

Tipo de artículo: artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/uct.v28i125.854>

Diseño y simulación de una planta fotovoltaica para el máximo aprovechamiento del recurso solar en Tolviejo, Colombia

Luz Elena Maldonado Alvarez*
<https://orcid.org/0009-0009-0246-9957>
maldonadoluzelena20@gmail.com
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela

José Luciano Maldonado
<https://orcid.org/0009-0004-9001-2917>
jlmaldonaj@gmail.com
Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela

*Autor de correspondencia: maldonadoluzelena20@gmail.com

Recibido (20/05/2024), Aceptado (13/09/2024)

Resumen: Actualmente, existen diversas tecnologías para la construcción de plantas fotovoltaicas que incluyen paneles fotovoltaicos monofaciales y bifaciales, inversores centralizados y tipo string, y estructuras de montaje fijo con seguidores de luz, para construir sistemas de generación de energía eléctrica. En este trabajo se revisaron las ventajas y desventajas entre estas tecnologías, y se propuso la implementación de una planta fotovoltaica en Tolviejo, Colombia. Para justificar y confirmar el diseño, se realizaron simulaciones con el software PVsyst, resultando los paneles bifaciales, los inversores centralizados y las estructuras con seguidores de luz, la solución más efectiva y de mayor producción para la planta de generación de energía fotovoltaica propuesta.

Palabras clave: plantas fotovoltaicas, energías renovables, desarrollo sostenible, paneles solares.

Design and simulation of a photovoltaic plant for maximum use of the solar resource in the Tolviejo municipality of Colombia

Abstract.- Currently, there are various technologies for constructing photovoltaic plants including monofacial and bifacial photovoltaic panels, centralized and string type inverters, and fixed mounting structures with light followers, to build electrical energy generation systems. This work reviewed the advantages and disadvantages between these technologies, and the implementation of a photovoltaic plant in Tolviejo, Colombia was proposed. To justify and confirm the design, simulations were carried out with the PVsyst software, resulting in the bifacial panels, centralized inverters, and structures with light followers, the most effective solution, and with the highest production for the proposed photovoltaic power generation plant.

Keywords: photovoltaic plants, renewable energy, sustainable development, solar panels.



I. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la energía solar viene experimentando un gran uso y desarrollo a nivel mundial, desde hace varias décadas, entre algunas razones para ello están las regulaciones que han acordado los países para disminuir el cambio climático, como el Acuerdo de París, y por otro lado está el gran avance tecnológico, particularmente, el desarrollo de la tecnología de paneles solares que cada vez son más eficientes y adaptables a diversas condiciones ambientales. De hecho, la generación de energía solar ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, y se estima que continúe creciendo, a la vez que los costos de este tipo de energía vienen disminuyendo, lo que logrará que la energía solar sea más accesible y competitiva en comparación con otras fuentes de energía. Es decir, se está dando la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables, a través del interés y desarrollo de la energía solar, a nivel mundial, y se espera que la energía solar siga desempeñando un papel crucial hacia un sistema energético más sostenible que asegure el cuidado ambiental para las generaciones futuras.

En cuanto al diseño e instalación de una planta fotovoltaica hay que seguir una planificación que abarca muchos factores, para garantizar su eficiencia y rentabilidad, como son: la ubicación de la planta fotovoltaica, el cual es un factor crítico, ya que determina la cantidad de radiación solar recibida. La inclinación óptima de los paneles solares y la presencia de sombreado que puede afectar la producción de energía. La orientación de los paneles solares es un aspecto fundamental para maximizar la captación de energía solar. La selección del tamaño y el tipo de los paneles solares depende de la cantidad de energía que se desea generar, la eficiencia de los paneles y el espacio disponible para la instalación. El sistema de montaje de los paneles solares debe ser adecuado para la ubicación y el tipo de terreno donde se instalará la planta fotovoltaica, ya sea en suelo o en estructuras elevadas. Las condiciones climáticas locales, como la temperatura, la humedad y la presencia de vientos fuertes, influyen en la producción de los paneles solares, por lo que son consideradas en el diseño. Y por supuesto, las regulaciones y normativas locales relacionadas con la instalación de plantas fotovoltaicas, incluyendo los permisos necesarios, los estándares de seguridad y las normas de conexión a la red eléctrica deben ser estrictamente cumplidos.

Con respecto a Colombia, un país que está situado en una región tropical privilegiada, que cuenta con un potencial solar significativo que puede contribuir considerablemente a potenciar su matriz energética, la energía solar es una fuente abundante y sostenible, que si se aprovecha adecuadamente puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados [1]. La radiación solar en Colombia varía según la región, con niveles más altos en áreas como la Costa Caribe y los Llanos Orientales. A pesar de esto, el país aún no ha desarrollado suficientemente este potencial en energía solar fotovoltaica (FV) y térmica, fundamentalmente, por la falta de infraestructura adecuada y por limitaciones económicas para realizar la inversión en las tecnologías solares requeridas para tal fin [2]. Sin embargo, en los últimos años se han implementado políticas y programas para promover el uso de energías renovables, incluida la solar. Esto ha llevado a un aumento en la instalación de sistemas solares, tanto a nivel residencial como comercial, y ha abierto oportunidades para el crecimiento del sector solar en el país [2]. En ese sentido, a través de empresas de capital privado se han dado pasos en esta dirección y es por ello que en esta investigación se plantea aprovechar el recurso solar en la costa del país, con tecnología de punta, para garantizar la producción de energía eléctrica a través de una planta fotovoltaica, con un tiempo de vida útil de 25 años. La investigación consistió en realizar un exhaustivo análisis de las diversas tecnologías disponibles, y se seleccionaron las que mejores se adaptan a las necesidades del lugar, cuya ubicación se encuentra en el municipio de Tolúviejo en Colombia. Esta selección de tecnologías estuvo basada en criterios de eficiencia, sostenibilidad y adecuación al entorno, garantizando así un sistema de calidad que cumplirá con los requerimientos establecidos por las leyes del país.

