 5 intervalos de tiempo, los cuales fueron divididos en partes iguales, simultáneamente se insertaron los valores de radiación para las 6:00, 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00. El proceso fue repetido para los doce meses del año. Las gráficas generadas se pueden observar en la sección de resultados, desde la figura 40 en adelante.

Tabla 12. Radiación solar por mes y hora.

Mes/Hora	Radiación Solar [W/m^2]				
	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00
Enero	0	90	350	150	10
Febrero	0	80	290	150	10
Marzo	0	80	210	100	10
Abril	0	90	200	110	10
Mayo	0	50	250	80	10
Junio	0	40	200	80	10
Julio	0	30	170	80	10
Agosto	0	50	300	100	5
Septiembre	0	200	500	110	5
Octubre	0	190	500	110	5
Noviembre	0	110	410	50	5
Diciembre	0	60	270	100	5

2.2.4 Estimación de la cantidad de paneles solares fotovoltaicos de la EBT.

Para realizar la estimación de cuántos paneles solares necesita la EBT se utilizará los valores de la potencia nominal del panel. En este caso, el panel solar fotovoltaico simulado en Matlab tiene una potencia de 550W. Es decir, el panel utilizado tiene una capacidad de generar 550 vatios de potencia bajo condiciones ideales de operación, esto se refiere cuando la radiación solar es de 1000 W/m² y la temperatura es 25°C. Sin embargo, en la estación estas condiciones no son alcanzadas debido a varios factores como la densidad de la vegetación, la nubosidad y la alta humedad. Por esta razón, para calcular el número de paneles solares será necesario determinar las horas pico de energía solar que hace referencia a la irradiación solar efectiva. Las horas solares pico se pueden definir como la cantidad de radiación solar que recibe una superficie en un día, es decir, el número de horas equivalentes de radiación solar a 1000 W/m², que es la potencia estándar necesaria de un panel solar fotovoltaico para funcionar a su capacidad máxima. Por ejemplo, si un lugar tiene una irradiación solar efectiva de 5 horas, significa que esa superficie habrá recibido 5000 Wh/m² al día. Para ello se hace la sumatoria de la radiación promedio de cada hora durante todo el día, de esta manera, se obtiene la irradiación solar efectiva del sitio [14].

La primera opción utilizada para determinar la cantidad de paneles solares se realizará a partir de los cálculos detallados en las Ecuaciones 5 y 6. La primera ecuación sirve para determinar la potencia que se necesita generar por los paneles solares a partir de la irradiación solar efectiva (número de horas de sol) y la segunda sirve para determinar el número de paneles a partir de la potencia requerida y la potencia de los paneles solares (550W).

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} = \frac{\text{Consumo Energético Diario de la EBT (kWh)}}{\text{Irradiación Solar Efectiva (nº de horas)}} \quad (5)$$

$$\text{Número de Paneles [W]} = \frac{\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} \times \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{\text{Potencia de un Panel [W]}} \quad (6)$$

La segunda opción utilizada se basará en el modelo de simulación del panel solar fotovoltaico con la batería y convertidor. De esta manera, se insertará los valores de la radiación solar y la temperatura para obtener el valor de la potencia máxima generada por los paneles. Este valor será multiplicado por el número de horas que alcanza dicha radiación solar y se obtendrá una potencia generada a lo largo del año. Posteriormente, se obtendrá un valor de la potencia anual generada por un panel solar. Allí se dividirá el consumo energético anual de la EBT entre la potencia, obteniendo un valor que representa el número de paneles solares. No obstante, se calculará el área que ocupan los paneles solares y se comparará con el área disponible en la ETB, esto con el objetivo de determinar cuántos paneles podrían ser incorporados y cuánta energía puede ser generada de manera sostenible.

2.3 Análisis del Ciclo de Vida

El ciclo de vida es un enfoque analítico que permite evaluar los impactos asociados a un producto o sistema desde la fabricación de sus partes hasta su disposición final. Este análisis considera todas las etapas del proceso productivo, desde la extracción de materias primas, producción, transporte, uso, recuperación hasta el fin de vida del producto. El objetivo es cuantificar el impacto real que tendrá el uso de esta tecnología, identificando los flujos de entrada y salida, como se describe en la Tabla 13 [17].

Tabla 13. Etapas del ciclo de vida.

Etapas	Descripción	Flujo de Entrada	Flujo de Salida	Emisiones de CO_2
Extracción de materias primas	La producción de silicio es una de las fases con mayor impacto, debido al alto consumo energético requerido para la purificación y el procesamiento del silicio. Además, los materiales como el aluminio, vidrio y encapsulantes también contribuyen significativamente a la demanda energética en esta etapa.	Minerales, agua, energía, combustibles fósiles. Materias primas, energía eléctrica y agua.	Materias primas (silicio, aluminio, cobre), emisiones de CO_2 y otros contaminantes atmosféricos, residuos de extracción.	Las emisiones generadas por la extracción de materiales y la producción del panel son igual a 4352 kg CO_2 . Esto equivale al 92% del
Producción	Esta fase incluye la fabricación de Los módulos fotovoltaico, particularmente el silicio multicristalino, así como la producción de los materiales para la estructura de soporte y otros componentes auxiliares.	Materias primas, energía eléctrica , agua	Paneles solares, emisiones de CO_2 , residuos industriales, calor residual	impacto total del sistema.

Transporte	En esta etapa, se considera el impacto ambiental generado por el transporte de los materiales desde los sitios de producción hasta el lugar de instalación del sistema fotovoltaico.	Combustibles fósiles, energía	Emisiones de CO_2 , desgaste de equipos de transporte.	El impacto por transporte es de 94 kg de CO_2 , lo que equivale al 2%
Instalación y Operación	Esta fase incluye los materiales utilizados para las estructuras de soporte y los procesos involucrados en la instalación del sistema fotovoltaico. El impacto ambiental en esta fase es mayor debido a los materiales utilizados en las estructuras y componentes eléctricos del sistema.	Paneles solares, estructuras de soporte, herramientas, mantenimiento, agua, detergentes	Electricidad limpia, residuos por mantenimiento, pequeñas emisiones indirectas.	El impacto por instalación es de 284 kg CO_2 , lo que equivale al 6% del impacto total.
Recuperación	Desmantelamiento del sistema al final de su vida útil, incluyendo el reciclaje de materiales útiles. Pese a que	Paneles solares usados, equipos de	Materiales reciclados (vidrio, aluminio, cobre), residuos no	El impacto es insignificante, esto debido a que se

	gran parte de los paneles tiene materiales reciclables, este proceso requiere de un consumo energético.	desmantelamiento, energía	reciclables, emisiones de CO_2	asume que los componentes se dispondrán en un vertedero.
Disposición Final	Al final de la vida útil del sistema fotovoltaico, se asume que los componentes se dispondrán en un vertedero sin procesos de reciclaje o recuperación de materiales.	Residuos no reciclables, energía	Residuos sólidos, emisiones de CO_2 , contaminación potencial	

Fuente: R. Battisti and A. Corrado (2005).

Para evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto, se calculará el tiempo de retorno tanto para las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) como para la inversión económica. Dado que cada etapa del proceso productivo genera emisiones o subproductos contaminantes, será necesario compensar dichas emisiones a lo largo del tiempo hasta alcanzar un balance que permita considerar al sistema como energía limpia. El cálculo se realizó comparando las emisiones evitadas al no usar generadores a diésel, con las emisiones totales asociadas al ciclo de vida de los paneles solares.

De igual manera, el costo de adquisición de los paneles generalmente representa una inversión alta, la cual se recupera al eliminar el consumo de otras formas de energía, el tiempo que le tome compensar el costo económico dirá la rentabilidad del proyecto. Este análisis económico incluirá la estimación del costo total de instalación del sistema, en función del número de paneles solares requeridos y sus componentes asociados. A partir de esta inversión inicial y considerando el ahorro generado por la reducción en el uso de combustible fósil para el generador eléctrico actual, se determinará el periodo en el que la inversión será recuperada.

Según el análisis del ciclo de vida realizado en el estudio, las etapas con mayor impacto ambiental son la producción y la instalación. La producción de los módulos fotovoltaicos, especialmente la fabricación del silicio es responsable de la mayor parte de los impactos debido al consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero asociados a la producción. La instalación también tiene un impacto significativo, especialmente debido al uso de materiales como el aluminio en las estructuras de soporte. Por otro lado, las fases de transporte y disposición final tienen un impacto ambiental mucho menor [18].

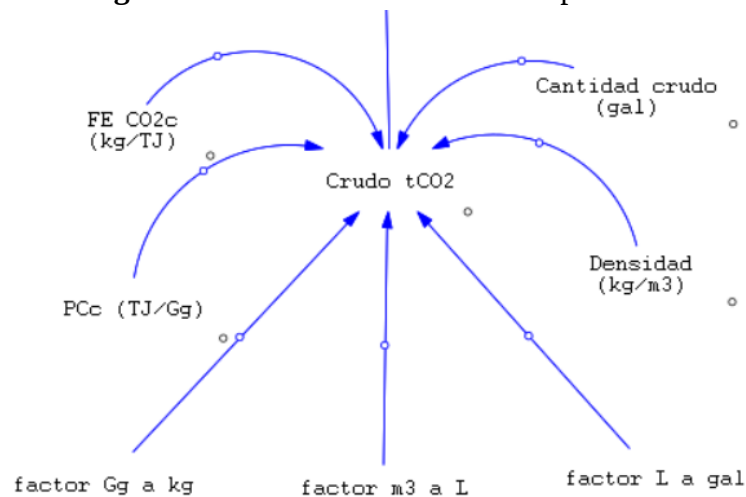
3 RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de Huella de Carbono

Modelo Factor de Emisión

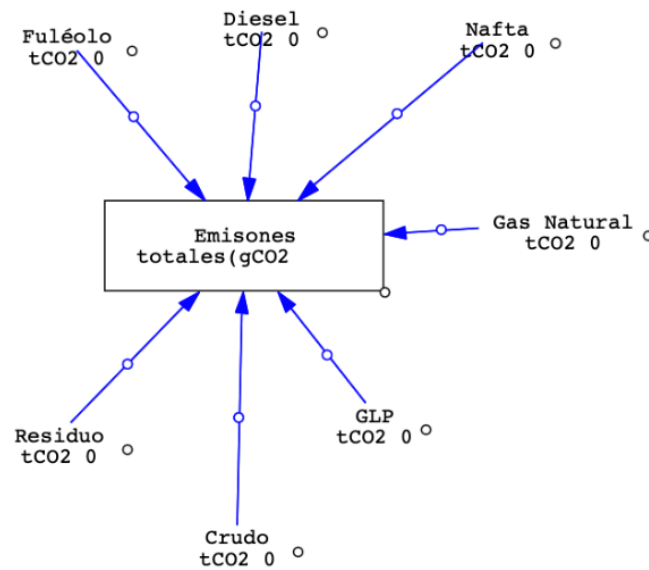
En relación con el cálculo del factor de emisión, se obtuvo un modelo que permite calcular el factor de emisión del país de forma rápida y sencilla. Esto a partir de la cantidad de combustible quemado, su poder calorífico, densidad y factor de emisión. Las Figuras 30-34 muestran los resultados del modelo del factor de emisión.

Figura 30. Estimación de emisiones para crudo.



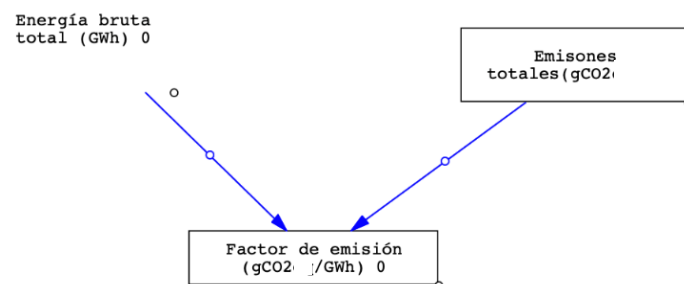
La Figura 30, grafica el primer paso a calcular mediante el modelo. Para determinar la cantidad de emisiones de un determinado combustible como en este caso del crudo. Los valores de poder calorífico, factor de emisión, cantidad y densidad son ingresados como constantes y se opera como se describe en la metodología. Posteriormente este esquema se repetirá para los diferentes tipos de combustibles.

Figura 31. Modelo para estimación de emisiones totales.

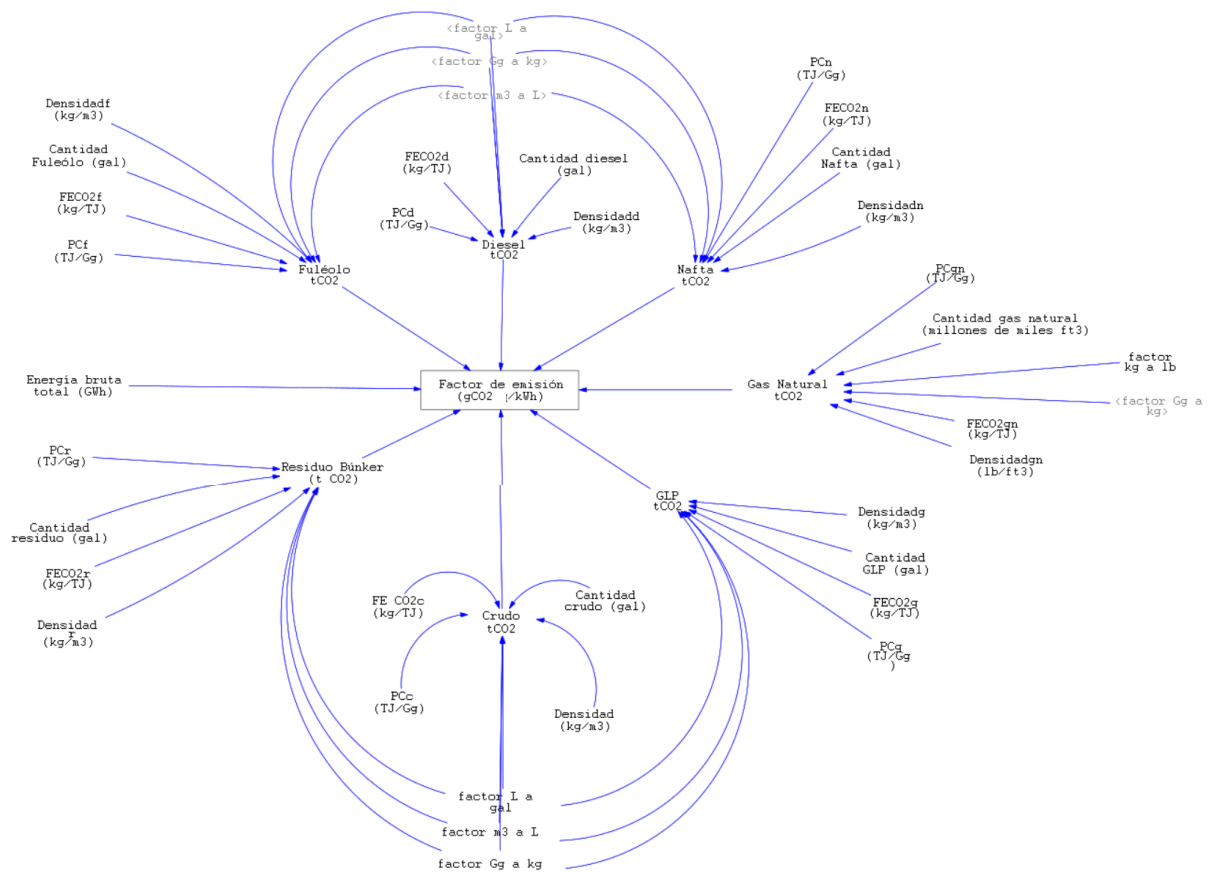


El siguiente paso para construir el modelo fue determinar las emisiones totales. En la Figura 31 se ve cómo se conecta las emisiones de cada tipo de combustible para formar una variable de emisiones totales.

