



Diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaico para suplir las necesidades de energía eléctrica en la finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco Bolívar

Sebastián Lenés Ibarra
Edwin Rodríguez Corrales

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Programa de Ingeniería Electromecánica
Cartagena, Colombia
2022

Diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaico para suplir las necesidades de energía eléctrica en la finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco Bolívar

**Sebastián Lenés Ibarra
Edwin Rodríguez Corrales**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero electromecánico

Director (a):
Ing. Juan Vicente Cajal, Msc.

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Cartagena, Colombia
2021

Dedicatoria

Con todo mi amor y cariño a mis hijos Mauricio, Sebastián y Sofía y mi esposa Gaudís, quienes con su cariño y paciencia, me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño, gracias, por su apoyo, por creer en mí, son ustedes el motor de mi vida.

Edwin Rodríguez Corrales

Agradecimientos

A todas esas personas que sin esperar nada a cambio me ayudaron, que compartieron sus conocimientos conmigo, gracias por su apoyo incondicional.

*Sebastián Lenés Ibarra
Edwin Rodríguez Corrales*

Resumen

Se realizó el diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica para suplir las necesidades energéticas en la finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco, departamento de Bolívar, como respuesta al problema socioeconómico y medio ambiental que representa por la falta de cobertura del sistema eléctrico en estas zonas rurales. Básicamente, el diseño del sistema de generación fotovoltaica se hizo a partir del consumo energético requerido y de la aportación de energía solar del lugar. Para ello, se consultaron las bases de datos especializadas en energía fotovoltaicas, se realizaron los cálculos y el dimensionamiento de los componentes del sistema FV, se simuló en PSGIS el sistema diseñado y se determinaron los costos de implementación a partir de valores comerciales, fundamental para la toma de decisiones por parte del propietario.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, aportación solar, PSGIS, paneles fotovoltaicos, electrificación rural, baterías solares, regulador de carga, inversor de voltaje

Abstract

A photovoltaic power generation system was designed to meet the energy needs of the “Torre Solar” farm, located in the rural area of the municipality of Turbaco, department of Bolívar, in response to the socioeconomic and environmental problem that the lack of electrical system coverage in these rural areas. Basically, the design of the photovoltaic generation system was made from the required energy consumption and the contribution of solar energy from the place. For this, the specialized databases in photovoltaic energy were consulted, the calculations and sizing of the PV system components were carried out, the designed system was simulated in PSGIS and the implementation costs were determined from commercial values, fundamental for decision-making by the owner.

Key words: Photovoltaic energy, solar input, PSGIS, photovoltaic panels, rural electrification, solar batteries, charge regulator, voltage inverter

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
Capítulo 1 - Planteamiento del Problema	13
1.1. Descripción del Problema.....	13
1.2. Planteamiento del problema.....	14
1.3. Justificación.....	15
1.4. Objetivos	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Específicos	16
1.5. Metodología	17
2. Capítulo 2 - Marco Referencial	19
2.1 Marco teórico	19
2.1.1. Energías Renovables.....	19
2.1.2. Energía Solar	19
2.1.2.1 Irradiación solar	20
2.1.3. Energía solar fotovoltaica	21
3. Capítulo 3 - Diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica	31
3.1. Definición de los requerimientos energéticos de la finca "Torre Solar"	31