El diseño propuesto en esta investigación abarcó un procedimiento detallado de revisión de diversas tecnologías de paneles solares, tanto monofaciales como bifaciales, tecnologías de estructuras de montaje, considerando tantas estructuras fijas como aquellas equipadas con seguidores solares (trackers en inglés) e inversores centralizados y de tipo string. Además, se realizaron simulaciones detalladas de generación de energía real en el punto de interconexión con la subestación de Tolúviejo, asegurando así la integración óptima con el sistema interconectado nacional (SIN) de Colombia. Este enfoque integral permite garantizar la selección y aplicación de la tecnología más adecuada y eficiente, para maximizar la generación de energía solar en el sitio de instalación.

Este trabajo está organizado en las secciones siguientes: Introducción, que incluye los aspectos generales de la construcción de una planta fotovoltaica, la sección asociada al Desarrollo, que comprende la selección de tecnologías para el diseño específico de la planta fotovoltaica, la ubicación de la Planta Fotovoltaica, los paneles fotovoltaicos seleccionados, la estructuras de montajes, los Inversores, la interconexión al Sistema Interconectado Nacional de Colombia, la sección de la Metodología seguida para el diseño de la planta, la sección de Resultados de la planta fotovoltaica en el Municipio de Tolúviejo; y las Conclusiones.

II. DESARROLLO

Al diseñar un sistema fotovoltaico, se deben considerar varios criterios para seleccionar las tecnologías adecuadas. Algunos de los criterios clave incluyen:

- **Eficiencia:** La eficiencia de los paneles solares es crucial, ya que determina cuánta energía pueden generar en relación con la cantidad de luz solar que reciben [3], [4].
- **Costo:** El costo inicial de los paneles solares y otros componentes del sistema, así como los costos de instalación y mantenimiento, deben tenerse en cuenta. Es importante equilibrar el costo con la calidad y la eficiencia, para lograr el retorno adecuado de la inversión [3],[4].
- **Disponibilidad y tiempo de entrega:** La disponibilidad de los componentes del sistema y el tiempo necesario para su entrega, por parte de los proveedores, son importantes para garantizar que el proyecto se complete según la planificación preestablecida [3].
- **Garantía:** Es importante considerar la garantía ofrecida por el fabricante con respecto a los paneles solares y otros componentes del sistema. Una garantía sólida es un buen indicador de la calidad y confiabilidad de los productos [3].
- **Compatibilidad:** Todos los componentes del sistema, como los paneles solares, inversores, cables y estructuras de montaje, deben ser compatibles entre sí para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro del sistema [4].
- **Clima y ubicación:** El clima y la ubicación del sitio de instalación son factores importantes a considerar, ya que determinan la cantidad de luz solar disponible y pueden influir en la elección de tecnologías específicas, como paneles bifaciales o sistemas de seguimiento solar [3],[4].
- **Normativas y regulaciones locales:** Es crucial cumplir con las normativas y regulaciones locales relacionadas con la instalación de sistemas fotovoltaicos, lo que puede influir en la selección de tecnologías y en el uso de componentes específicos [3].

En el desarrollo de esta investigación, se consideraron todos esos criterios y otros factores relevantes, en cada uno de los aspectos más importantes, con el fin de proponer un diseño fotovoltaico eficiente, rentable y adecuado a las necesidades específicas del Municipio Tolúviejo de Colombia. A continuación, se exponen los factores que determinaron el diseño propuesto:

A. Ubicación de la planta fotovoltaica

El diseño propuesto en esta una investigación corresponde a una planta fotovoltaica que podría implementarse en el municipio Toluviejo, situado entre el PK 64 ruta 9004 y el PK 63 de la misma ruta, al margen derecho de la vía que conduce desde el municipio de Toluviejo hacia el municipio de Tolú, en el Departamento Sucre de Colombia. La planta se tendría que desarrollar en dos extensiones de terreno de 11,12 Ha y 14,14 Ha, respectivamente, para un total de 25,26 Ha, tal como se indica en las coordenadas especificadas en la Fig. 1.

Vale la pena señalar que, bajo un estudio de evaluación previo, se determinó que el terreno presenta condiciones favorables para la construcción de una planta fotovoltaica, ya que no es montañoso, no posee lagunas ni ríos. Esto sugiere que la zona está relativamente despejada y ofrece un entorno propicio para la instalación de paneles solares, lo que facilitará la captación de la luz solar y la generación de energía fotovoltaica de manera eficiente. De todos modos, en caso de trascender este estudio a una fase siguiente, es necesario realizar estudios adicionales, a nivel de detalles de ingeniería, relacionados a analizar la topografía, el impacto ambiental, la hidrología, los suelos, la resistividad, entre otros estudios necesarios para asegurar una adaptación adecuada del diseño propuesto a las condiciones del lugar de implantación.