Figura 32. Modelo para calcular el factor de Emisión.



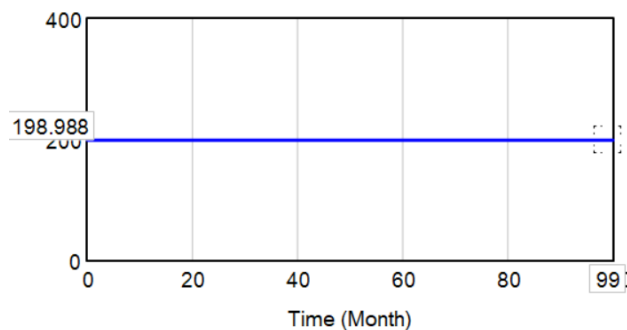
En la Figura 32 conectamos las variables como la energía bruta al factor de emisión (FE) y las emisiones totales al factor de emisión. Dentro de la plataforma de Vensim se determina que el factor de emisión sea una función del producto entre la energía total bruta y las emisiones totales.

Figura 33. Modelo para cálculo de factor de emisión.

Uniendo los diferentes componentes del modelo se obtiene el esquema de la Figura 33. En el cual se integra las emisiones de los diferentes tipos de combustibles y la generación de energía. De esa manera se calculó el factor de emisión del país a partir de los combustibles utilizados.

Figura 34. Factor de Emisión del 2022 en Ecuador.

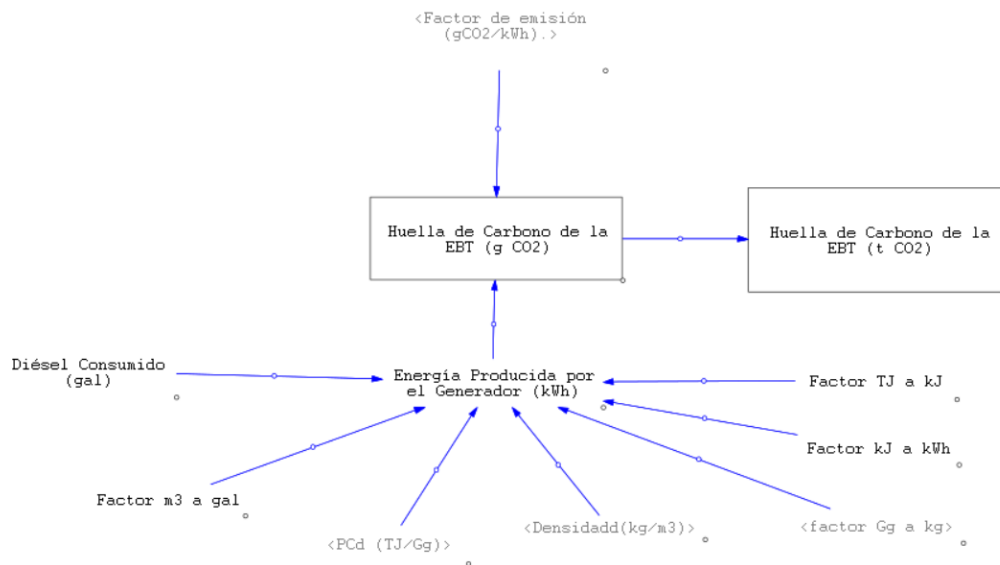
"Factor de emisión (gCO₂/kWh)"



En la Figura 34 se puede observar que al final de todo el procedimiento se obtuvo un factor de emisión igual a 198.99 gCO₂/kWh.

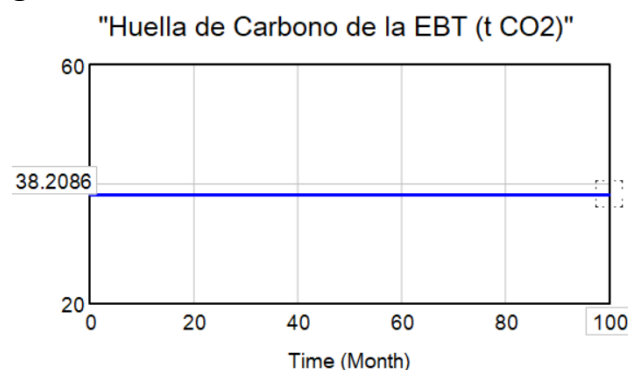
Emisiones Directas de la EBT debido al generador.

Figura 35. Modelo para calcular la huella de carbono del generador de la EBT.



En la Figura 35 se puede observar el modelo utilizado para calcular la huella de carbono del generador en la Estación de Biodiversidad del Tiputini a partir de la energía producida por el generador y el factor de emisión. Para ello, se utilizó el factor de emisión obtenido previamente en la primera simulación, es decir $198.99 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$. Además, para calcular la energía producida por el generador (kWh) se tomó en consideración la cantidad de diésel consumido, el poder calorífico del diésel y la densidad.

Figura 36. Huella de Carbono del Generador de la EBT.

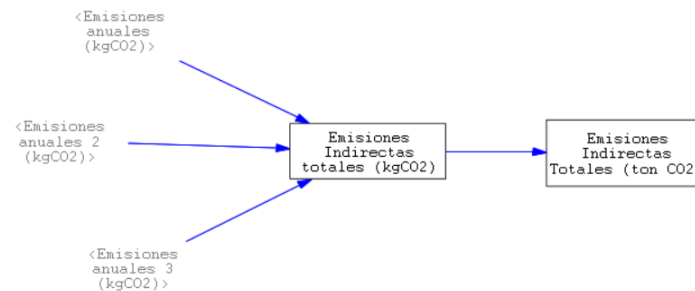


En la Figura 36 se puede observar la huella de carbono calculada para el generador de la Estación de Biodiversidad del Tiputini. En este caso, si se utiliza la energía producida por el

generador a partir de la cantidad de combustible utilizado y el factor de emisión calculado, se obtuvo un valor de 38.21 t CO_2 . Siendo esta la huella de carbono de la Estación por el uso de generadores para producir energía.

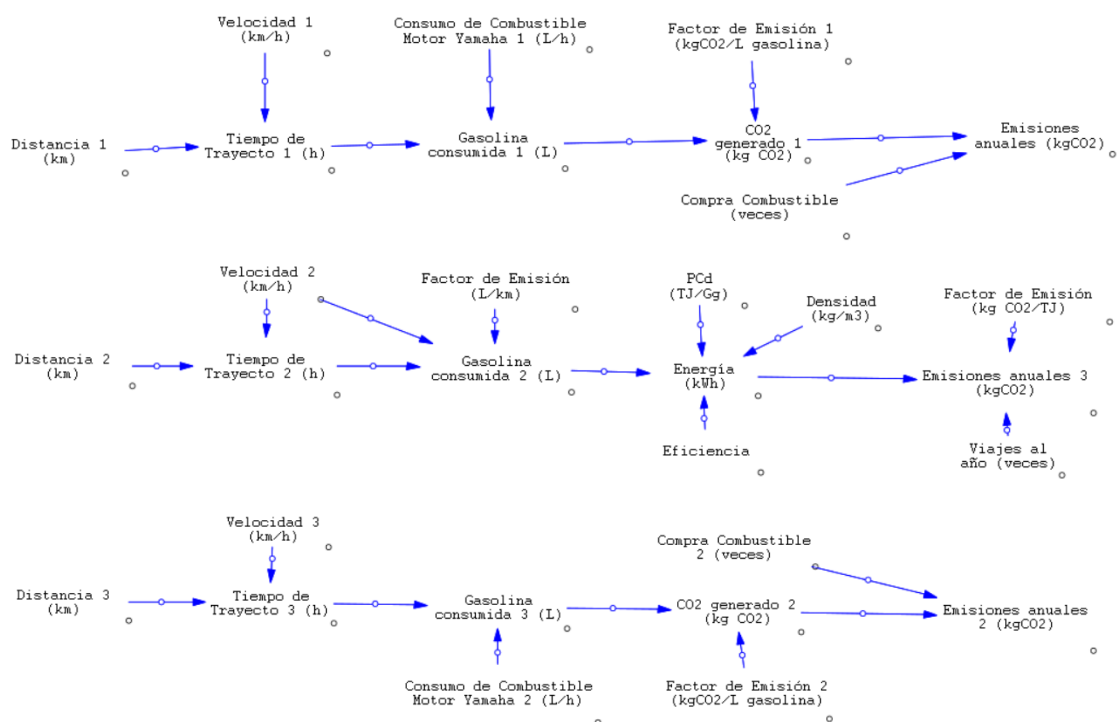
Emisiones Indirectas de la EBT debido al transporte de combustible.

Figura 37. Modelo para calcular las emisiones indirectas por transporte.



En la Figura 37 se puede observar el modelo utilizado de las emisiones anuales para los dos trayectos por agua y un trayecto por tierra. La suma de estas emisiones por tramos da el valor final de las emisiones indirectas totales con respecto al transporte de los combustibles.

Figura 38. Modelo para calcular las emisiones indirectas por trayecto.



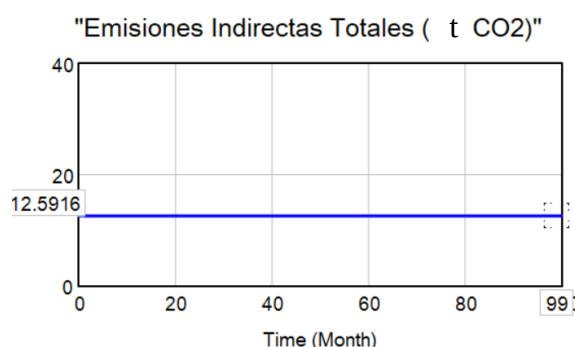
En la Figura 38 se puede observar el modelo final utilizado para calcular las emisiones indirectas por diferentes trayectos. En cada uno se utiliza las distancias recorridas, las velocidades promedio, el consumo de combustible, los factores de emisión, la energía generada y las emisiones de dióxido de carbono producidas.

Se utilizó el software Vensim para relacionar todas las variables involucradas en el cálculo de las emisiones indirectas por transporte. Los resultados que arrojó el programa son los siguientes. En el primer trayecto 5119.87 kg de CO_2 fueron calculados debido a las emisiones del motor de la lancha, en el tercer trayecto el valor es de 7144.00 kg CO_2 . Por otra parte, el segundo trayecto es realizado en camioneta, el valor calculado por el programa es 327.69 kg CO_2 al año. Existe una importante diferencia en los valores calculados, la razón principal son los distintos factores de emisión de un motor a gasolina y uno a diésel. La distancia recorrida también es mayor en los trayectos donde la lancha es usada, lo cual incrementa el tiempo que el medio de transporte es utilizado. Finalmente, el valor total debido a las emisiones indirectas debido a medios de transporte es un año es de 12591.60 kg CO_2 . Estos resultados se encuentran explícitos en la Tabla 14 que resume las emisiones indirectas de dióxido de carbono de la EBT.

Tabla 14. Emisiones Indirectas de la EBT.

Trayecto	Distancia Recorrida (km)	Emisiones de dióxido de Carbono Anuales (t CO_2)
El Coca – Pompeya (lancha)	43	5.12
Pompeya – Estación Yasuní (camioneta)	65	0.33
Estación Yasuní – Estación Tiputini (lancha)	60	7.14
Total	168	12.59

Figura 39. Huella de Carbono de la EBT debido a las emisiones indirectas.



En la figura 39 se puede observar el resultado de la huella de carbono de la EBT debido a las emisiones producidas por el transporte de combustible. Se obtuvo un valor de 12.59 t CO_2 anuales. Esto representa las emisiones que se generan debido a los transportes utilizados para llevar el diésel de las ciudades más cercanas a la estación.

Las emisiones directas de la EBT debido al generador eléctrico son igual a 38.21 toneladas de CO_2 . Mientras que, las emisiones indirectas por transporte de los combustibles equivalen a 12.59 toneladas de CO_2 . Esto muestra que las emisiones por transporte son menores en comparación con las emisiones del generador, pero aún siguen siendo altas y significativas para la huella de carbono. Por lo que, se puede determinar que la huella de carbono total de la estación, teniendo en cuenta las emisiones directas e indirectas, es aproximadamente 50.8 toneladas de CO_2 .

La huella de carbono de la EBT debe ser analizada dependiendo el contexto. Ya que, al encontrarse en una comunidad aislada en la Amazonía, el uso de generadores a diésel es muy común debido a la falta de acceso a la red eléctrica. Este valor de 50.8 t CO_2 es razonable considerando todas las limitaciones que se tiene en el lugar. Sin embargo, al compararse con sistemas sostenibles como paneles solares este valor podría ser significativamente muy alto. Por ejemplo, en un estudio sobre la absorción de dióxido de carbono se encontró que un árbol maduro (como los hallados en la Amazonia) puede absorber CO_2 a un ritmo de 21.7 kg por año

[20]. Esto implica que se necesitaría aproximadamente 2341 árboles maduros para poder absorber la cantidad de dióxido de carbono emitido debido al uso de generadores en la ETB. Además, si se considera que un vehículo común de 5 pasajeros emite alrededor de 4.6 toneladas de CO_2 por año [21], se necesitaría aproximadamente 11 vehículos para poder tener la misma huella de carbono que la EBT durante un año. Estos dos ejemplos permiten tener una mejor visión del impacto de los usos de generadores en la EBT ya que las emisiones directas e indirectas hacen que la huella de carbono sea moderadamente alta considerando el contexto de operación y esto permite dimensionar el impacto ambiental del uso de generadores en la EBT. Aunque no se cuenta con un estándar universal para determinar si una huella de carbono es alta en este contexto específico, comparaciones como la cantidad de árboles necesarios para compensar estas emisiones o la equivalencia con vehículos sugieren que el valor de 50.8 toneladas de CO_2 podría considerarse elevado, especialmente cuando se analiza desde una perspectiva de sostenibilidad y la posibilidad de implementar tecnologías renovables que reduzcan significativamente este impacto.

3.2 Simulación Sistema fotovoltaico

En relación con la primera opción para calcular el número de paneles solares necesarios se determinó la irradiación solar efectiva de cada mes. Para ello, se sumaron los promedios de la radiación solar de cada hora y se obtuvo un valor de la radiación solar total recibida durante el día. Es decir, un valor acumulado de la radiación solar, esto con el objetivo de determinar las horas pico de radiación solar (dividiendo la radiación solar total entre 1000 W/m^2) para realizar los cálculos detallados en la metodología. Para determinar un valor promedio de la irradiación solar efectiva se tomó en consideración el valor de cada mes como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Irradiación Solar Efectiva y Número de Horas de Radiación Solar.