Contenido	7
3.1.1. Cálculo de los requerimientos de cargas eléctricas	31
3.2. Cálculo de la radiación solar recibida.....	34
3.2. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica.....	37
3.3.1. Cálculo del número de módulos FV.....	38
3.3.2. Estimación de la capacidad de las baterías:.....	41
3.3.3. Elección del regulador carga:.....	42
3.3.4. Elección del Inversor:.....	43
3.4. Selección técnica de los componentes del sistema FV.....	44
3.4.1. Selección del panel FV.....	44
3.4.2. Selección de las baterías:.....	45
3.4.3. Selección del Regulador de carga.....	46
3.4.4. Selección del Inversor.....	47
3.4.5. Evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto:.....	47
3.5. Simulación del rendimiento del sistema FV autónomo.....	49
3.5.1. Simulación con el software PVGIS [28].....	49
3.5.2. Resultados de la simulación.....	51
4. Conclusiones y recomendaciones.....	61
3.1. Conclusiones.....	61
3.2. Recomendaciones.....	62
5. Bibliografía.....	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Promedio mensual de radiación global en Cartagena.....	21
Figura 2-2. Sistema de generación fotovoltaica	22
Figura 2-3. Especificaciones eléctricas de un panel solar.....	24
Figura 2-4. Regulador de carga	25
Figura 2-5. Tipos de baterías.....	28
Figura 3-1. Configuración en paralelo de paneles FV	41
Figura 3-2. Configuración de conexión de baterías	42
Figura 3-3. Panel modelo SY-M500W-96P	44
Figura 3-4. Baterías LiFePO4 24V200Ah	45
Figura 3-5. Regulador de carga MPPT Solar.....	46
Figura 3-6. Inversor BELTT de 5.000 W	47
Figura 3-7. Pantallazo FV Autónomo	49
Figura 3-8. Datos del sistema FV diseñado	50
Figura 3-9. Ejecución visualizar resultados.....	51
Figura 3-10. Producción estimada para un sistema FV autónomo.....	53
Figura 3-11. Rendimiento de la batería para un sistema FV autónomo	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas Smart Series.....	27
Tabla 2. Características de diferentes tipos de baterías	28
Tabla 3. Especificaciones técnicas de Inversor	30
Tabla 4. Cálculo de la demanda de consumo en AC	33
Tabla 5. Cálculo de la demanda de consumo en DC	34
Tabla 6. Irradiación global horizontal e irradiación global con ángulo seleccionado	36
Tabla 7. Cálculo de la demanda total (AC y DC).....	38
Tabla 8. Potencia instantánea total.....	43
Tabla 9. Especificaciones batería LFP24200.....	45
Tabla 10. Costos de la implementación del sistema FV.....	47
Tabla 11. Resumen técnico y financiero sistema fotovoltaico	48
Tabla 12. Resumen de la simulación del sistema FV.....	52
Tabla 13. Rendimiento medio mensual del sistema FV	53
Tabla 14. Probabilidad del estado de carga de la batería al final del día	56

Introducción

El acceso a la energía eléctrica es un factor importante en el desarrollo de la humanidad [1]. Hoy en día es un recurso imprescindible para el funcionamiento de los sectores industrial, comercial, residencial, agropecuarios, entre otros. A pesar de ello y de los esfuerzos que se realizan, Colombia presenta baja cobertura en el sistema eléctrico de muchas zonas rurales. Según [2], entre las dificultades que encuentra la electrificación total está el difícil acceso a estas zonas rurales no interconectadas, así como la dispersión de sus habitantes, y el coste que esto representa.

En este sentido, el gobierno nacional ha expedido una serie de normativas como el Decreto 884 de 2017 del Ministerio de Minas y Energía, orientado a la implementación del Plan Nacional de Electrificación Rural, a través del cual se establecen los criterios para la adopción cada 2 años del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER), tanto para las Zonas No Interconectadas (ZNI) como para el Sistema Interconectado Nacional (SIN), así como su articulación con los Fondos Eléctricos [3]. Para este reto del país, las energías renovables se plantean como una solución más que interesante, el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas) trabaja con proyectos que suelen incluir paneles solares en áreas rurales [2]. El uso de paneles solares fotovoltaicos surge como una posible solución para suplir la demanda energética y disminuir los problemas causados por la generación eléctrica actual o en su defecto, por la ausencia total de generación. De esta manera, permitiría el acceso a la energía de manera equitativa a la población más apartada.