Fig. 1. Ubicación de la Planta Fotovoltaica en el municipio Toluviejo, Colombia
Fuente: propia

B. Paneles fotovoltaicos utilizados

Entre los tipos de paneles fotovoltaicos se encuentran los paneles monofaciales y bifaciales. La diferencia más relevante entre estos dos tipos de paneles es su capacidad para capturar la luz solar, en este sentido, un panel fotovoltaico bifacial es más eficiente que un panel monofacial puesto que puede capturar la luz solar incidente por sus dos lados, es decir, este tipo de panel aprovecha la luz solar que se refleja en su parte posterior, así como la luz directa que recibe en su parte frontal [5], lo que aumenta su capacidad para generar electricidad, mientras que un panel monofacial solo puede capturar la luz solar que incide en su parte frontal. Esto significa que un panel bifacial puede generar energía, incluso, cuando no recibe luz directa del sol, como en días nublados o cuando hay reflexión de luz desde superficies cercanas, como desde elementos que se encuentran en el suelo o en edificios o cualquier construcción cercana. Además, al capturar más luz solar, un panel bifacial puede generar más energía, en general, lo que lo hace más eficiente en términos de energía producida por área de paneles [6]. Otro factor que contribuye a la mayor eficiencia de los paneles bifaciales es su diseño y materiales. Los paneles bifaciales, suelen estar contruidos con materiales y tecnologías que permiten una mayor captación de luz y una conversión más eficiente de la energía solar en electricidad, en comparación con los paneles monofaciales [6]. Sin embargo, según el lugar donde se vaya a instalar la planta, no siempre es conveniente instalar paneles bifaciales.

D. Inversores

Los inversores fotovoltaicos son dispositivos electrónicos que convierten la corriente continua (CC), producida por los paneles solares fotovoltaicos, en corriente alterna (CA). Estos dispositivos son fundamentales en los sistemas de energía solar fotovoltaica, ya que permiten que la electricidad generada por los paneles solares sea utilizada de manera efectiva para alimentar otros y diferentes dispositivos eléctricos, y para enviarla a la red eléctrica o almacenarla en baterías. Entre los principales tipos de inversores utilizados en sistemas fotovoltaicos se encuentran los inversores centralizados y los inversores tipo string, cuyas ventajas y desventajas entre sí, se indican a continuación:

Los inversores centralizados: Son unidades únicas que están conectadas a múltiples cadenas (strings) de paneles solares. Estos inversores reciben la energía de todas las cadenas y la convierten en corriente alterna. Actualmente, existen tecnologías que vienen en un skid, que contiene, adicionalmente, los transformadores elevadores con la capacidad de conectarse directamente a la red eléctrica. Entre sus ventajas están que se tienen menores costos iniciales debido a que se requiere la compra de un solo inversor para todo el sistema, hay menor complejidad en la instalación y en el mantenimiento, y como principal desventaja se tendrá un mayor impacto en la producción total si el inversor falla, ya que todo el sistema puede verse afectado [13].

Los inversores tipo string: Están conectados a una cadena (string) única de paneles solares, es decir, cada cadena tiene su propio inversor, que convierte la energía de esa cadena en electricidad utilizable. Entre las ventajas del uso de este tipo de inversores están que se tiene una mayor eficiencia en comparación con los inversores centralizados, ya que cada cadena opera de forma independiente, lo que proporciona una mayor flexibilidad en el diseño, por lo que se puede optimizar las cadenas individuales para maximizar la producción de energía, además de que habrá menor impacto en la producción total de electricidad si un inversor falla, puesto que solo se verá afectada la cadena conectada a ese inversor. Como desventajas se puede destacar que se tiene un mayor costo inicial debido a la necesidad de comprar múltiples inversores, y una mayor complejidad en la instalación y en el mantenimiento [13]. En esta investigación específica se optó por un inversor centralizado, debido a que sus costos de instalación, operación y mantenimiento resultan más bajos en comparación con el uso de los inversores tipo string. La elección se basó en que los inversores tipo string requerían más mano de obra y tiempo de instalación, lo que los hacía menos eficientes en términos de costos y recursos.

En cuanto a la selección del equipo elegido, fue un skid de capacidad de 7500 kVA que incluye 2 inversores de 3750 kVA cada uno, un transformador elevador de 0,48 kV /34.5 kV de 7.5 MVA, un transformador auxiliar de 30 kVA, 1 Skid de integración de los inversores, transformadores, switchgear, sistemas auxiliares y toda la interconexión para una solución Plug & Play (soluciones prefabricadas listas para conectar) de estaciones de potencia de usos exteriores [14]. En total, este diseño considera un total de 3 skids de inversores centralizados de 7500 kVA cada uno, resultando en una potencia efectiva de salida de la planta fotovoltaica de 19,9 MWac que serán inyectados al SIN.