Mes	Radiación Solar Total en el día [W/m ²]	Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]
Enero	1645.93	1.65
Febrero	1721.47	1.72
Marzo	1364.04	1.36
Abril	1179.37	1.18
Mayo	900.41	0.90
Junio	924.05	0.92
Julio	806.20	0.81
Agosto	1279.07	1.28
Septiembre	2260.78	2.26
Octubre	2287.51	2.29
Noviembre	1530.42	1.53
Diciembre	1083.95	1.08
Promedio		1.42

Con este valor de la irradiación solar efectiva (número de horas de sol) se procedió a calcular el número de paneles necesario para cubrir la demanda energética de la estación. Para ello se realizó los siguientes cálculos con diferentes números de horas de irradiación solar efectiva, el caso presentado es el escenario ideal de 3 horas:

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} = \frac{\text{Consumo Energético Diario de la EBT (kWh)}}{\text{Irradiación Solar Efectiva (nº de horas)}}$$

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} = \frac{100.33 \text{ kWh}}{3} = 33.44 \text{ kW}$$

$$\text{Número de Paneles [W]} = \frac{\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} \times \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{\text{Potencia de un Panel [W]}}$$

$$\text{Número de Paneles [W]} = \frac{33.44 \text{ [kW]} \times \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{550 \text{ W}} = 60.81 \text{ paneles}$$

Los resultados del número de paneles de acuerdo con la irradiación solar efectiva se resumen en la Tabla 16. Allí se muestra diferentes casos dependiendo del número de horas y teniendo en cuenta que cada hora de irradiación solar efectiva significa que el panel recibió 1000 W/m² y generó una potencia de 550W. Esto se puede corroborar con el primer modelo desarrollado ya que, en la figura 40 se puede observar que, si se inserta una radiación de 1000 W/m² y 25°C, se obtiene que el panel solar genera una potencia de 550W.

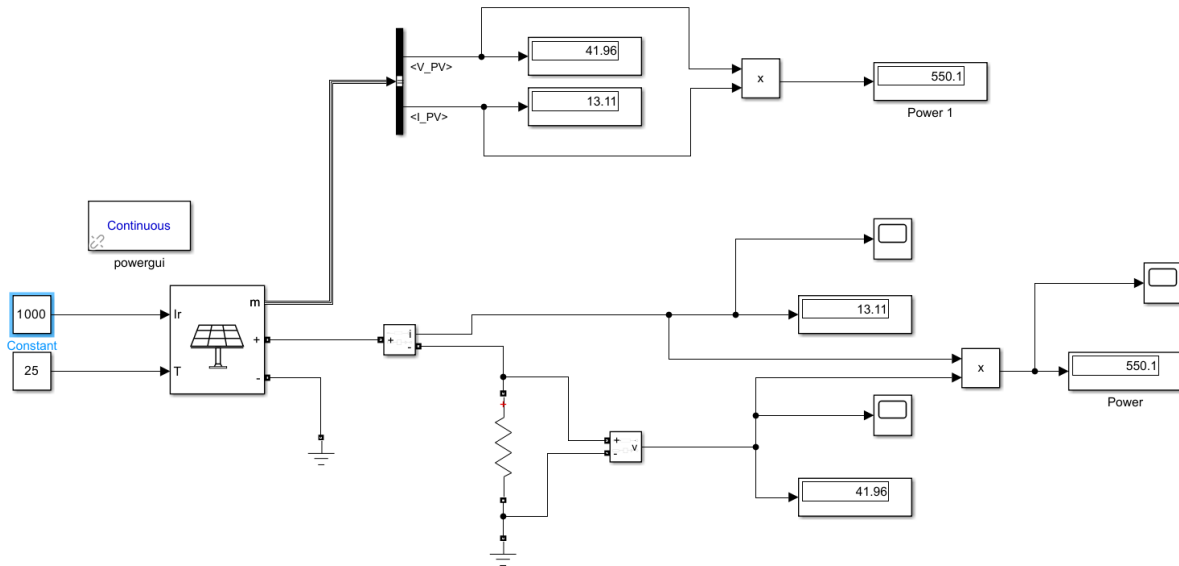
Tabla 16. Número de paneles solares necesarios para cubrir la demanda de la EBT.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	Potencia Necesaria de los Paneles [kW]	Número de Paneles Solares Fotovoltaicos
3.00	33.44	60.81
2.00	50.16	91.21
1.42	70.65	128.46
1.00	100.33	182.41

Los resultados presentados en la tabla 16 indican que, tras analizar la cantidad de radiación solar disponible en la EBT, se estima que serían necesarios aproximadamente 129 paneles solares para cubrir completamente la demanda energética del sitio. Para ello, es necesario hacer un análisis y comparar el área disponible de la EBT con el área ocupada por dicho número de paneles. Sin embargo, dicha comparación se realizará después de analizar la segunda opción que utiliza un segundo modelo desarrollado en Simulink, en el cual se debe

considerar la temperatura del lugar y la radiación solar para determinar la potencia y energía que podrían generar los paneles solares durante el año.

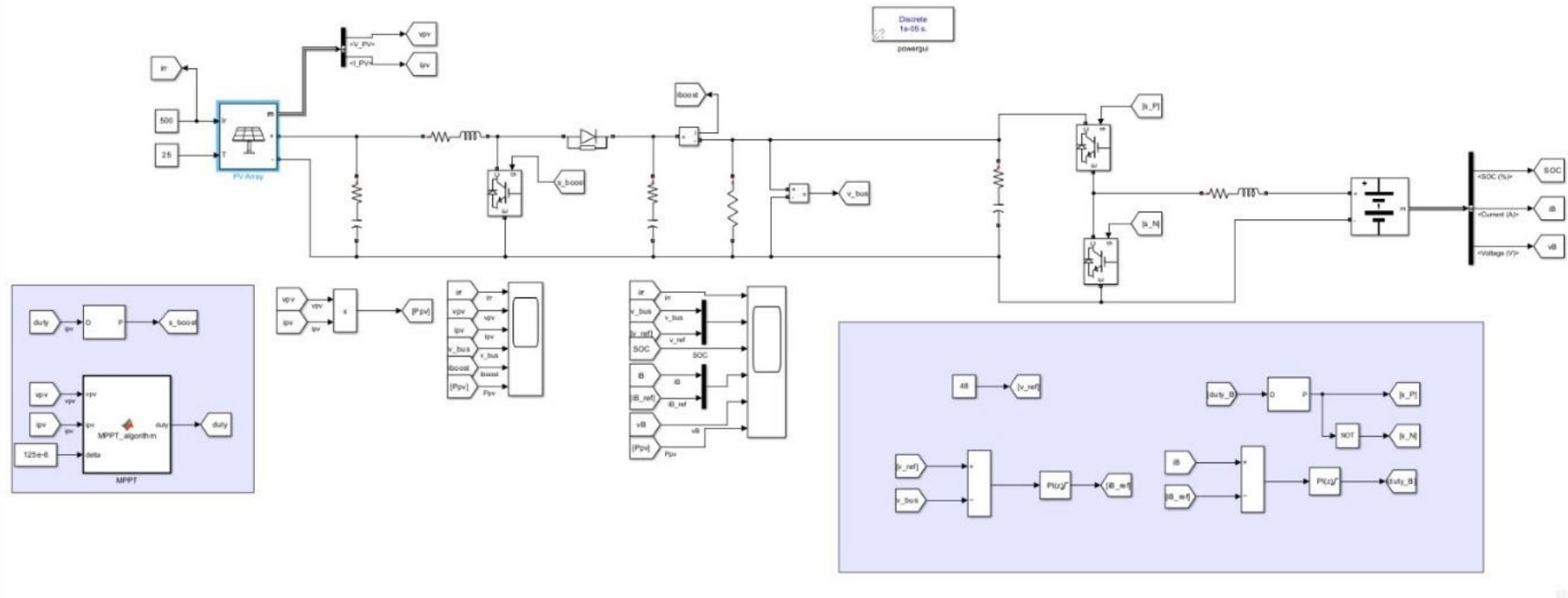
Figura 40. Simulación del modelo de un panel solar fotovoltaico de 550W.



En la figura 40 se puede observar el modelo desarrollado en Simulink de un panel solar fotovoltaico de 550W. Cuando se inserta una radiación solar de 1000 W/m² y 25°C, el panel genera una potencia de 550W por cada hora que reciba esas variables de radiación y temperatura.

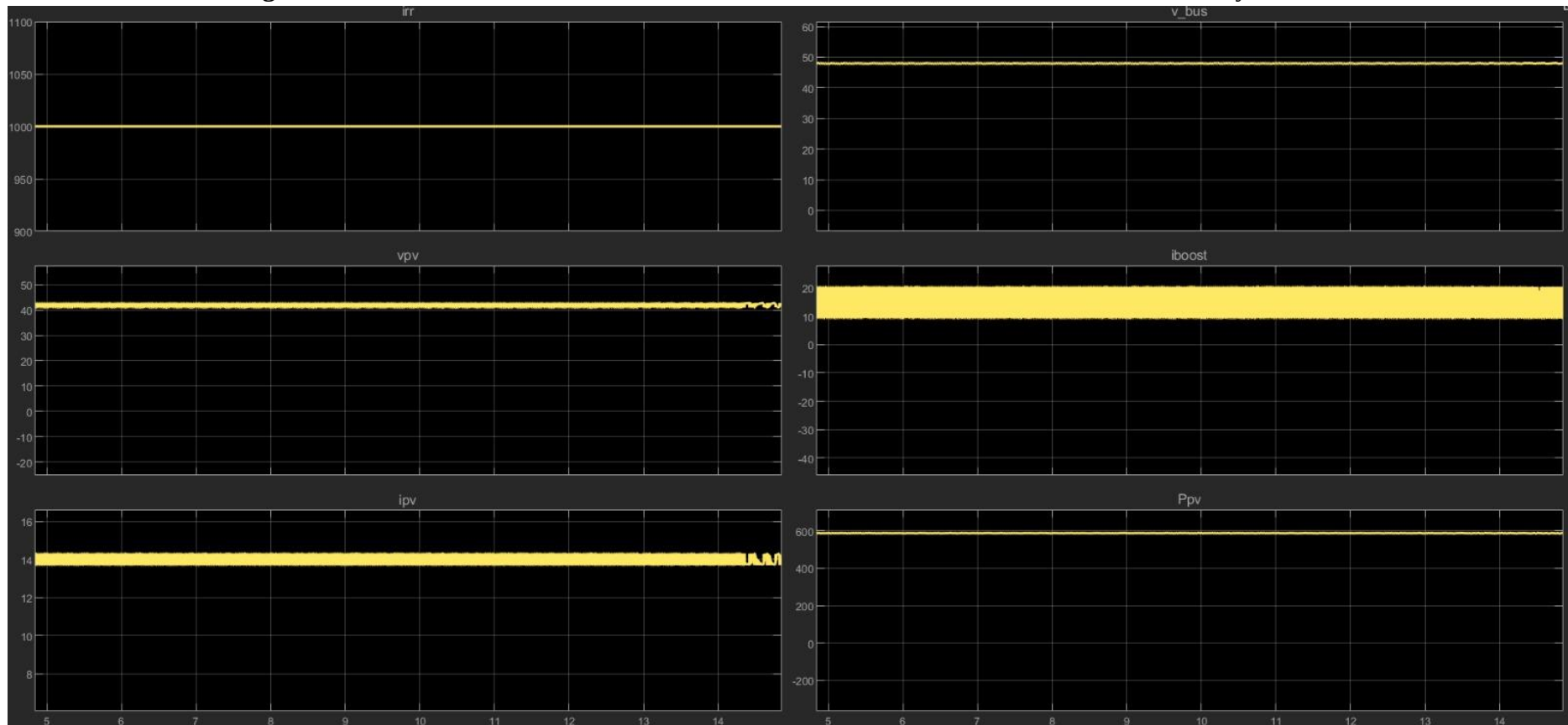
Para la segunda opción se utilizó el modelo de la figura 41, donde se implementó una batería. En este, los valores obtenidos por la potencia se pueden observar en distintas gráficas, como se observa en la figura 42. Por lo que, se insertó los valores de radiación solar máxima y temperatura máxima en el modelo, para obtener la potencia que podría generar el panel solar en una hora con los valores de aquellas variables. Posteriormente, se utilizó el número de horas pico de radiación solar descritas en la tabla 4 para cada mes. De esta manera, se obtuvo la potencia promedio generada por los paneles solares. Además, los valores del simulador para la potencia generada en cada mes se pueden observar desde la figura 43 hasta la figura 54.

Figura 41. Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor.



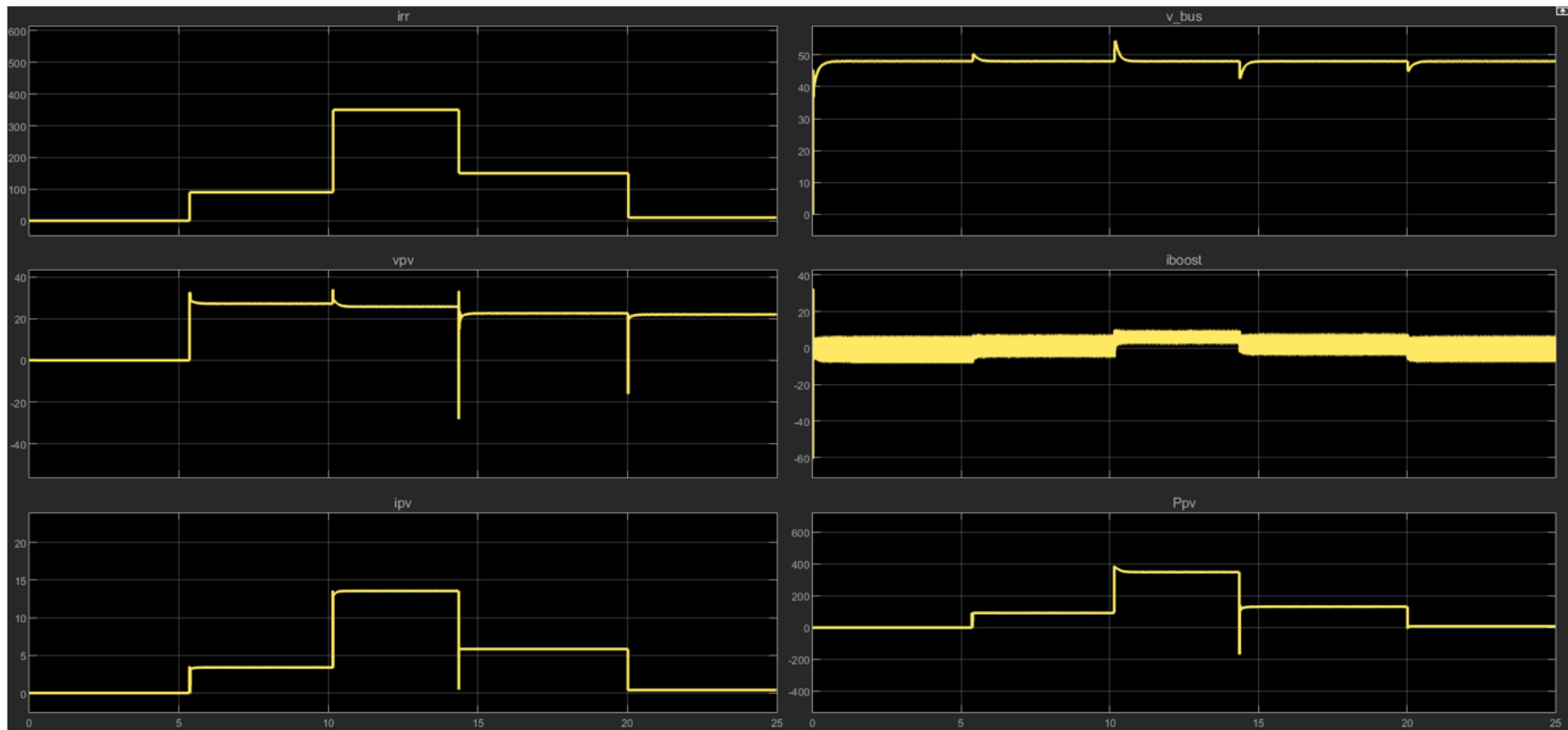
En la figura 41 se puede observar el modelo creado en Simulink del panel solar fotovoltaico que tiene una batería y un convertidor. El mismo se basa en el principio del primer modelo; sin embargo, incorporar dos elementos claves. La batería para almacenar la energía en días con alta radiación solar, y el convertidor para transformar la corriente directa generada por paneles solares en corriente alterna, que es la electricidad utilizada por los electrodomésticos, equipos y redes eléctricas del lugar.