En el Plan Energético Nacional 2020-2050 (PEN) de Colombia se plantea como objetivo diversificar la matriz energética, buscando minimizar el riesgo de desabastecimiento mediante el uso de recursos locales, de nuevos energéticos y de tecnologías que complementen la matriz actual y el acceso a los flujos de comercio internacional [4]. Así mismo, el Ministerio de Minas y Energía y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) a través de la Ley 1715 de 2014 promueve el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas y en otros usos energéticos como medio

necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético [5]. Los beneficios tributarios generados de esta Ley, han contribuido en el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en este tipo de energía, que convierten al país en un referente de desarrollo de energías renovables [6].

Actualmente la energía fotovoltaica es una de las tecnologías de energía renovable de más rápido crecimiento empleadas en la generación de electricidad. A nivel país, se ha venido incrementando el número de proyectos de generación eléctrica renovables que involucran la generación eléctrica fotovoltaica y la energía eólica. En el 2018 ya se contaba con una potencia instalada que no superaba los 30 MW en energías renovables no convencionales. A finales del 2020 esta capacidad se aumentó a 250 MW, y se espera que a finales del 2021 se cierre con unos 500 MW, (37 proyectos, 36 de energía fotovoltaica y uno de eólica) con lo que se triplicará la potencia instalada [7].

También es innumerable la cantidad de proyectos de sistemas de generación fotovoltaicos aislados implementados a lo largo del territorio nacional, principalmente en viviendas y zonas rurales, como el proyecto de Salamanca-Ávila, S. (2017), en el que se propone el diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica, aplicado a una vivienda en la ciudad de Bogotá. En esta propuesta se realizaron los cálculos para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, demostrando su viabilidad técnica de implementar dicho sistema. En los cálculos se tuvo en cuenta los datos de la radiación de la ciudad, las horas pico de sol y el tiempo de autonomía del Sistema. También se realizó una estimación de costos [8].

Capítulo 1 - Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Problema

El sector de la energía desempeña un rol estratégico para alcanzar un mayor desarrollo económico a través de su doble función: como insumo para los procesos productivos y como bien de servicio público que brinda mayor bienestar a la población (UPME, 2020). Al ser un motor de equidad social y de gran aporte para el crecimiento económico. Aproximadamente, el 78 % de la energía consumida en el país proviene de fuentes fósiles, mientras que el 22% restante proviene de fuentes renovables. La disponibilidad local de FNCER aún no aprovechadas, sumada a la progresiva reducción en los costos asociados a su uso y la evolución de las tecnologías relacionadas, hacen que la integración de estas fuentes a la canasta energética nacional cobre relevancia a raíz de sus potenciales beneficios.

Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes renovables en nuestro país, y la abundancia relativa de una o varias de estas fuentes en algunas regiones favorecidas, las fuentes de energía renovables representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos años.

La energía es fundamental para que Colombia avance en materia de productividad y competitividad a partir de acciones encaminadas a lograr una mayor confiabilidad, cobertura y calidad en la prestación del servicio [9]. Sin embargo, uno de los principales problemas para muchas zonas rurales del país es la falta de cobertura del Sistema de Interconexión Nacional (SIN). En cuanto a la baja cobertura de electrificación en zonas rurales del departamento de Bolívar, el Plan Desarrollo Bolívar 2020 -2023, menciona que:

El departamento de Bolívar presenta bajos niveles de cobertura de servicio de energía eléctrica en las zonas rurales, situación que afecta la calidad de vida de los habitantes y la competitividad del territorio. En esta zona, se encuentran ubicados los corregimientos y veredas que presentan mayor déficit en cobertura eléctrica. Su economía está basada en actividades agrícolas, mineras, ganaderas las cuales se realizan sin ninguna aplicación técnica debido a que carecen del servicio de energía

eléctrica, siendo esto una gran limitante para el desarrollo socioeconómico de la comunidad. El mismo documento afirma que “el servicio en muchos municipios es deficiente lo que genera problemas económicos, y sociales, lo que se ve reflejados en una baja productividad y competitividad, situación que afecta la calidad de vida de los habitantes y la competitividad del territorio” [10].