E. Línea de transmisión hacia la interconexión al SIN de Colombia y sistemas auxiliares

La infraestructura de evacuación incluye una línea de transmisión aérea que puede conectar la subestación de la planta fotovoltaica con la subestación existente de Toluviejo de 110 Kv a través de una línea con configuración en circuito simple, la cual se describe a continuación:

En esta investigación, y en consideración de las condiciones del Municipio Tolúviejo de Colombia, se seleccionó el panel bifacial del fabricante LONGi Solar modelo 18X-LR5-72HBD-530M de 530 W. La razón principal, por la cual se tomó esta decisión, fue que LONGi Solar se encuentra entre los primeros cuatro lugares del top de fabricantes de paneles solares a nivel mundial, según lo indicado por Solarbe Global para el año 2023 [7]. Adicionalmente, este panel presenta una garantía de 30 años de producción con una degradación anual menor del 0.45% [8], además, cuenta con un diseño óptimo para la reducción de pérdidas por temperaturas en operación y de puntos calientes. Asimismo, este panel cuenta con las certificaciones IEC 61215, IEC 61730, UL 61730, ISO 9001:2008, ISO Quality Management System, ISO 14001:2004, ISO Environment Management System, TS62941: Guideline for module design qualification and type approval, OHSAS 18001:2007 Occupational Health and Safety y RETIE.

Es importante destacar que, en Colombia, todos los equipos correspondientes al sector eléctrico deben cumplir con el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), bajo el cual el equipo y los desarrollos eléctricos son sometidos a un análisis de viabilidad donde se acepta o rechaza la solicitud de su instalación. LONGi Solar ha certificado más de 25 de sus paneles solares, siendo este modelo uno de los que cuentan con esta certificación [9]. En cuanto a la disponibilidad y tiempos de entrega, el fabricante cuenta con la capacidad de despacho requerida para cumplir con los planes de ejecución del proyecto, puesto que contempla las entregas para 12 meses después de la firma de la orden de compra del producto. Y en relación a los precios, LONGi Solar presenta precios competitivos del mercado por lo que representa una excelente relación calidad-precio. Bajo esta selección del tipo y fabricante de los paneles solares, y también en base al área de instalación, la capacidad instalada máxima aprovechable es de 25,76 MWdc, con una instalación de 48.608 paneles fotovoltaicos que ocupan 24,75 Ha.

C. Estructuras de montaje

Existen varios tipos de estructuras de montaje para paneles fotovoltaicos, tanto fijas como con seguidores de luz. Entre las ventajas y desventajas de estas tecnologías, entre sí, se tienen las siguientes:

Las estructuras de montaje fijas (estáticas): Estas estructuras tienen como ventaja que son más sencillas y económicas para instalarlas, requieren menor mantenimiento debido a su simplicidad y tienen menos componentes móviles, lo que puede aumentar su durabilidad. Su gran desventaja es que tienen menor eficiencia en la generación de energía, ya que los paneles no siguen la trayectoria óptima del sol durante el día. Pueden resultar menos eficientes en áreas con variaciones estacionales significativas en la posición del sol [10].

Las estructuras de montaje con seguidores de luz: Las ventajas de esta tecnología es que mejoran la eficiencia al seguir la trayectoria del sol a lo largo del día, lo que puede aumentar la producción de energía hasta en un 25-35% en comparación con los sistemas fijos. Es un montaje adecuado para regiones con variaciones estacionales significativas en la posición del sol. La desventaja que tienen es que son más costosas y requieren mayor mantenimiento, debido a la presencia de componentes móviles [10].

Con el objetivo de maximizar la producción de electricidad, y para aprovechar más el área de ocupación de los paneles solares, fueron seleccionadas las estructuras con seguidores solares Monofila-2V, los cuales son seguidores de un solo eje diseñado con un motor por estructura, autoalimentado mediante baterías para reubicar los paneles a su posición original [10]. La configuración final de la estructura de montaje diseñada comprende 2 módulos en posición vertical, con una capacidad máxima de 116 y 50 módulos por cada seguidor individual. Estos seguidores solares cuentan con una estructura extremadamente fácil de ensamblar en campo, con bajos requerimientos de mantenimiento y alta duración, con un promedio de tiempo de vida útil de 25 años. Por otro lado, vale la pena destacar que estas estructuras pueden llegar a soportar vientos de hasta 150 km/h [11], y en el municipio Tolúviejo las velocidades de los vientos están en promedio en 6,5 km/h [12], por lo que es acertado utilizar este tipo de estructuras en el área de implantación seleccionada.

- Línea de transmisión en 34,5 kV: Esta línea tiene por objeto transmitir, en 34,5 kV, la energía generada en el parque fotovoltaico de 19,9 MWac, hasta la subestación Toluviejo la cual se encuentra a una distancia de 850 metros. En esta subestación se puede ubicar un transformador elevador de 34.5 kV a 110 kV de 25 MVA, conectado al anillo existente en la subestación Toluviejo, a través de una ampliación aislada en SF6 (Interruptor GIS) de 110 kV. Esta línea de transmisión tendrá que ser aérea, cumpliendo con las normativas del SIN de Colombia, por lo que incluirá los sistemas de protecciones, monitoreo, protocolos de comunicación, RETIE y sincronización de la planta a la red nacional, al momento de realizar la interconexión. Este último procedimiento deberá ser llevado a cabo bajo la supervisión y aprobación del personal del SIN de Colombia.
- Sistemas auxiliares: Entre los sistemas auxiliares se tienen 2 Estaciones Meteorológicas, un sistema de detección y alarmas contra incendio, un sistema de vigilancia, un cuarto de control y monitoreo; y un generador de emergencia de 200 kW.