Figura 42. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor



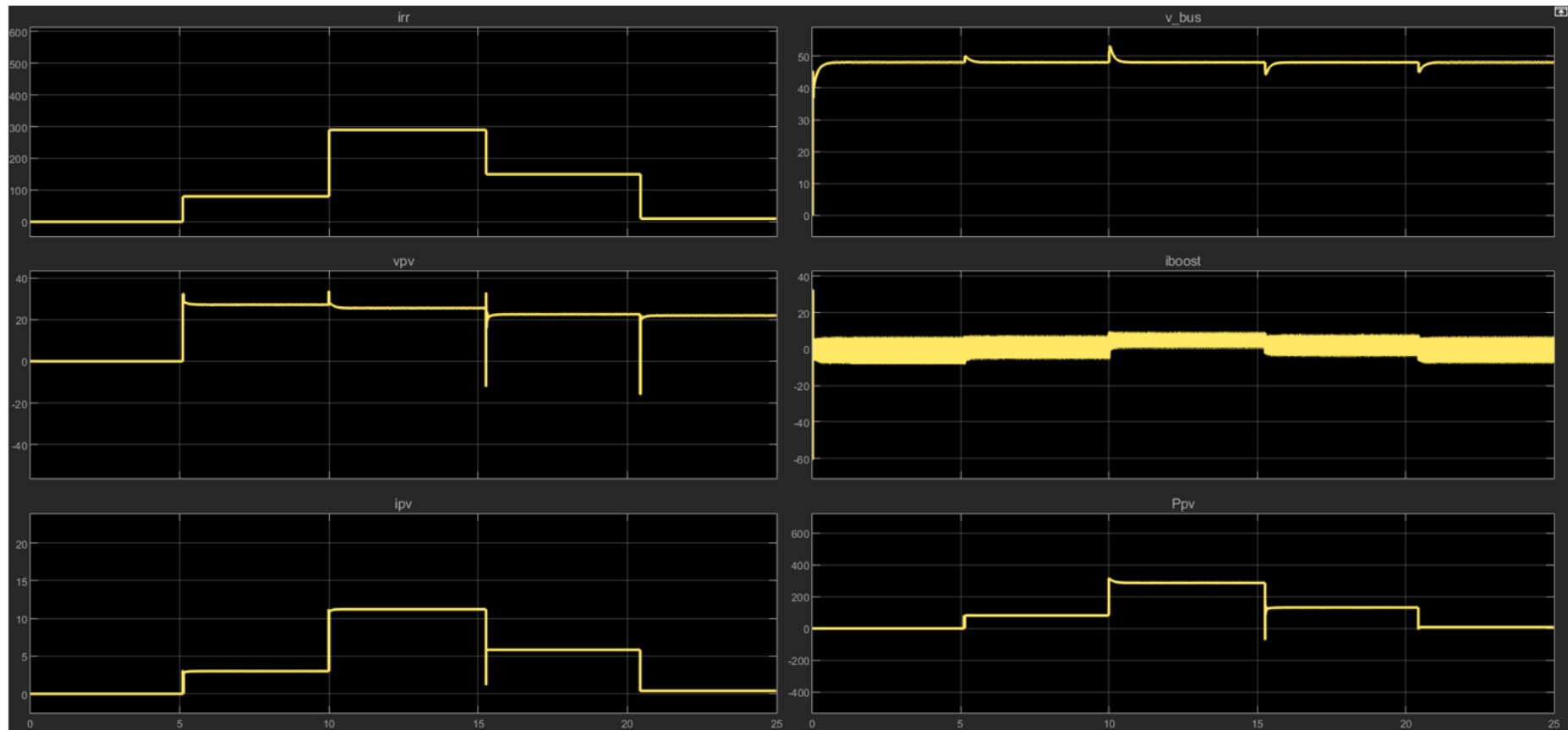
En la figura 42 se puede observar las gráficas del modelo creado en Simulink del panel solar fotovoltaico que tiene una batería. En este se puede observar el valor de radiación solar (irr), el voltaje del panel (vpv), la corriente del panel (ipv) y la potencia generada por el panel (ppv).

Figura 43. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Enero 2024.



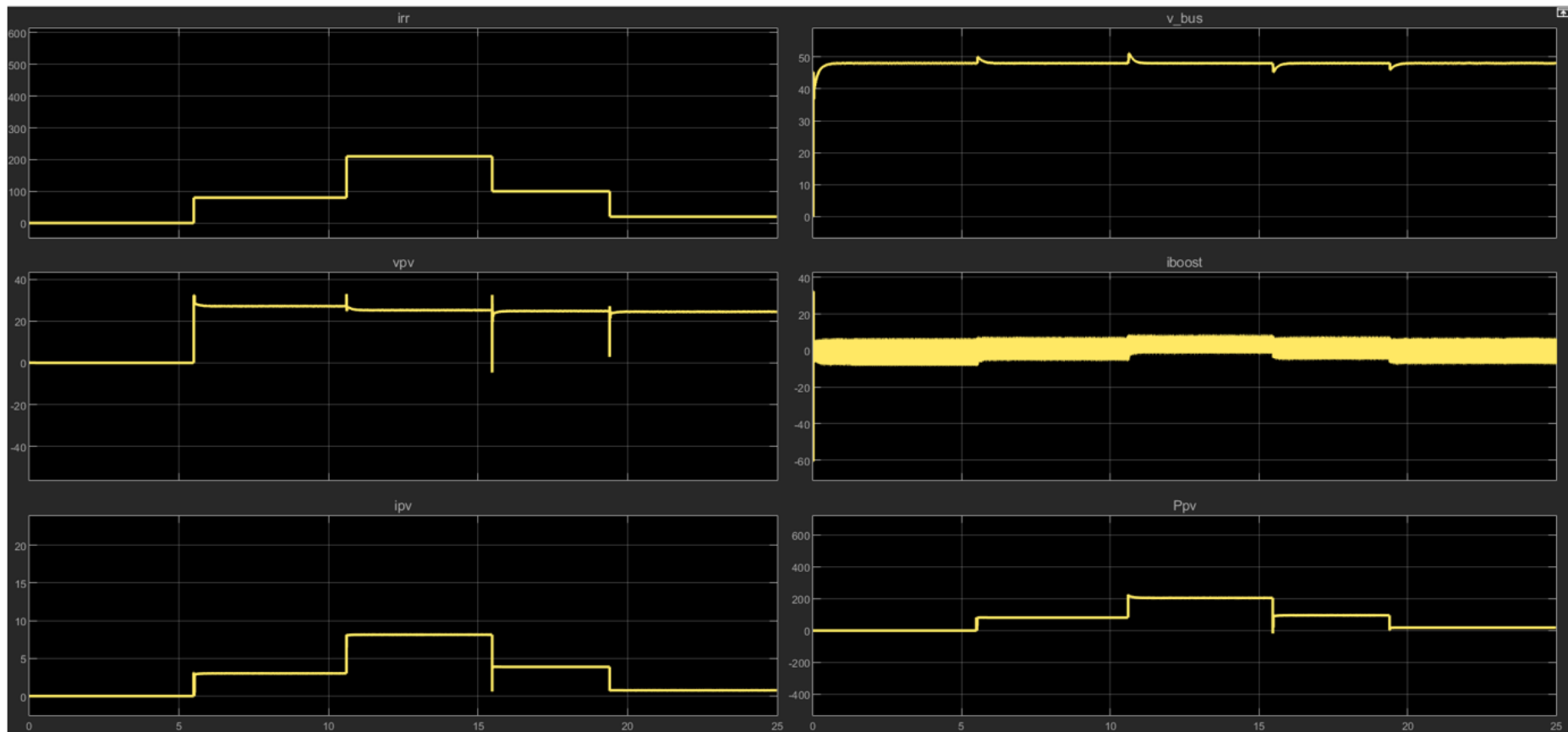
En la figura 43 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede observar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de enero.

Figura 44. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Febrero 2024.



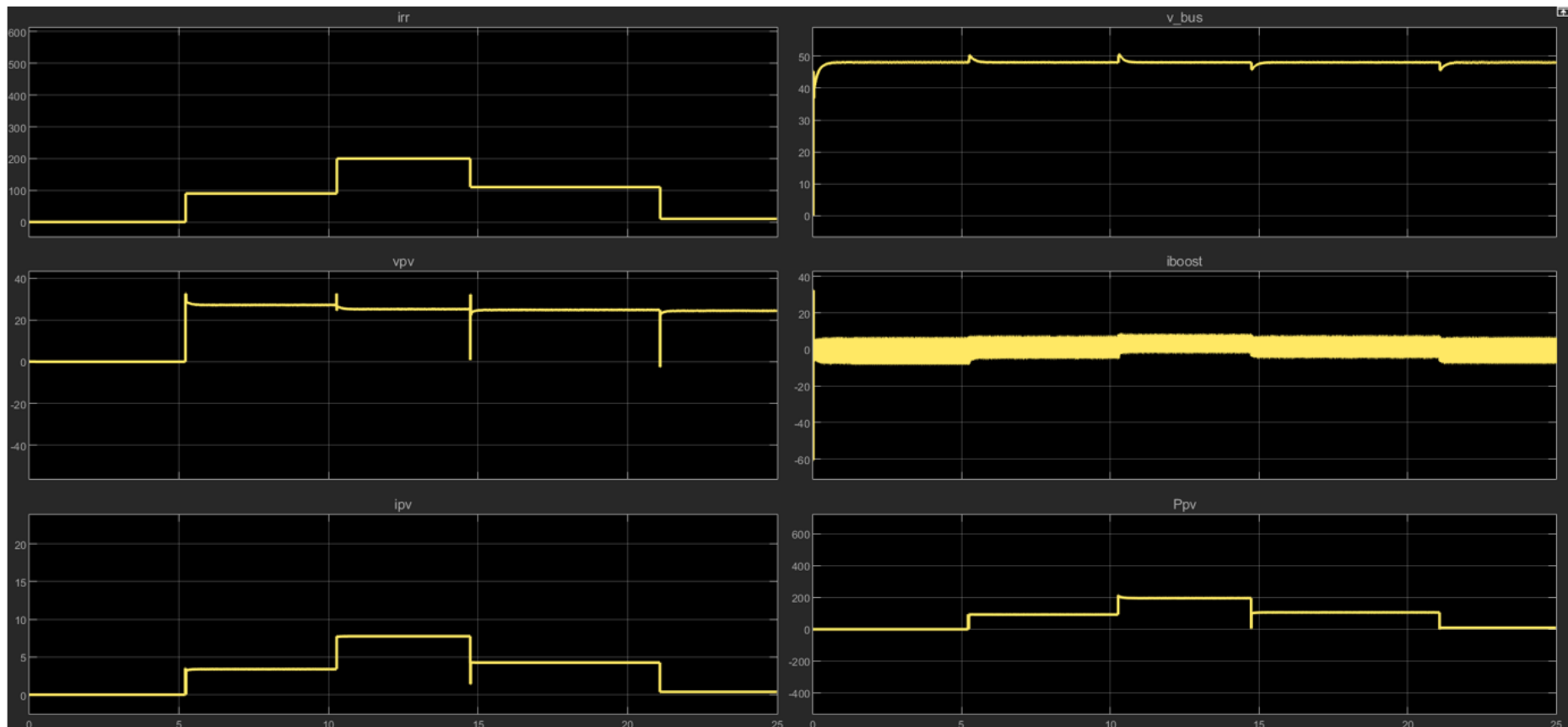
En la figura 44 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de febrero.

Figura 45. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Marzo 2024.



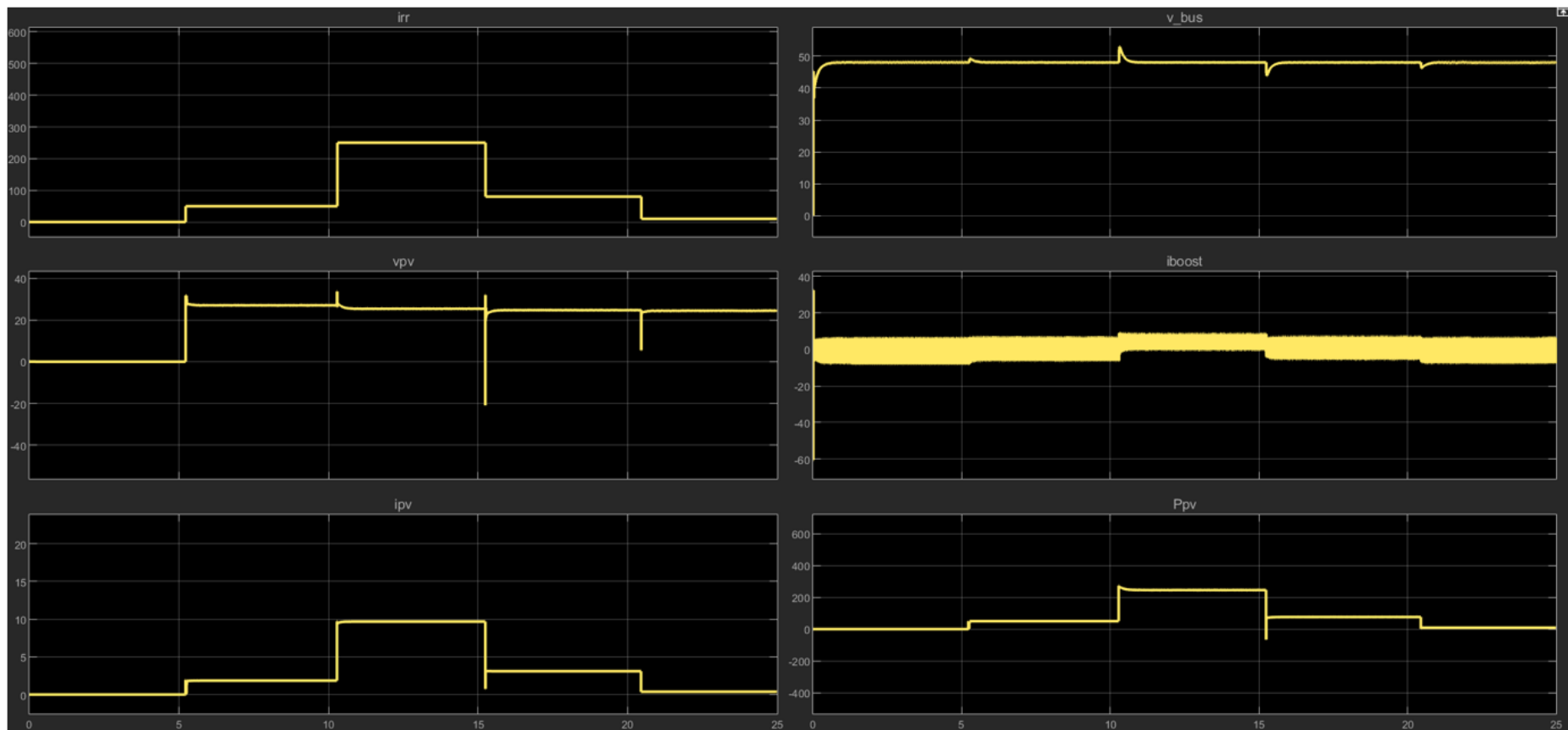
En la figura 45 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de marzo.

Figura 46. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Abril 2024.



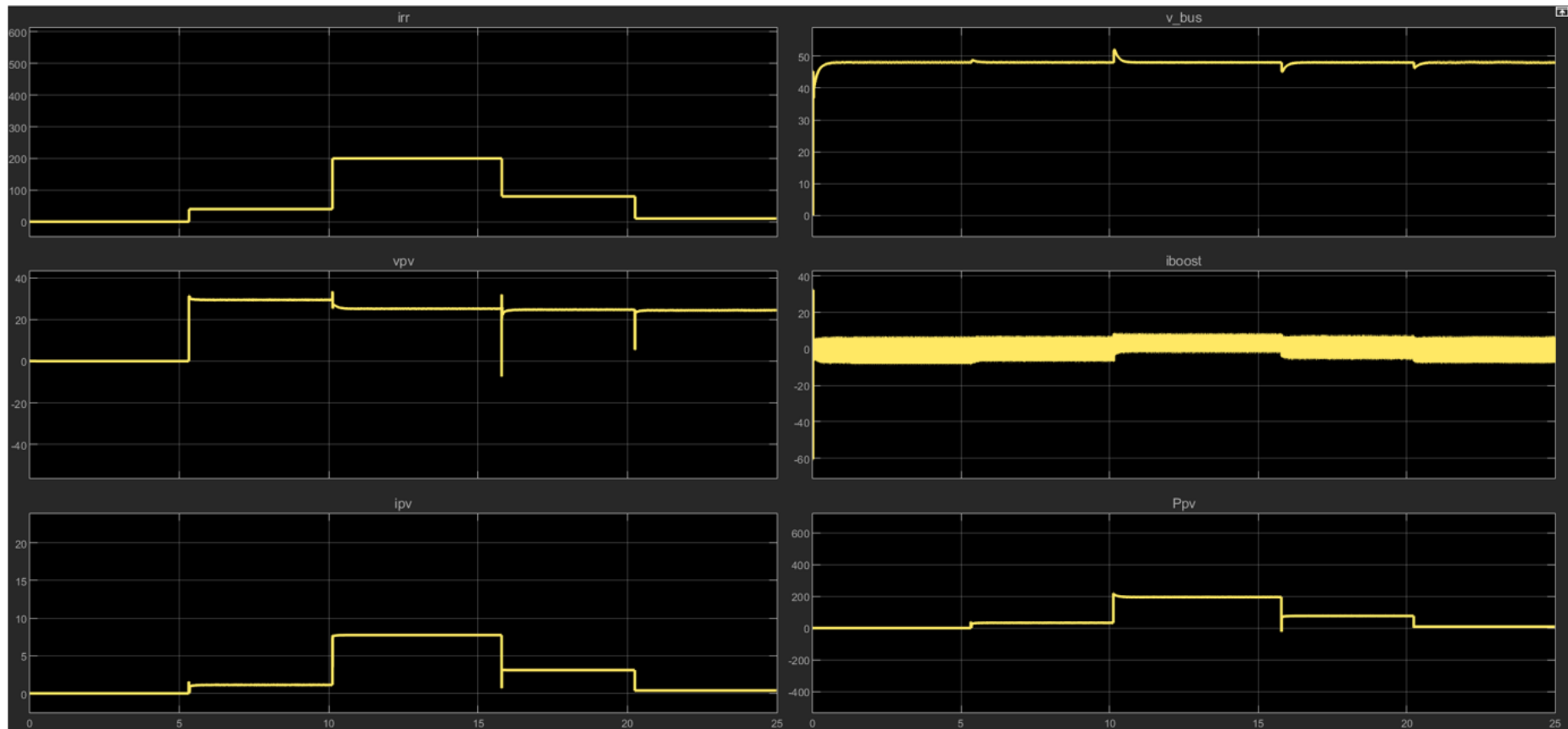
En la figura 46 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (irr). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de abril.

Figura 47. Gráficas de la simulación del panel solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Mayo 2024.



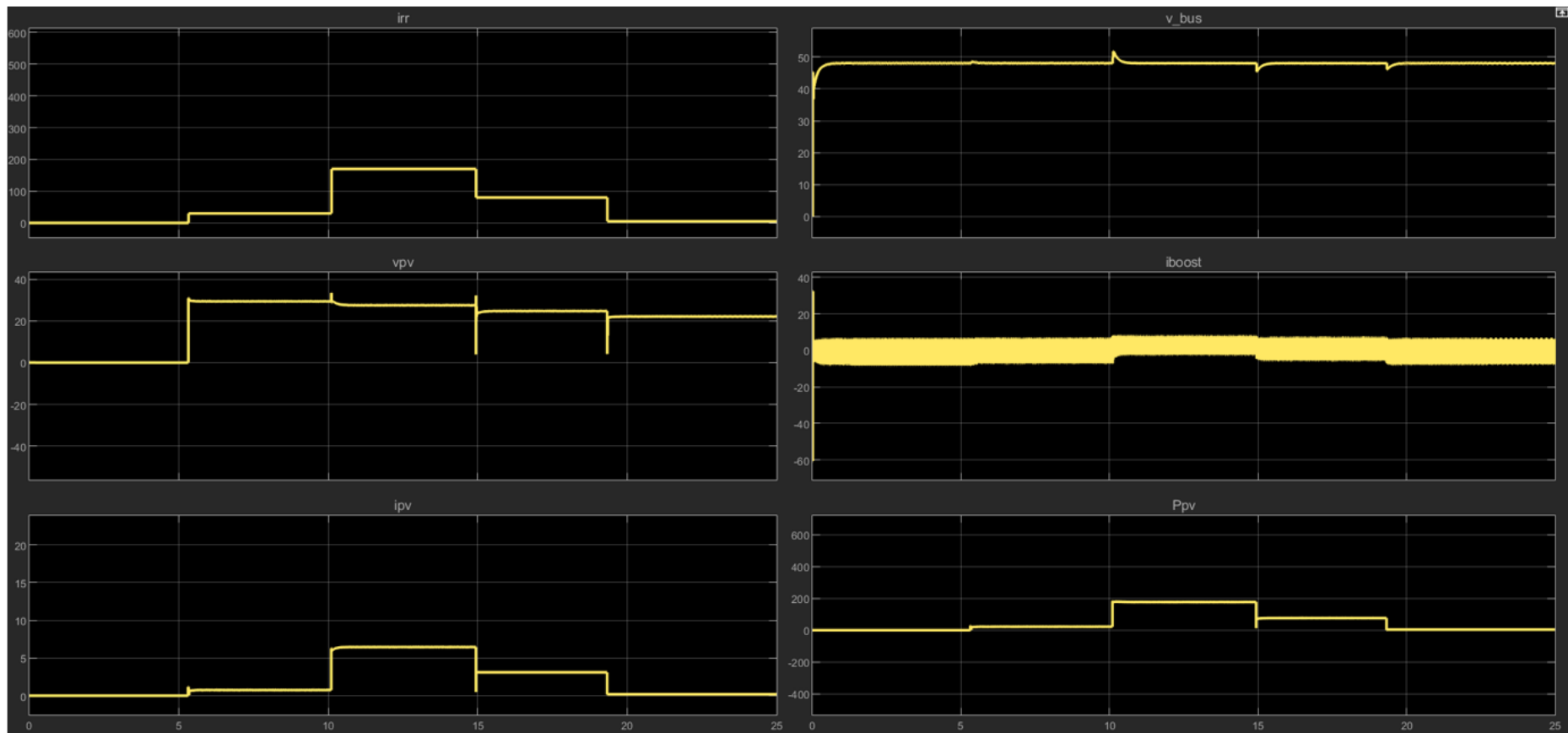
En la figura 47 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de mayo.

Figura 48. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Junio 2024.



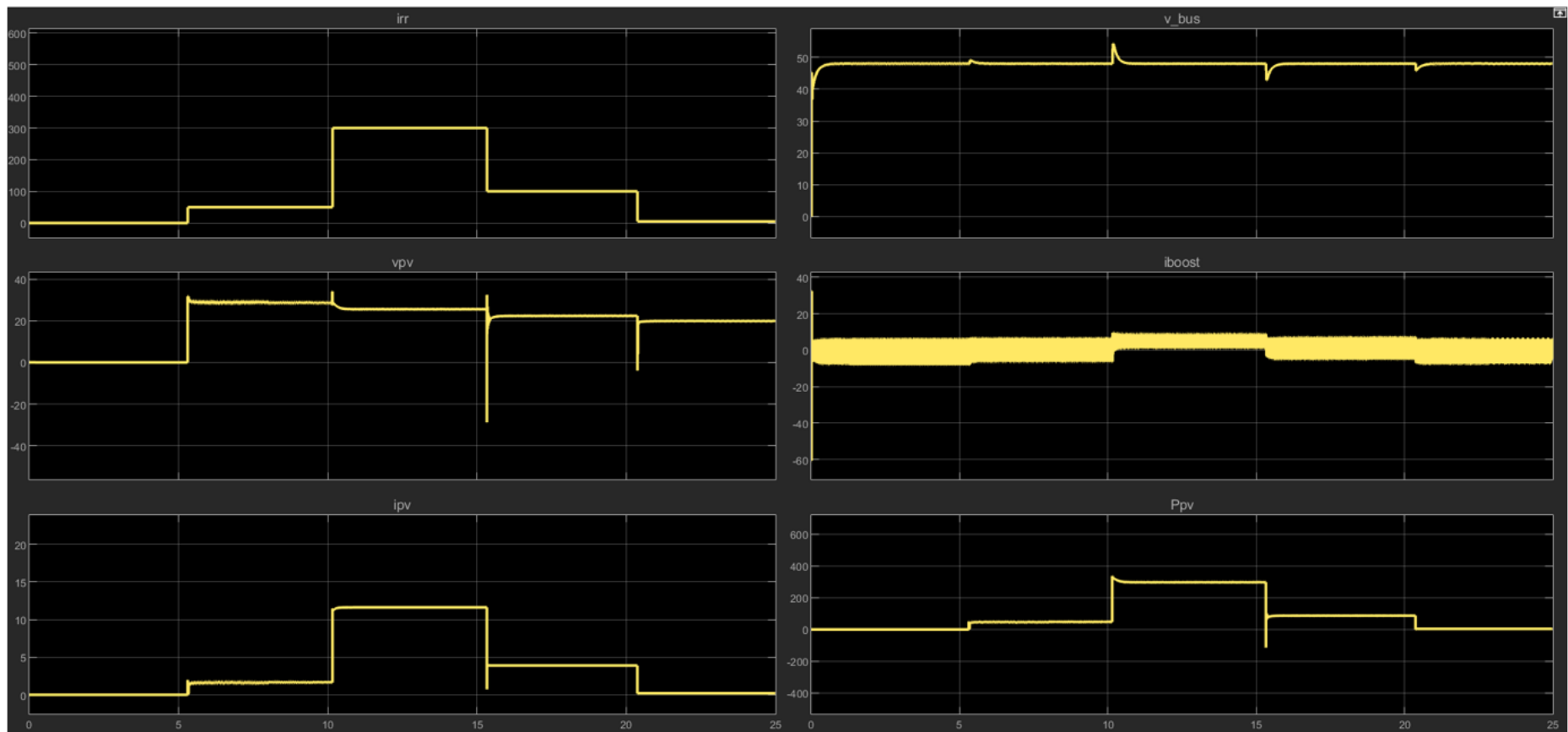
En la figura 48 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (ipv), el voltaje del panel (vpv), y la potencia del panel (Ppv) con respecto al cambio de radiación solar (irr). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de junio.

Figura 49. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Julio 2024.



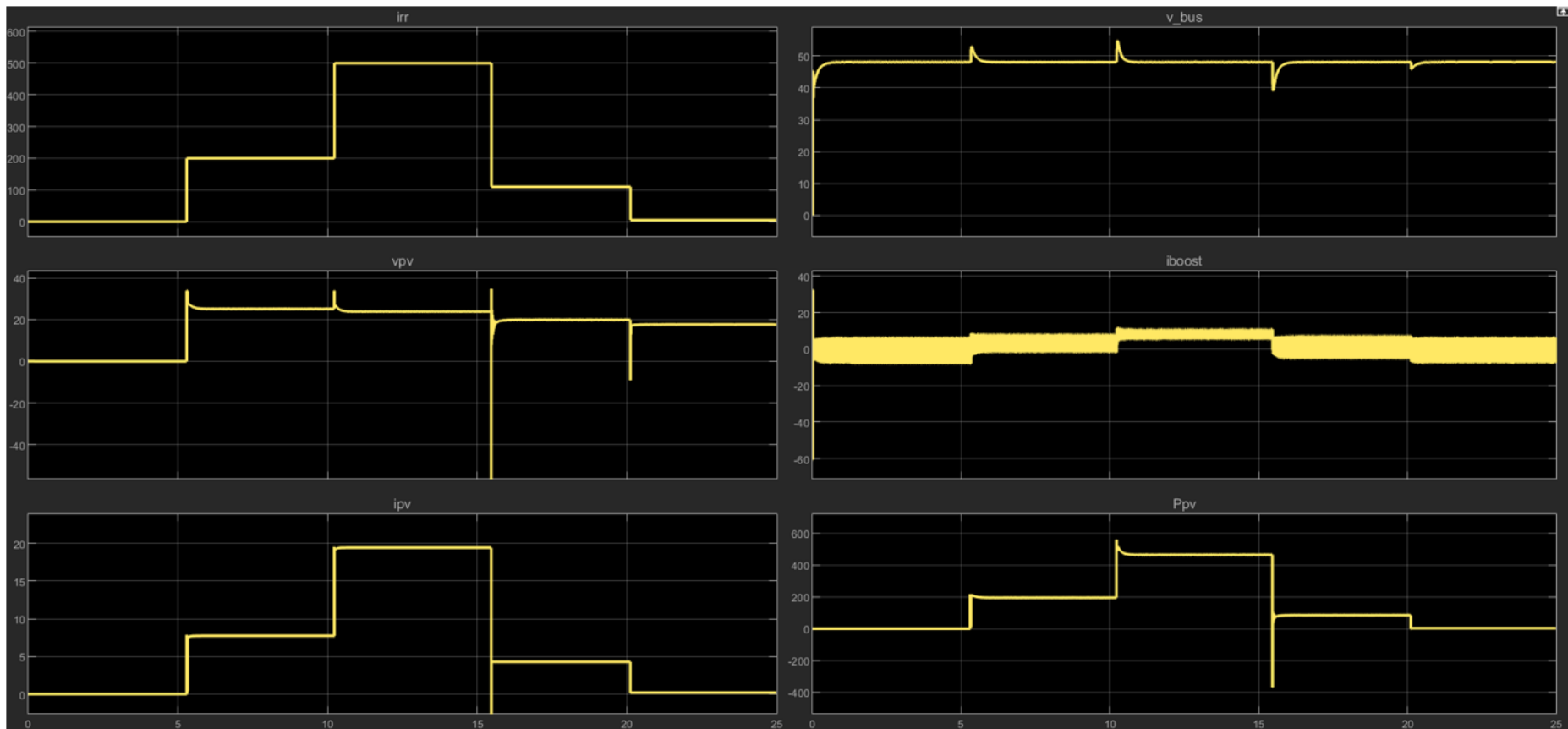
En la figura 49 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (irr). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de julio.