Es importante destacar que todos los equipos del diseño deberán cumplir con las normativas nacionales y deberán contar con la certificación RETIE correspondiente. Asimismo, se garantiza la compatibilidad de las tecnologías propuestas en esta investigación, para asegurar su correcto funcionamiento y maximizar su eficiencia energética.

III. METODOLOGÍA

En la Fig. 2, Se muestran, de manera general, cada una de las actividades que se cumplieron para lograr el diseño propuesto de la planta fotovoltaica para el Municipio Tuloviejo de Colombia. Es preciso tener en cuenta, que la actividad identificada como la número 1, que tiene que ver con la selección del lugar dónde se ubicaría la planta, fue cumplida en un estudio previo, por lo tanto, no se describe en este trabajo, y sus coordenadas geográficas se indican en la Fig. 1. Mientras que, el resto de las actividades fueron cumplidas en la forma descrita en este trabajo.



Fig. 2. Esquema general del diseño de la planta fotovoltaica propuesta
Fuente: propia.

IV. RESULTADOS

Para obtener el diseño propuesto, se realizaron simulaciones y análisis de estas simulaciones. Para ello se utilizó el software PVSyst, que es un paquete, específicamente, para el diseño, la simulación y el análisis de sistemas de energía solar fotovoltaica. Este software les permite a los usuarios modelar sistemas fotovoltaicos completos, desde la ubicación geográfica y la configuración del módulo solar hasta el análisis de la producción de energía, e incluso medir el rendimiento económico. En definitiva, con el software PVSyst, se puede simular cómo se comportará una planta fotovoltaica en condiciones específicas de ubicación geográfica, del clima y de los requerimientos de energía eléctrica. El software tiene en cuenta factores como la inclinación de los paneles solares, la orientación, la sombra, la eficiencia de los módulos, entre varios elementos clave para proporcionar estimaciones precisas de la producción de energía y el rendimiento financiero del sistema [15].

Por lo tanto, con PVsyst, utilizando la base meteorológica 7.3 considerada por la ubicación, los paneles fotovoltaicos bifaciales 18X-LR5-72HBD-530M, los inversores centralizados y las estructuras con seguidores de luz, se procedió a realizar las simulaciones para la ubicación seleccionada, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 1. La producción del sistema en megavatios-hora por año (MWh/año), en una planta fotovoltaica, indica la cantidad total de energía eléctrica que se espera que genere la planta en un año. El MWh/año es una medida para evaluar el rendimiento y la rentabilidad de una planta fotovoltaica, ya que determina cuánta energía puede generar la planta y, por lo tanto, cuánta energía puede venderse o utilizarse para satisfacer las necesidades de energía de los usuarios [15]. Para este caso específico, la producción del sistema para el primer año es de 46.421 MWh/año, el cual es un valor considerado óptimo y eficiente para el diseño propuesto.

La producción específica kWh/kWp/año puede variar según varios factores, como la ubicación geográfica de la planta, la radiación solar disponible y la eficiencia de los módulos solares. Sin embargo, se indica que, en regiones con buenas condiciones de radiación solar, se considera que una producción anual de alrededor de 1.300 a 1.500 kWh/kWp/año de capacidad instalada es un valor sólido [16]. En este caso, el valor de producción específica para el primer año es de 1802 kWh/kWp/año, el cual resulta ser una excelente producción con el diseño propuesto. Por otro lado, la proporción de rendimiento o PR (Performance Ratio), en simulaciones de plantas fotovoltaicas, es una medida de la eficiencia con la que una planta fotovoltaica convierte la energía solar en electricidad. Se calcula como la relación entre la energía eléctrica realmente producida por la planta y la energía solar incidente en la superficie de los paneles solares. El PR es una métrica importante en el diseño y la evaluación de plantas fotovoltaicas, ya que proporciona información sobre su rendimiento real en comparación con su rendimiento teórico máximo. Un PR alto indica que la planta está operando de manera eficiente, y está aprovechando bien la energía solar disponible, mientras que un PR bajo puede indicar problemas como sombreado, suciedad en los paneles o problemas de diseño.

Tabla 1. Producción del Proyecto Fotovoltaico Toluviejo.

Parámetros	Resultados para el primer año
Producción del Sistema [MWh/año]	46.421
Producción Específica [kWh/kWp/año]	1802
Proporción de rendimiento (PR)	84,65%

Fuente: propia.

En general, se considera que un PR típico para una planta fotovoltaica bien diseñada y mantenida está en el rango de 0.75 a 0.85 [16], por lo que en este caso con un diseño de 84.65%, para el primer año, resulta un valor óptimo. Con relación a los niveles de producción normalizados kWh/kWp/día, y de proporción de rendimiento (PR), para el primer año del diseño, éstos se pueden observar en las gráficas de la Fig. 3.