Figura 50. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Agosto 2024.



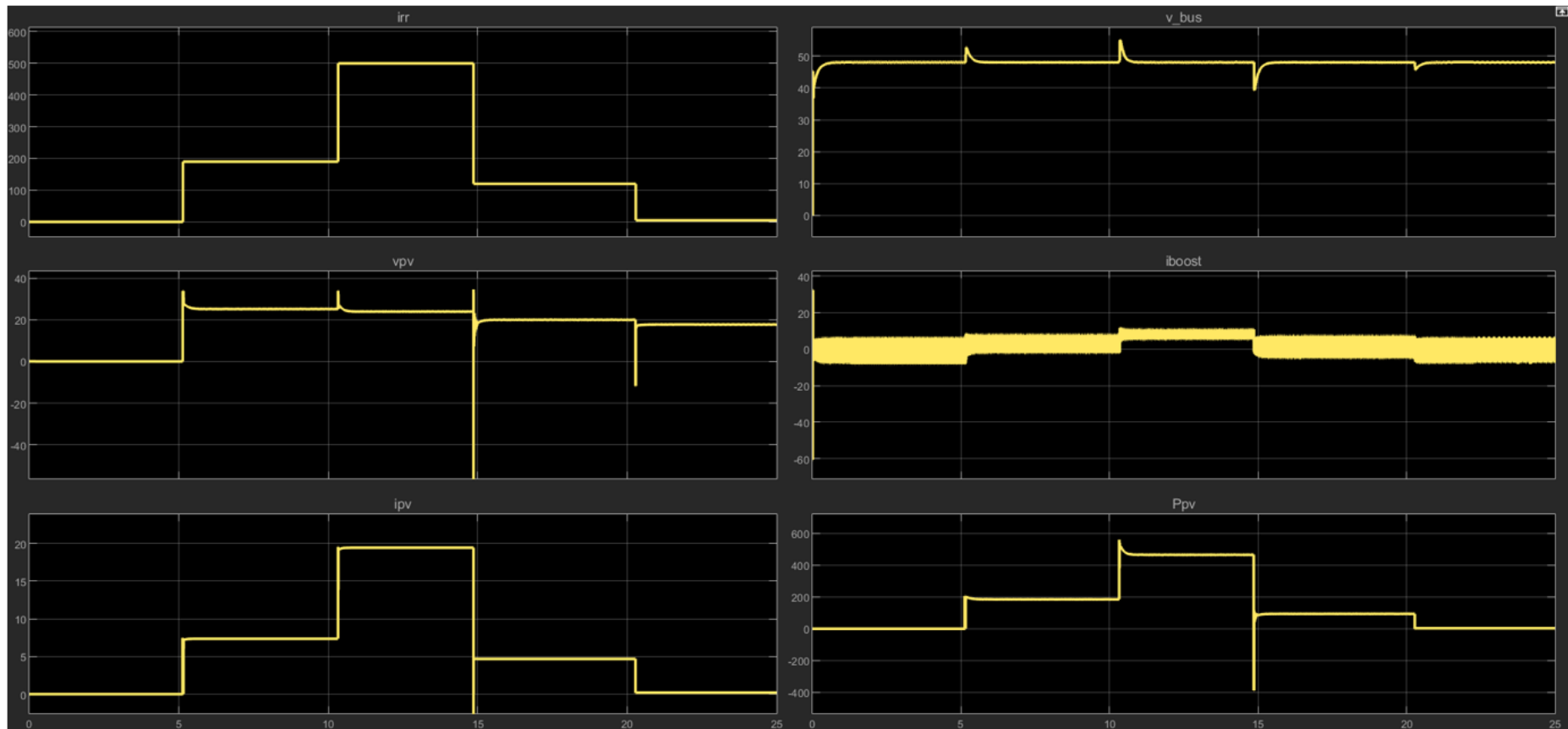
En la figura 50 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de agosto.

Figura 51. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Septiembre 2024.



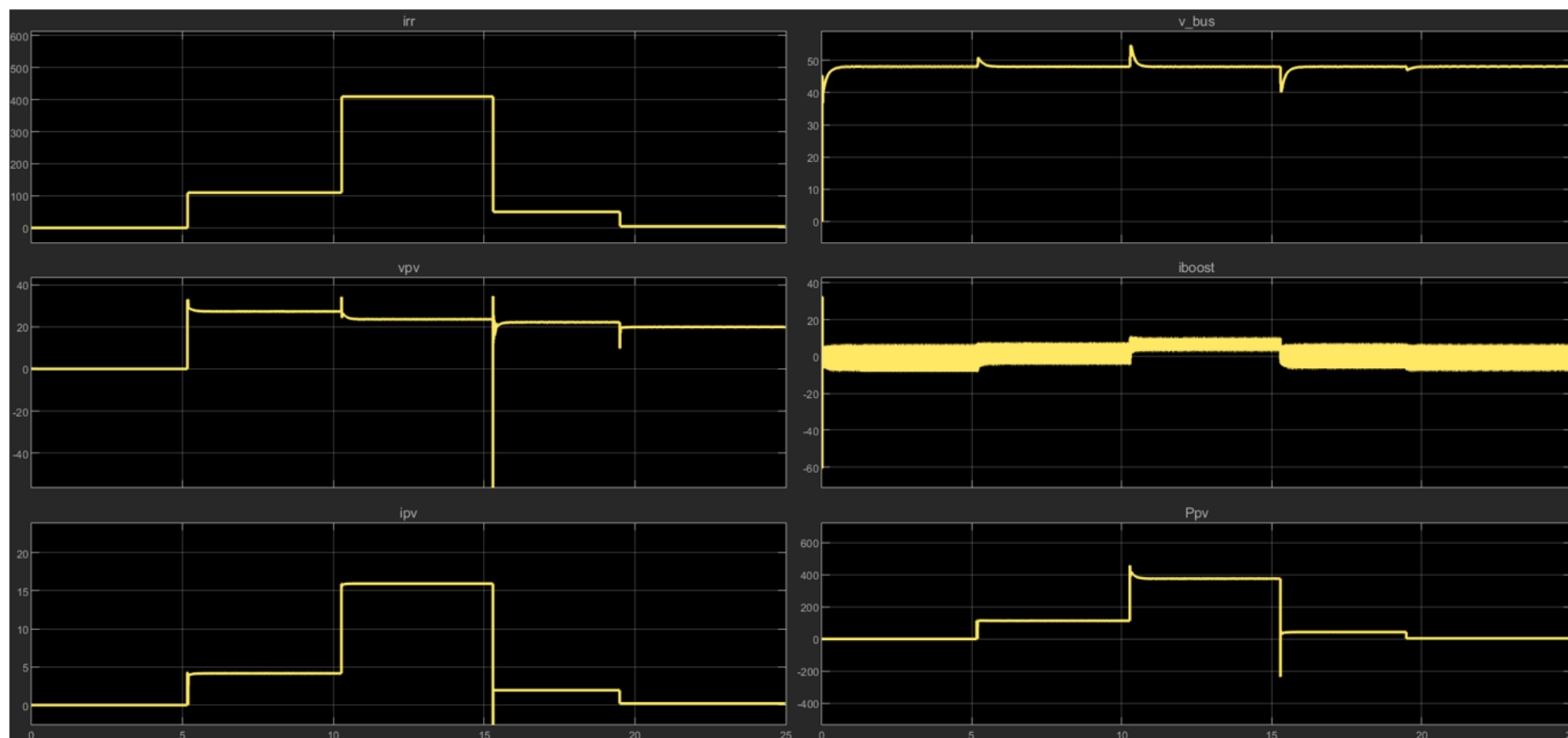
En la figura 51 se observa las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de septiembre.

Figura 52. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Octubre 2024.



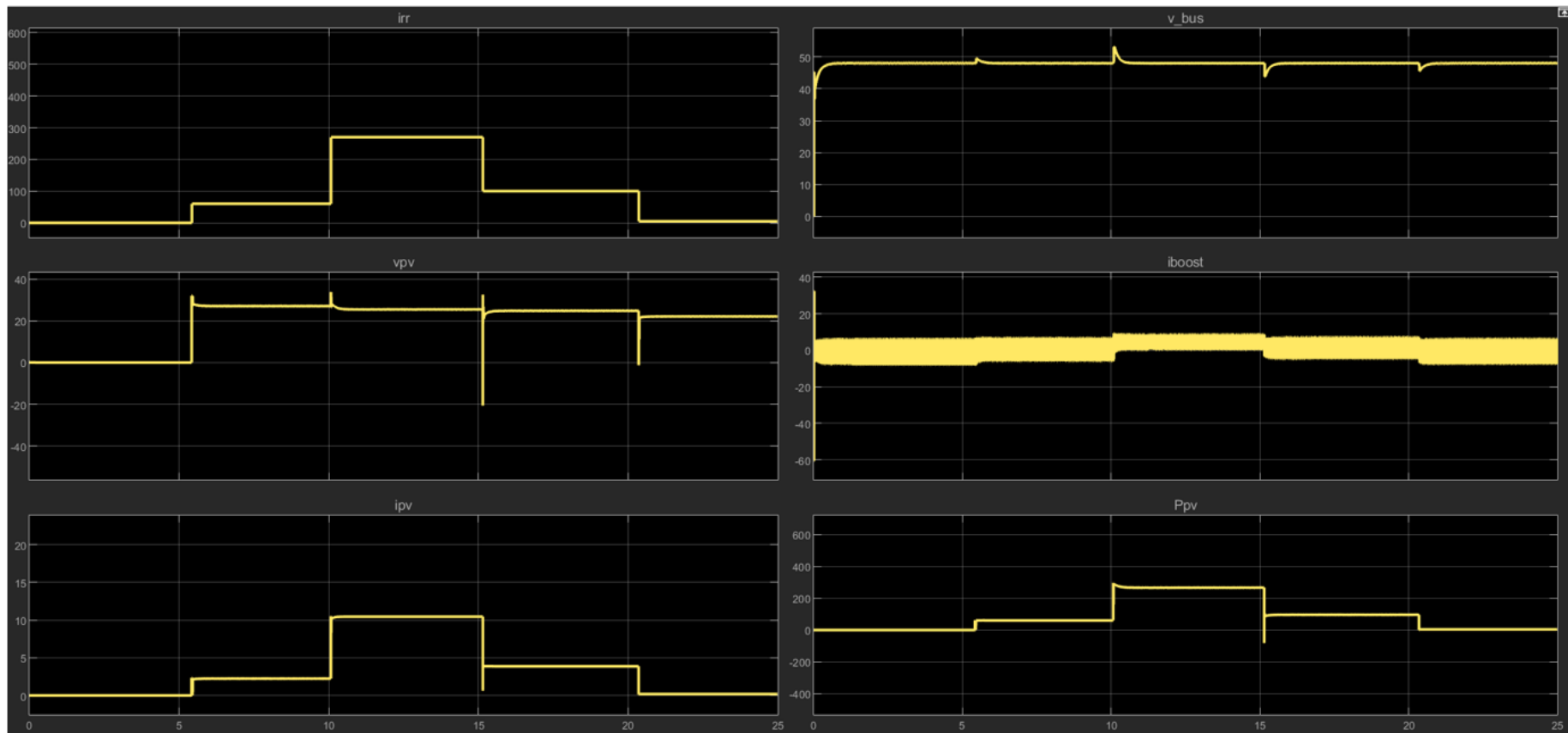
En la figura 52 se observa las gráficas generadas en Simulink, Se puede analizar la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (i_{rr}). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de octubre.

Figura 53. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Noviembre 2024.



En la figura 53 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se analiza la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (irr). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de noviembre.

Figura 54. Gráficas de la Simulación del Panel Solar Fotovoltaico de 550W con una batería y convertidor para Diciembre 2023.



En la figura 54 se puede observar las gráficas generadas en Simulink, Se analiza la variación de corriente (i_{pv}), el voltaje del panel (v_{pv}), y la potencia del panel (P_{pv}) con respecto al cambio de radiación solar (irr). Los valores de radiación corresponden al promedio mensual de diciembre.

En la tabla 17 se puede observar los valores de la potencia generada por los paneles solares cada día. Además, se detalla el número de horas pico de radiación solar y la potencia total que generaría un panel durante el día. Todos los valores toman en cuenta el promedio de la radiación, temperatura y potencia de cada mes.

Tabla 17. Potencia generada por el panel solar.

Mes	Potencia Generada [W]	Número de Horas Pico de Radiación	Potencia Total Generada [Wh] al día	Potencia Total Generada [Wh] al mes
Enero	200	4	800	24800
Febrero	167	5	835	24215
Marzo	119	5	595	18445
Abril	109	3	327	9810
Mayo	83	6	498	15438
Junio	103	4	412	12360
Julio	73	4	292	9052
Agosto	159	3	477	14787
Septiembre	264	3	792	23760
Octubre	291	5	1455	45105
Noviembre	221	5	1105	33150
Diciembre	105	6	630	19530
Promedios	157.83	4.42	684.83	---
Sumatoria	1894	---	8128	239 452

A partir de los valores de potencia generada por los paneles solares y el número de horas pico de radiación (irradiación solar efectiva) se calculó el número de paneles necesario para cubrir la demanda energética de la estación. Para ello se realizó los siguientes cálculos:

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} = \frac{\text{Consumo Energético Diario de la EBT (kWh)}}{\text{Irradiación Solar Efectiva (n° de horas)}}$$

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} = \frac{100.33 \text{ kWh}}{4.42\text{h}} = 22.70 \text{ kW}$$

$$\text{Número de Paneles} = \frac{\text{Potencia Necesaria Paneles [kW]} \times \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{\text{Potencia de un Panel [W]}}$$

$$\text{Número de Paneles} = \frac{22.70 \text{ [kW]} \times \frac{1000\text{W}}{1\text{kW}}}{157.83 \text{ W}} = \mathbf{143.82 \text{ paneles}}$$

Los resultados del número de paneles de acuerdo con la potencia que pueden generar según los niveles de radiación solar de cada mes muestran que serían necesarios aproximadamente 144 paneles solares para cubrir completamente la demanda energética del sitio. Esto significa que se necesitaría 15 paneles más en comparación con la primera opción. Por lo que, se puede determinar que ambos resultados son correctos ya que no muestran una diferencia tan significativa en el número de paneles. Simplemente, el primero se basa en la irradiación solar efectiva y una potencia de 550W, mientras que, el segundo se basa en la potencia generada por los paneles dependiendo la cantidad de radiación solar recibida y el número de horas pico de radiación solar.

Conociendo que se necesitaría aproximadamente entre 129 y 144 paneles solares para cubrir la demanda energética de la estación, se ha decidido determinar si esa cantidad de paneles podrían ser instalados en la EBT a partir del área efectiva disponible en los techos de los edificios. Para ello se calculó el área de cada edificio a partir de las dimensiones proporcionadas por la estación, los resultados se pueden observar en la tabla 18.

Tabla 18. Área Efectiva Disponible de la EBT.

Edificio	Área [m ²]
Laboratorio	394.96
Casa de Estudiantes, Huéspedes y Administradores	354.00
Casa Tigres	242.81
Total	991.77

El área disponible en la EBT para colocar paneles solares es igual a 991.77 m². Este valor fue comparado con el área de un panel solar de 550W, cuyas dimensiones son 2.278 metros de ancho y 1.134 de alto. Por lo que, el área de cada panel solar es igual a 2.58 m². Para saber cuántos paneles solares se pueden colocar en la estación se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Número de Paneles Solares} = \frac{\text{Área disponible de la EBT (m}^2\text{)}}{\text{Área de un Panel Solar (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Número de Paneles Solares} = \frac{991.77 \text{ m}^2}{2.58 \text{ m}^2} = 384.41 \text{ paneles}$$

Es necesario recalcar que si se decidiera instalar 61 paneles se requeriría un área estimada de 157.38 m² y si se decidiera instalar 144 paneles se requiere aproximadamente 371.52 m². De acuerdo con el área disponible de la EBT y el área de un panel solar, se podría colocar hasta 384 paneles solares en la estación. Este valor es mucho más alto que los paneles necesarios para satisfacer la demanda energética del lugar. Por lo que, se puede determinar que la instalación de 129 a 144 paneles solares fotovoltaicos de 550W puede cubrir el consumo total de la EBT. Esto teniendo en cuenta que se encuentra en un lugar con mucha nubosidad y con niveles de radiación solar bajos comparados a lugares de cielos despejados. A pesar de ello, los niveles de radiación solar son suficientes para producir la potencia necesaria para

satisfacer las necesidades energéticas de la EBT. Además, al dimensionar el sistema con una batería y convertidor, se ha considerado un margen de seguridad que permite compensar las variaciones estacionales y las posibles pérdidas de eficiencia.

Básicamente, la instalación de esta cantidad de paneles solares permitiría reemplazar por completo el uso de diésel actualmente necesario para el funcionamiento del generador. Lo cual traería grandes beneficios ya que la implementación del sistema de paneles solares fotovoltaicos implicaría en una considerable reducción en la huella de carbono (emisiones de GEI), ahorro económico a largo plazo debido a la compra y transporte del diésel, la estación se volvería autosuficiente y sostenible, y se contribuiría a minimizar el impacto en el ecosistema que posee una alta biodiversidad debido a que se dependería totalmente de una energía renovable y limpia.

No obstante, la implementación de 129 a 144 paneles solares presenta varias dificultades técnicas y económicas. Por lo cual, se recomendaría la instalación de 61 paneles solares, que representan la cantidad de paneles necesarios en el escenario ideal de irradiación solar y temperatura. Sin embargo, para esta recomendación se debe tener en cuenta las condiciones reales de la estación, es decir, el escenario real de irradiación solar y temperatura. Por lo que, estos 61 paneles no cubrirían toda la demanda energética de la estación y se seguiría dependiendo en cierta parte del generador. Para calcular la cantidad de energía que generarían estos 61 paneles con la irradiación solar de la zona y la cantidad de diésel que se seguiría consumiendo, se realizó los siguientes cálculos:

$$\text{Potencia Necesaria Paneles [W]} = 61 \text{ paneles} \times 157.83 \text{ W} = 9627.63 \text{ W}$$

$$\text{Demanda Energética Cubierta (kWh)} = 4.42 \text{ h} \times 9627.63 \text{ W} \times \frac{1\text{kW}}{1000\text{W}} = 42.55 \text{ kWh}$$

Con 61 paneles se lograría cubrir aproximadamente una demanda energética de 42.55 kWh al día. Es decir, de la demanda total de 100 kWh al día existiría un déficit de 57.45 kWh al día. Lo cual en un año representaría un déficit total de 20969.25 kWh, justamente esta cantidad de energía debe ser cubierta por el generador. Para calcular la cantidad de combustible necesario para suplir esa demanda, se asumió que los 5025.69 galones cubren totalmente la demanda de 100kWh al día en todo un año, es decir, generan aproximadamente 36500 kWh al año.

$$\text{Si } 5025.69 \text{ galones cubren } 36500 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$X \text{ galones cubren } 20969.25 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}, \text{ donde } X = 2887.26$$

Se requiere aproximadamente 2887.26 galones para cubrir el déficit de energía en la EBT con 61 paneles solares instalados funcionando con las condiciones de irradiación solar y temperatura del lugar. Por consiguiente, el resumen de los resultados de la cantidad de paneles solares y el combustible requerido en cada caso se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19. Escenarios de los Paneles Solares y la Demanda Energética Cubierta.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	Número de Paneles Solares Fotovoltaicos	Demanda Energética Cubierta al día [kWh/día]	Cantidad de Combustible utilizado para Generadores [gal]
3.00	61	100.33	0.00
1.42	61	42.55	2887.26
1.42	129 - 144	100.33	0.00

3.3 Análisis del Ciclo de Vida

En relación con el análisis del ciclo de vida se calculó el tiempo que el sistema fotovoltaico demoraría en devengar las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas durante todas las etapas del ciclo de vida. Para ello, se analizó algunos valores de distintos estudios sobre el ciclo de vida de los paneles desde su extracción hasta su disposición final, con el propósito de obtener un valor representativo del impacto total de los paneles solares en términos de emisiones.

El valor que más se ajustó a la realidad del caso analizado, debido al análisis completo de cada etapa, fue de aproximadamente $4730 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ por cada kWp del sistema [19]. En este caso, los paneles solares propuestos tienen una potencia de 550W equivalentes a 0.55kW. Por lo que, la cantidad de dióxido de carbono emitido por cada panel instalado de 550W en la EBT sería de aproximadamente $2601.5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$. Esto tomando en cuenta que el panel es desechado a un relleno sanitario y tendrá una vida útil entre 15 a 25 años.

A partir de ese dato, se calculó la cantidad total de dióxido de carbono que emitirían todos los paneles solares instalados en la EBT debido a su ciclo de vida. Se realizó el cálculo para un escenario ideal y el escenario real de radiación solar en la EBT. Para el escenario ideal se consideró una irradiación solar efectiva de 3 horas, se escogió este valor ya que la mayoría de los estudios coinciden que para implementar tecnologías de paneles solares es necesario contar con radiación directa de al menos 3 horas por día y valores de irradiancia en el intervalo de 500 a 1000 W/m^2 [17]. Mientras que, para el escenario real se consideró una irradiación solar efectiva de 1.42 horas.

La cantidad total de las emisiones de dióxido de carbono equivalente debido al ciclo de vida de los paneles solares (desde su extracción hasta su disposición) fue calculada con la Ecuación 7. El valor obtenido representa un aproximado de las emisiones que se generarían

durante la fabricación, uso, transporte y disposición de los paneles solares instalados en la estación. Con este valor, se calculará cuánto tiempo costaría devengar las emisiones de los paneles solares durante su vida, comparándolo con la huella de carbono (calculada en el objetivo 1) que se ahorra debido a la cantidad de combustible que se evitaría quemar para cubrir la demanda energética de la estación.

$$\text{Emisiones Totales (kg CO}_2\text{ eq)} = 2601.5 \text{ kg CO}_2\text{ eq} \times \text{N}^\circ \text{ de paneles} \quad (7)$$

Tabla 20. Emisiones Totales de los Paneles Solares durante su Ciclo de Vida.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	Nº de Paneles	Emisiones Totales [kg CO ₂ eq]
3.00	61	158 691.5
1.42	61	158 691.5
1.42	129 – 144	335 593.5 – 374 616.0

Los valores obtenidos en la tabla 20 serán comparados con la huella de carbono actual de la ETB. Es decir, las emisiones totales de los paneles solares debido a su ciclo de vida serán comparadas con las 50.8 toneladas (50 800 kg) de CO₂ emitidas al año debido a la quema de diésel para el funcionamiento de los generadores. De esta manera, se calculará cuánto diésel no se va a quemar gracias a la instalación de los paneles solares y consigo la cantidad de dióxido de carbono que se estaría evitando emitir hacia la atmósfera debido al reemplazo de los generadores. Para calcular el tiempo que se demoraría en devengar las emisiones generadas durante el ciclo de vida de los paneles se utilizó la ecuación 8.

$$\text{Tiempo para devengar las emisiones} = \frac{\text{Emisiones Totales [kg CO}_2\text{ eq]}}{\text{Huella de Carbono EBT [kg CO}_2\text{ eq/año]}} \quad (8)$$

$$\text{Tiempo para devengar las emisiones} = \frac{158\,691.5 \text{ [kg CO}_2\text{ eq]}}{50\,800 \text{ [kg CO}_2\text{ eq/año]}} = 3.12 \text{ años}$$

Para el caso de los 61 paneles solares, pero con las condiciones reales (no ideales) de irradiación solar y temperatura se necesita calcular la nueva huella de carbono de la EBT al seguir utilizando un porcentaje de combustible para los generadores. En este caso, en el objetivo 2 se determinó que se seguiría quemando 2887.26 galones para cubrir el déficit de energía. Por lo que, se calculó que la huella de carbono que se ahorra con esta cantidad de combustible es aproximadamente 21.62 t CO_{2 eq}/año. Con este valor se obtuvo el tiempo necesario para devengar las emisiones del caso descrito.

$$\text{Tiempo para devengar las emisiones} = \frac{158\,691.5 \text{ [kg CO}_2\text{ eq]}}{21\,615.4 \text{ [kg CO}_2\text{ eq/año]}} = 7.34 \text{ años}$$

Tabla 21. Tiempo necesario para devengar las emisiones de los paneles solares durante su ciclo de vida.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	Nº de Paneles	Tiempo para devengar las emisiones [años]
3.00	61	3.12
1.42	61	7.34
1.42	129 – 144	6.61 – 7.37

Como se puede observar en la tabla 21, los resultados sugieren que, en el escenario ideal de 3 horas de irradiación solar efectiva (con 61 paneles solares) se necesitaría aproximadamente 3.12 años para compensar las emisiones de dióxido de carbono equivalente generadas durante la extracción de materiales para construir los paneles, fabricación, transporte, uso y disposición final. Mientras que, en el escenario real de apenas 1.42 horas de irradiación solar efectiva (con 129 a 144 paneles solares), se necesitaría entre 6.61 años a 7.37 años para devengar las

emisiones producidas durante todo el ciclo de vida de los paneles solares. Sin embargo, en el escenario de 61 paneles solares con las horas de irradiación solar efectiva de la zona (escenario híbrido) se necesitaría aproximadamente 7.34 años. Esto significa que, el tiempo requerido para compensar las emisiones de carbono asociadas al ciclo de vida de los paneles es altamente dependiente de las condiciones de irradiación solar disponibles en el lugar de instalación. En escenarios con menor irradiación solar efectiva, la cantidad de paneles necesarios aumenta significativamente, lo que a su vez prolonga el tiempo necesario para alcanzar la neutralidad en términos de emisiones. Por lo tanto, la viabilidad ambiental y el impacto positivo de esta tecnología están condicionados por factores locales que deben ser considerados en el diseño e implementación de los sistemas fotovoltaicos.

De igual manera, estos valores representan el tiempo necesario para que los paneles solares compensen las emisiones de carbono generadas durante todo el ciclo de vida. Una vez alcanzado ese punto, cualquier energía producida por los paneles será prácticamente libre de emisiones, lo que se traduce en una contribución positiva a la reducción de gases de efecto invernadero. Esto significa que, después de ese periodo de compensación de emisiones, el sistema fotovoltaico comienza a generar un beneficio ambiental al evitar emisiones derivadas de la quema de diésel para el funcionamiento de los generadores. En el caso de reemplazar completamente a los generadores, el impacto positivo permitirá a la estación generar energía limpia y libre de emisiones durante el resto de vida útil de los paneles, que oscila entre 13 a 18 años adicionales, considerando una vida útil de 20 a 25 años. Mientras, que, en el caso de reemplazar parcialmente a los generadores, la estación obtendría no obtendría toda la energía de los paneles solares, pero emitiría una menor cantidad de dióxido de carbono equivalente a la atmósfera.

Por un lado, para calcular el tiempo que se tarda en recuperar la inversión realizada en la instalación de los paneles solares de la EBT se necesitó valores promedio del costo de los

paneles solares. En este caso, se halló que el rango aproximado de precios para un proyecto de energía solar se ubica entre USD 800 a USD 1200 por kW instalado [23], también puede variar entre los \$0.85 USD hasta \$1.20 USD por cada vatio instalado [24]. Además, se investigó que un kit conectado de 6 paneles de 550W con un inversor e instalación puede llegar a costar aproximadamente \$4000 USD [25]. Esto significa que un panel solar de 550W en el mercado ecuatoriano tiene un precio aproximadamente de 660 dólares.

Por otro lado, se necesitó valores del costo del diésel utilizado para el funcionamiento de los generadores. El precio actual del diésel según lo establecido en el Reglamento Codificado de Regulación de Precios de Derivados de Hidrocarburos es de aproximadamente \$1.797 [26] Además, un artículo que analiza los costos del transporte fluvial en zonas de acceso remoto en la Amazonía ecuatoriana estableció un valor de \$110 por cada viaje entre el Coca y el Tiputini [27]. Analizando la similitud de la distancia recorrida entre el caso analizado en el artículo y el establecido en este estudio, se ha decidido usar ese costo para calcular cuánto dinero se gasta por compra y transporte de diésel en la EBT. Asimismo, se considera nuevamente que la compra de combustible es realizada cada 15 días. La cantidad de dinero utilizado cada año para comprar y transportar el diésel en la estación se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Precio por Compra} = \text{Galones Utilizados} \times \text{Precio del Diésel}$$

$$\text{Precio por Compra} = 5025.69 \text{ gal} \times \frac{\$1.797}{\text{gal}} = \$ 9031.16$$

$$\text{Precio por Transporte} = \text{Costo por Viaje} \times \text{Número de viajes}$$

$$\text{Precio por Transporte} = \frac{\$110}{\text{viaje}} \times 24 = \$ 2640.0$$

Para abastecer de energía a la EBT, actualmente se paga un aproximado de \$ 11671.16 al año. Pero, para el caso de instalar 61 paneles solares y seguir utilizando los generadores a diésel se compraría sólo 2887.26 galones de diésel, lo cual representa un pago aproximado de \$ 6705.08, y un ahorro de \$4966.08. Mientras que, el precio de la inversión inicial realizada para la instalación de paneles solares se detalla en la tabla 22.