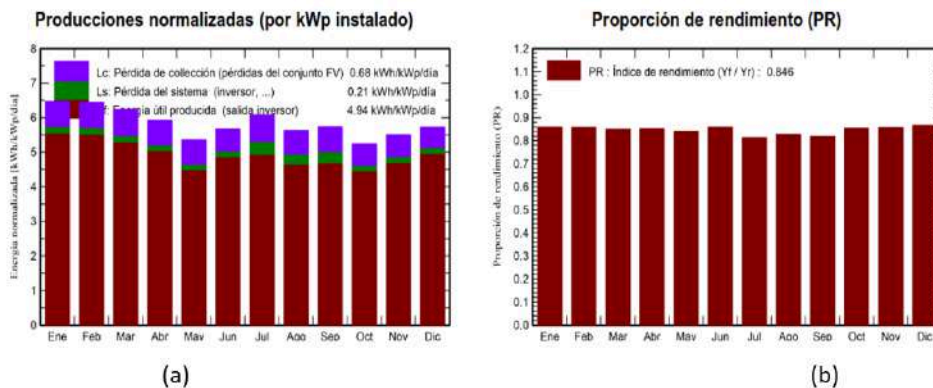


Fig. 3. (a) Gráficas de Energías normalizadas, (b) PR en el primer año.

Fuente: propia

Se observa que las producciones normalizadas para los meses de mayo y de octubre presentan la menor producción, mientras que la proporción de rendimiento no baja del 80% durante todos los meses del año, lo que es un indicador de que se está ante un diseño óptimo. Con respecto a los valores de irradiación horizontal global, irradiación difusa horizontal, temperatura ambiente, receptor de plano de incidente global, energía global efectiva, energía efectiva a la salida del conjunto, energía inyectada a la red y la proporción de rendimiento, por cada mes para el primer año, éstos se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Balances y resultados principales de la simulación del proyecto fotovoltaico Toluviejo para el primer año.

Meses	GlobHor <i>kWh/m²</i>	DiffHor <i>kWh/m²</i>	T_Amb °C	GlobInc <i>kWh/m²</i>	GlobEff <i>kWh/m²</i>	Earray MWh	E_Grid MWh	PR Proporción
Enero	163.1	65.70	26.01	200.6	193.7	4600	4443	0.860
Febrero	149.8	69.89	26.42	180.3	174.0	4127	3987	0.858
Marzo	163.1	86.04	27.33	193.4	186.5	4383	4234	0.850
Abril	150.4	83.18	27.92	177.7	171.4	4033	3900	0.852
Mayo	140.5	66.77	28.8	166.0	160.6	3723	3596	0.841
Junio	144.1	76.84	28.6	170.2	164.3	3891	3767	0.859
Julio	159.0	76.34	28.66	188.3	182.1	4252	3948	0.814
Agosto	150.0	86.50	28.49	174.5	168.3	3958	3724	0.828
Septiembre	145.8	75.27	27.73	172.4	166.7	3883	3637	0.819
Octubre	138.2	76.17	28.49	162.3	156.7	3695	3572	0.854
Noviembre	137.7	61.39	26.96	165.1	159.7	3775	3646	0.857
Diciembre	148.1	67.85	26.83	177.8	171.3	4103	3966	0.866
Año	1789.8	891.93	27.61	2128.7	2055.4	48422	46421	0.846

Fuente: propia.

Legendas

- GlobHor:** Irradiación horizontal global.
- DiffHor:** Irradiación difusa horizontal.
- T_Amb:** Temperatura ambiente.
- GlobInc:** Global incidente plano receptor.
- Earray:** Energía efectiva a la salida del conjunto.
- E_Grid:** Energía inyectada en la red.
- PR:** Proporción de Rendimiento.
- GlobEff:** Global efectivo.

Como se puede observar, en la Tabla 2, el total de la energía inyectada a la red para el primer año es de 46.421 MWh/año, destacando que los meses de menor de producción son mayo y octubre, y los mejores meses, en cuanto a producción, son enero, febrero y marzo. Por otro lado, en la gráfica de la Fig. 4, se puede observar la relación entre la energía inyectada en la red y el global incidente de plano receptor. La energía inyectada en la red en relación al global incidente de plano receptor, se refiere a la cantidad de energía eléctrica que un sistema fotovoltaico genera y que se entrega a la red eléctrica en relación con la cantidad total de radiación solar incidente en los paneles solares [17]. Esta métrica es importante porque indica la eficiencia con la que el sistema convierte la radiación solar en energía eléctrica y cuánta de esa energía se aprovecha realmente. Una gráfica con una línea de tendencia suave y constante (como se presenta en la Fig. 4) o con puntos mayoritariamente altos y ascendentes indica que el sistema está funcionando de manera eficiente, y se está aprovechando bien la radiación solar disponible. Mientras que una gráfica con fluctuaciones o una línea de tendencia descendente puede indicar problemas como sombreado, suciedad en los paneles o problemas de diseño [17].

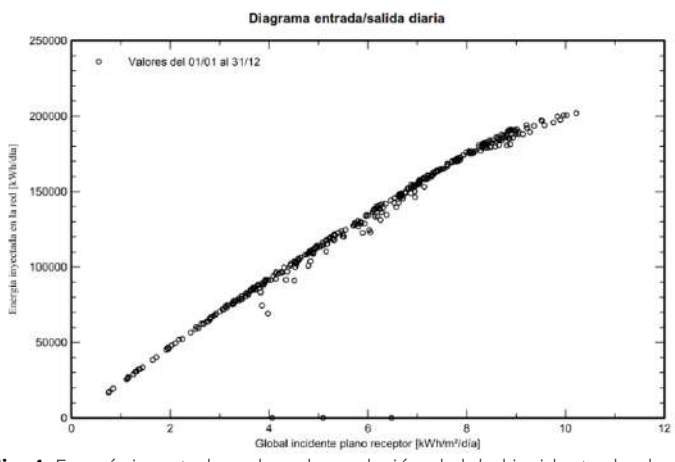


Fig. 4. Energía inyectada en la red en relación al global incidente de plano receptor.
Fuente: propia.