Tabla 22. Precio de los Paneles Solares.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	N° de Paneles	Precio de los Paneles Solares [\$ USD]
3.00	61	40260
1.42	61	40260
1.42	129 – 144	85140 - 95040

Para calcular el tiempo que se demoraría en amortizar la inversión inicial de los paneles se utilizó la Ecuación 9. El caso descrito en el cálculo representa el escenario ideal donde se instala 61 paneles solares, pero con condiciones ideales y no reales. Los resultados para los diferentes escenarios planteados se encuentran en la tabla 23.

$$\text{Tiempo para amortizar la inversión} = \frac{\text{Precio de los Paneles } [\$]}{\text{Precio Total del Diésel } [\$/\text{año}]} \quad (9)$$

$$\text{Tiempo para amortizar la inversión} = \frac{\$ 40260}{\$11671.16/\text{año}} = 3.45 \text{ años}$$

Tabla 23. Tiempo necesario para amortizar la inversión inicial de los paneles solares.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	N° de Paneles	Tiempo para amortizar la inversión [años]
--	---------------	--

3.00	61	3.45
1.42	61	8.11
1.42	129 – 144	7.29 – 8.14

Como se puede observar en la tabla 23, los resultados sugieren que, en el escenario ideal de 3 horas de irradiación solar efectiva (con 61 paneles solares) se necesitaría aproximadamente 3.45 años para amortizar la inversión inicial de los paneles solares. Mientras que, en el escenario real de apenas 1.42 horas de irradiación solar efectiva (con 129 a 144 paneles solares), se necesitaría entre 7.29 años a 8.14 años para amortizar la inversión. Esto significa que después de ese tiempo, el sistema fotovoltaico comienza a generar beneficios económicos netos, ya que los ahorros en costos de electricidad superan la inversión inicial realizada para su instalación. Por lo que, la EBT empezaría a obtener energía limpia y gratuita durante el resto de vida útil de los paneles solares, debido a que, los paneles reducirán por completo la dependencia de combustibles fósiles y esto se traducirá en un ahorro financiero significativo a largo plazo. Sin embargo, para el caso híbrido donde se instala 61 paneles solares bajo las condiciones climatológicas reales y se utiliza el generador a diésel para suplir el resto de demanda, se necesitaría aproximadamente 8.11 años para amortizar la inversión inicial. Posterior a ese periodo, se obtendría un porcentaje de energía gratuita para suplir cerca de la mitad de la demanda energética de la EBT.

En general, con las condiciones actuales de irradiación solar en la zona y la instalación de 129 a 144 paneles, se estima que la EBT tardaría aproximadamente entre 6.61 y 7.37 años (promedio de 7 años) para devengar las emisiones de dióxido de carbono equivalentes generadas durante el ciclo de vida de los paneles solares. De manera similar, el tiempo estimado para amortizar la inversión inicial sería aproximadamente de 7.29 a 8.14 años (promedio de 7.72 años). Mientras que, con las condiciones actuales de irradiación solar en la zona y la

instalación de 61 paneles, se estima que la EBT tardaría aproximadamente 7.34 años para devengar las emisiones de dióxido de carbono equivalentes generadas durante el ciclo de vida de los paneles solares. De manera similar, el tiempo estimado para amortizar la inversión inicial sería aproximadamente de 8.11 años. Aunque estos periodos pueden parecer extensos, se debe considerar la vida útil de los paneles solares, ya que esto permite visualizar la cantidad de CO_{2 eq} evitado y el dinero ahorrado a largo plazo. Para este caso, se investigó que los paneles solares propuestos de 550W y otros paneles solares con características y materiales similares tienen una vida útil entre 25 a 30 años, dependiendo la marca. A partir de este valor calculó los beneficios económicos y ambientales de la instalación de paneles solares en la EBT. En el ejemplo se muestra el ahorro para el escenario donde se instala 129 a 144 paneles solares. Mientras que, en la tabla 24 se muestra los resultados generales de ahorro para los distintos escenarios planteados.

$$\text{Ahorro [kg CO}_2 \text{ eq]} = \text{Años de Ahorro} \times \text{Huella de Carbono Evitada [kg CO}_2 \text{ eq/año]}$$

$$\text{Ahorro de Emisiones [kg CO}_2 \text{ eq]} = (30 - 7) \text{ años} \times 50\,800 \text{ [kg CO}_2 \text{ eq/año]}$$

$$\text{Ahorro de Emisiones [kg CO}_2 \text{ eq]} = 1\,168\,400 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 1168.4 \text{ t CO}_2 \text{ eq}$$

$$\text{Ahorro Económico [\$]} = \text{Años de Ahorro} \times \text{Precio Diésel Ahorrado [$/año]}$$

$$\text{Ahorro Económico [\$]} = (30 - 7.72) \text{ años} \times \$11671.16/\text{año}$$

$$\text{Ahorro Económico [\$]} = \$260\,033.45$$

Tabla 24. Ahorro de Emisiones y Ahorro Económico según el Número de Paneles.

Irradiación Solar Efectiva [número de horas de sol]	Nº de Paneles	Ahorro de Emisiones [t CO _{2 eq}]	Ahorro Económico [\\$]

3.00	61	1365.5	309 869.30
1.42	61	489.9	108 707.49
1.42	129 – 144	1168.4	260 033.45

En este caso, considerando una vida útil de 30 años, si se instala entre 129 a 144 paneles solares se evitaría la emisión de 1168.4 toneladas de dióxido de carbono equivalente. Además, el ahorro económico proyectado durante este periodo es de \$260 033.45, calculado en función del precio actual del diésel utilizado para alimentar los generadores eléctricos. Mientras que, si se instala solo 61 paneles solares con las condiciones actuales de irradiación solar en la zona, se evitaría 489.9 toneladas de dióxido de carbono equivalente. Además, el ahorro económico proyectado en este periodo es de \$108 707.49.

Este análisis resalta los significativos beneficios ambientales y económicos que implica la transición hacia energía solar en la EBT. La instalación de los paneles solares no solo contribuiría a reducir la huella de carbono, sino que también generaría un ahorro económico considerable durante su vida útil. Estos resultados demuestran que, aunque los periodos de retorno inicial puedan parecer extensos, la adopción de energías renovables representa una inversión sostenible que combina rentabilidad económica y responsabilidad ambiental en el largo plazo.

4 CONCLUSIONES

Según el análisis realizado se puede concluir que con una irradiación solar efectiva promedio de 1.42 horas diarias, se requieren entre 129 y 144 paneles solares de 550W para cubrir completamente la demanda energética anual de la EBT, estimada en 36620.45 kWh. Esta transición a energía solar eliminaría los gastos actuales de compra y transporte de diésel. Tomando en cuenta una vida útil de los paneles solares de 30 años, el ahorro acumulado sería

alrededor de \$260 033.45 y evitaría la emisión de aproximadamente 1168.4 toneladas de CO₂, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental de la estación. Sin embargo, bajo las condiciones reales de la región y factores económicos y técnicos, se recomienda una instalación de 61 paneles solares, cubriendo el 42.55% de la demanda energética actual. Esto reduciría el consumo de diésel en 2138.43 galones anuales y disminuiría la huella de carbono de la EBT en 21.62 toneladas de CO₂ anuales.

En conclusión, la implementación de un sistema fotovoltaico en la EBT es viable técnica, económica y ambientalmente. Los resultados de las simulaciones muestran que el recurso solar disponible, aunque limitado por la nubosidad y cobertura vegetal, es suficiente para satisfacer la demanda energética de la estación. Sin embargo, se requieren configuraciones específicas que optimicen la captación de irradiación solar en condiciones locales. Además, la transición hacia una red fotovoltaica (energía solar) permitirá reducir significativamente la huella de carbono de la estación, mitigando las emisiones directas e indirectas derivadas del uso de generadores a diésel y el transporte de combustible. Este cambio contribuirá a preservar la biodiversidad local y mejorar la calidad del aire de la región.

Aunque el sistema fotovoltaico representa una inversión inicial considerable, el análisis económico evidencia que es rentable a largo plazo. La eliminación parcial del consumo de diésel y la reducción de costos logísticos asociados al transporte permite recuperar la inversión en un periodo de 7 a 8 años. Lo que demuestra que, una vez superado este periodo, el sistema fotovoltaico proporcionará energía completamente libre de emisiones, generando tanto beneficios ambientales significativos como ahorros económicos sostenibles a largo plazo. Este modelo desarrollado de los paneles solares representa una solución replicable para otras áreas remotas y ecológicamente sensibles. Además, promueve la diversificación de la matriz energética en el Ecuador, reduciendo la dependencia de las hidroeléctricas y generadores, y aumentando la resiliencia frente al cambio climático.

Por último, es importante resaltar que, con la instalación del caso híbrido de 61 paneles solares, se pasaría de encender el generador durante 6 horas y 30 minutos cada día, a encenderlo únicamente durante 3 horas y 45 minutos. Minimizando los impactos del generador como las emisiones generadas y el ruido que afecta a la biodiversidad.

Se recomienda identificar las áreas de la estación con mayor exposición solar para la instalación de los paneles, reduciendo la influencia de la vegetación y la nubosidad. Además, sería útil evaluar el uso de tecnologías avanzadas, como paneles bifaciales o sistemas de seguimiento solar, para maximizar la captación de irradiación. Asimismo, es fundamental establecer un programa de monitoreo continuo que permita evaluar el rendimiento del sistema y capacitar al personal en el mantenimiento de los paneles, asegurando así un funcionamiento óptimo. Por último, se sugiere realizar investigaciones adicionales sobre el impacto del sistema fotovoltaico en la biodiversidad local y explorar alternativas para la disposición final de los paneles, priorizando estrategias de reciclaje.

5 REFERENCIAS

- [1] Y. P. R. Monier, R. V. Feijoo, K. G. G. Alvarez, and M. P. Betancourt, “Environmental impact of energy production with generators,” *International journal of life sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 25–31, Nov. 2019, doi: 10.29332/ijls.v3n3.364.
- [2] S. Chamba, R. Barba, M. Vaca, and J. Guevara, “Informe Anual - Operador Nacional de Electricidad - CENACE 2023,” Quito, 2023. Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/Parte-1-Informe-Anual-CENACE-2023.pdf>
- [3] A. Barragán-Escandón, D. Jara-Nieves, I. Romero-Fajardo, E. F. Zalamea-Leon, and X. Serrano-Guerrero, “Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 43, p. 100903, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100903.
- [4] R. Zalakeviciute, V. Diaz, and Y. Rybarczyk, “Impact of City-Wide Diesel Generator Use on Air Quality in Quito, Ecuador, during a Nationwide Electricity Crisis,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 10, p. 1192, Oct. 2024, doi: 10.3390/atmos15101192.
- [5] S. Prakash and A. K. Verma, “ANTHROPOGENIC ACTIVITIES AND BIODIVERSITY THREATS,” *International Journal of Biological Innovations*, vol. 04, no. 01, pp. 94–103, 2022, doi: 10.46505/IJBI.2022.4110.
- [6] C. J. Stevens *et al.*, “The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, no. 2183, p. 20190317, Oct. 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0317.
- [7] W. Strielkowski, L. Civín, E. Tarkhanova, M. Tvaronavičienė, and Y. Petrenko, “Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 24, p. 8240, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248240.
- [8] International Organization for Standardization, “ISO 14064-2:2019(es).” Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-2:ed-2:v1:es>
- [9] Ministerio de Energía y Minas, “Informe Factor de Emisión de CO₂. Sistema Nacional Interconectado del Ecuador.” Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- [10] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, “Estadística Anual y Multianual 2023 DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO,” 2023. Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/EstadisticaAnual2023-WEB-2.pdf>

- [11] R. Parra, "Contribution of non-renewable sources for limiting the electrical CO₂ emission factor in Ecuador," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 244, pp. 65–77, 2020, doi: 10.2495/AIR200061.
- [12] G. Reyes, P. Cárdenas, J. Rubio, and A. García, "Análisis de costos generados por el transporte fluvial en sectores de difícil acceso en la Amazonía Ecuatoriana," *FIPCAEC*, vol. 6, no. 4, Oct. 2021.
- [13] Z. R. Tahir and M. Asim, "Surface measured solar radiation data and solar energy resource assessment of Pakistan: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2839–2861, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.06.090.
- [14] I. Santiago, D. Trillo-Montero, I. M. Moreno-Garcia, V. Pallarés-López, and J. J. Luna-Rodríguez, "Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 70–89, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.03.054.
- [15] Ambient Weather Network, "AWN." Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://ambientweather.net/>
- [16] J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez, "Efficient buildings and the arguments for incorporating exergy," *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings*, pp. 3–66, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-817611-5.00001-1.
- [17] L. Castañer, S. Bermejo, T. Markvart, and K. Fragaki, "Energy Production by a PV Array," *Practical Handbook of Photovoltaics*, pp. 645–658, 2012, doi: 10.1016/B978-0-12-385934-1.00018-0.
- [18] R. T. Miranda, M. L. G. Renó, and R. M. Barros, "END-OF-LIFE PHOTOVOLTAIC MODULES: LIFE CYCLE ASSESSMENT AND SENSIBILITY ANALYSIS," *Revista Contemporânea*, vol. 4, no. 5, p. e3864, May 2024, doi: 10.56083/RCV4N5-088.
- [19] R. Battisti and A. Corrado, "Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology," *Energy*, vol. 30, no. 7, pp. 952–967, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.energy.2004.07.011.
- [20] R. Gaytan, A. Nava, J. Perez, and P. Reza, "Árboles consumidores del CO₂ y productores O₂ beneficio para todos," *UVM*, 2018, Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Memoria-Congreso-2018/trabajos/ciencias-biologicas-quimicas-y-de-la-salud/medio-ambiente-biologia/doc21.pdf>
- [21] EPA, "Emisiones de gases de efecto invernadero de un vehículo de pasajeros típico." Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>

- [22] S. Arla Odio, M. Tapia Zurita, J. Guasumba Codena, J. Martínez, J. Asitimbay, and E. Tapia Zurita, “Validación del Recurso Solar en el Ecuador para Aplicaciones de Media y Alta Temperatura,” *INNOVA Research Journal*, vol. 2, no. 7, pp. 34–45, Jul. 2017, doi: 10.33890/innova.v2.n7.2017.226.
- [23] Sun Conservation, “¿Cuánto cuesta instalar paneles solares en Ecuador?” Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.sunconservation.com/post/cu%C3%A1nto-cuesta-instalar-paneles-solares-en-ecuador>
- [24] G. Renovables, “Paneles Solares en Ecuador.” Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://generarenovables.com/paneles-solares/>
- [25] H. Strategia Ecuador, “Kits de Paneles Solares.” Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://heliostrategiaecuador.com/kits-conectados/>
- [26] El Universo, “Precio de la gasolina extra y ecopaís sube a partir de este 12 de noviembre.” Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/precio-gasolina-extra-ecopais-super-ecuador-noviembre-2024-nota/>
- [27] G. Reyes, P. Cárdenas, J. Rubio, and A. García, “Análisis de costos generados por el transporte fluvial en sectores de difícil acceso en la Amazonía Ecuatoriana,” *FIPCAEC*, vol. 6, no. 4, Oct. 2021.