Para finalizar, en las Fig. 5 y la Fig. 6, se presenta la estimación de producción de energía inyectada a la red y la proporción de rendimiento por un tiempo de 30 años respectivamente.

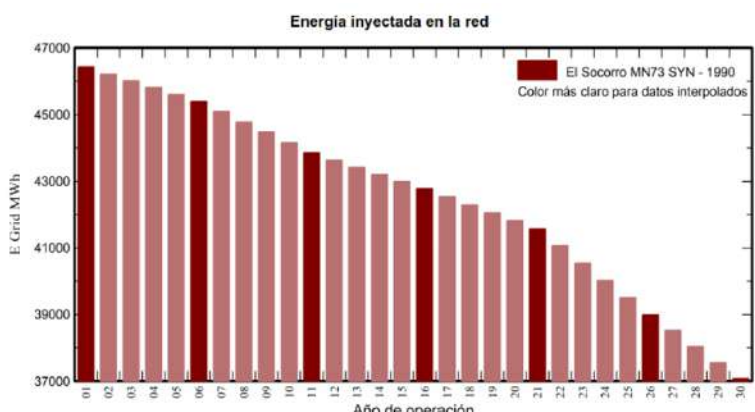


Fig. 5. Energía inyectada a la red en 30 años.
Fuente: propia.

Como se puede observar, en las Figs. 5 y 6, para los 25 años de operación de la planta, existe una caída en la producción y en la proporción de rendimiento, debido a la degradación de los paneles fotovoltaicos y de los equipos instalados. Sin embargo, esta caída es aproximadamente del 14,13%, en los primeros 25 años, con respecto a la energía inyectada a la red, y del 14,86% con respecto a la proporción de rendimiento, también, en los primeros 25 años.

Esto significa que la degradación anual promedio de la planta es del 0,57% para la energía inyectada a la red y 0,59% de caída anual de la proporción de rendimiento. Adicionalmente, es importante considerar que el factor de degradación de los paneles solares varía entre los 0,4% y 1% anual [18], y, específicamente, en esta investigación, los paneles seleccionados tienen una degradación anual menor del 0,45%, por lo que los valores de porcentaje de caída de producción de la planta, a lo largo de los 25 años de producción, están dentro de los valores esperados.

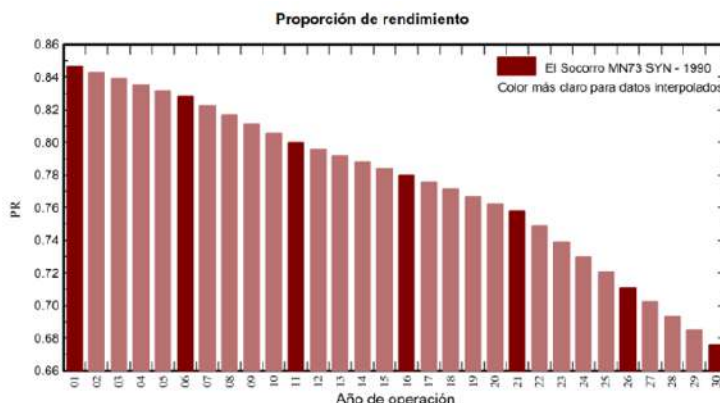


Fig. 6. Proporción de Rendimiento en 30 años.
Fuente: propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo, luego de realizar un estudio integral de todos los componentes necesarios para el diseño de la planta fotovoltaica, considerando tanto la geografía del lugar de implantación, como la fuente de energía solar y las facilidades de conexión de la línea de transmisión al SIN, se determinó que los equipos más eficientes y de máximo aprovechamiento del recurso solar son los paneles bifaciales, por su capacidad para captar luz solar por ambos caras del módulo, los inversores centralizados debido a que generan menores costos tanto de instalación como de mantenimiento comparados con las otras tecnologías analizadas, y las estructuras con seguidores de luz, puesto que todo el conjunto constituye una solución con una mayor producción de energía, específicamente, para el área de instalación. Estas decisiones están basadas en los resultados de las simulaciones desarrolladas con el software PVSyst, las cuales permitieron obtener valores realistas y óptimos, para esta planta fotovoltaica propuesta, en cuanto a la producción de energía, estimándose para el primer año 46.421 MWh/año, con una producción específica de 1802 kWh/kWp/año y una proporción de rendimiento del 84,6%. De la misma manera, se pudo observar que la energía inyectada en la red en relación al global incidente de plano receptor es lineal y ascendente, lo que es un indicador de que el sistema fotovoltaico es muy eficiente, en cuanto a la cantidad de energía eléctrica que genera y que entrega a la red eléctrica.

Finalmente, se estimó la producción de energía a lo largo de 30 años, resultando una caída de la producción para el año 25 de 14,13% con respecto a la energía inyectada a la red, y del 14,86% con respecto a la proporción de rendimiento, observándose una degradación promedio anual de 0,57% para la energía inyectada a la red y 0,59% de caída anual de la proporción de rendimiento, valores significativamente aceptables para los diseños de las plantas fotovoltaicas. En consecuencia, este diseño es adecuado para los requerimientos de la planta fotovoltaica a ser instalada en el municipio Tolviejo en Colombia. Es preciso mencionar que el diseño propuesto es particular para el municipio Tolviejo en Colombia, porque, tal como se ha señalado, los diseños de las plantas fotovoltaicas están condicionados por las características del lugar donde se vayan a implantar. Sin embargo, esta propuesta puede ser implementada, seguramente, con cambios menores, a geografías de diferentes partes del mundo, que presenten condiciones de temperatura, humedad, velocidad del viento, inclinación del terreno y presencia solar similares a las que se encuentran en el municipio Tolviejo en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] PROCOLOMBIA. "Colombia y su potencial en fuentes de energías renovables." InvestinColombia.com.co <https://investincolombia.com.co/es/recursos/colombia-y-su-potencial-en-fuentes-de-energia-renovables> (Accedida Nov. 4, 2023).
- [2] M. Planas, J. Cárdenas. "Energía para el futuro 2019: La matriz energética de Colombia se renueva." Blogs.iadb.org <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/> (Accedida Nov. 1, 2023).
- [3] H. Bravo, Y. Orozco. "Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para la redacción de costos energéticos de la Universidad Santo Tomás Sede Principal." Ing. Mecánico., Tesis, Dep. Ing. Mecánica, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2022. [Online]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/47667/2022Hamiltonbravo.docx.pdf?sequence=1>.
- [4] E. Rojas. "Optimización del rendimiento de sistemas fotovoltaicos mediante la implementación de un prototipo de mecanismo seguidor con cuerdas para la orientación solar automática MSCOSA". MSc., Tesis, Dep. Ing. Eléctrica y Electrónica, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2020 [Online]. Available: <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10161/1042348508.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] M. Rycroft. "Los Paneles Solares Bifaciales Proporcionan Un Mayor Potencial De Producción De Energía." Hu.dsnsolar.com Available: <https://hu.dsnsolar.com/info/bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36635553.html> (Accedida Oct. 20, 2023).
- [6] J. Castaño, A. Clemente, E. Arrieta. (2022). "Evaluación de superficies reflectantes para paneles solares bifaciales mediante la metodología de superficie respuesta". Ingeniería, Universidad Distrital. Vol. 27 N° 3, Dic. 2022, <https://doi.org/10.14483/23448393.18069>
- [7] A. Barrero. "Top Solar 2023: Estos han sido los más grandes fabricantes de módulos fotovoltaicos del año." <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/este-es-el-top-32-de-los-20240117#:~:text=Es%20el%20an%C3%A1lisis%20de%20Solarbe,LONGI%2C%20Trina%20y%20JA%20Solar> (Accedida Oct. 23, 2023).
- [8] LONGI. "Datasheet LONGI 18X-LR5-72HBD-530M." 2018, Distribuido por Longi https://static.longi.com/L_Gi_LE_T_TMD_059_108_LR_5_72_HBD_530_550_M_35_30_and_15_V14_4c79e9b9a7.pdf
- [9] SGS Colombia. "Certificado de Conformidad de Producto LONGI Green Energy Technology Co, Ltd." Solartex.co <https://www.solartex.co/tienda/wp-content/uploads/2022/02/RETIE-HiMO-5.pdf> (Accedida Oct. 24, 2023).
- [10] D. Arrieta, S. Puello. "Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo." Ing. Mecánico, Tesis, Dep. Ing. Mecánica, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia, 2015. [Online]. Available: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/1728589b-0382-4977-a96f-a1664048b8a1/content>
- [11] C. Walteros. "Diseño de sistema estructural tipo seguidor solar para paneles fotovoltaicos hexagonales dirigida a granja solar, finca el Dinde -La mata, Huila." Repository.javeriana.edu.co <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52050/Documento%20GENA%20-%20Camilo%20Walteros.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accedida Oct. 26, 2023).
- [12] Weather Spark. "Velocidad promedio del viento en Tolúviejo." Weatherspark.com <https://es.weatherspark.com/y/22579/Clima-promedio-en-Tolúviejo-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o> (Accedida Oct. 30, 2023).
- [13] L. Morales, A. Paredes. "Análisis comparativo de las tecnologías de inversores On Grid utilizados en sistemas conectados a la Red." Tesla Revista Científica, Vol. 4, N° 1. 2024, <https://tesla.puertomaderoeditorial.com.ar/index.php/tesla/article/view/286/331>
- [14] Gamesa Electric. "Datasheet PV Station 7500." Distribuido por Gamesa. Electric <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/7b2lorq849x/5d5e41da83340.pdf>

- [15] L. Foronda, L. Trejos, D. González. "Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos." *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 24 N° 2, 2022, <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i02.11516>
- [16] F. Barquín. Análisis de la ponderación de los diferentes parámetros en la producción de las instalaciones fotovoltaicas según PVsyst. Ing. de la Energía, Tesis, Dep. Ing. Energética, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2019.
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/101950/TFG-2468-BARQUIN%20VIDAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] E. Forniés. "Caracterización y optimización de parámetros de dispositivos fotovoltaicos. Aplicación a la industria." PhD, Doctorado en Electrónica, Dep. Ing, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España, 2014, <https://core.ac.uk/download/pdf/58911328.pdf>
- [18] F. Reguera. (2015) "Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos." MSc., Dep. Ing., Universidad Internacional de Andalucía, Sevilla, España, 2015.
https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3524/0675_Reguera.pdf?sequence=1.