De todo lo anterior, surge la necesidad de diseñar una fuente de energía que aproveche las condiciones geográficas, considerando que, las tecnologías que hoy en día permiten obtener energía final en forma de electricidad, calor y combustibles a partir de las fuentes de energía renovables son variadas, pero pocas de esas son las que en los últimos 15 a 40 años han evolucionado y madurado para convertirse en las más difundidas, desarrolladas y conocidas a nivel mundial. Colombia, por la composición de su industria y su economía, no se caracteriza por ser un desarrollador de tecnologías en el área de las energías. Sin embargo, en los últimos 30 años ha logrado acopiar cierta experiencia en lo que a las tecnologías solar fotovoltaica se refiere.

1.2. Planteamiento del problema

La energía eléctrica es fundamental, no solamente, en muchos procesos productivos del campo, como en la agricultura y ganadería, sino en el bienestar de la comunidad, quienes presentan altos índices de necesidades básicas insatisfechas. La energía solar representa la segunda fuente renovable de mayor uso en el mundo, seguido de la energía eólica, con una producción de cerca del 0,85% del 1% de la demanda mundial. La irradiación solar promedio en Colombia de acuerdo a datos del IDEAM es de 4,5 kWh/m²/d, la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m² /d.

Z	
Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país	
Región	Promedio irradiación 5 kWh/m ² /d
Guajira	6.0
Costa Atlántica	5.0
Orinoquía	4.5
Amazonía	4.2
Región Andina	4.5
Costa pacífica	3.5

Considerando que, el presente proyecto de grado se desarrolla en una de las zonas del país con mayor promedio de irradiación, tal es el caso de la Finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco, Departamento de Bolívar, en estas zonas rurales no hay cobertura del Sistema de Interconexión Nacional y se requiere de la energía eléctrica para el desarrollo productivo de actividades de agricultura y ganadería, el acceso a agua potable a partir de pozos profundos, iluminación, refrigeración y conservación de alimentos, televisión, telecomunicaciones, entre otros.

Actualmente, la única alternativa con que cuenta la finca para suplir sus necesidades energéticas es mediante el uso de moto-generador de combustión interna en ciertas horas del día. Uno de los principales problemas del uso de motores de combustión interna es el alto costo de los combustibles, lo que afecta económicamente al propietario. Tampoco se cuenta con un sistema seguro y confiable de suministro de combustibles, lo que lo hace un

sistema poco confiable, de baja disponibilidad y de cierta manera, moderadamente riesgoso en cuanto al transporte del combustible sin las medidas de seguridad establecidas. Esto sin contar que estos motores generan cantidades considerables de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, con el consumo de combustibles fósiles, contribuye al cambio climático.



Fuente: Google Maps. Casa Finca Torres Solar.

Las zonas del país que no cuentan actualmente con el servicio de energía están alejadas geográficamente del SIN (Sistema de Interconexión Nacional), son más costosas de atender y muestran altos niveles de necesidades básicas insatisfechas. De acuerdo con el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC) (UPME, 2020), alcanzar una cobertura universal del servicio de energía requerirá inversiones cercanas a los COP 7,4 billones. Entre las alternativas de expansión se consideran, además de la interconexión al SIN, la generación aislada con solución individual solar fotovoltaica y soluciones aisladas híbridas para microrredes. Para este reto del país, las energías renovables se plantean como una solución más que interesante, el IPSE (Instituto de

Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas) trabaja con proyectos que suelen incluir paneles solares en áreas rurales [5].

Por todo lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar un sistema de generación de energía fotovoltaica para suplir las necesidades energéticas en la finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco, departamento de Bolívar, y contribuir con el desarrollo socioeconómico, el medio ambiente y el bienestar de sus habitantes?

1.3. Justificación

En Colombia, desde hace varias décadas, se cuenta con cierto despliegue de colectores solares para el calentamiento de agua en viviendas, hoteles y hospitales. Sin embargo, los costos asociados a la compra e instalación de estos sistemas, sumado al hecho de que siempre requieren de un sistema de almacenamiento y un sistema de respaldo, hacen que los costos de alternativas como el gas natural sigan en la mayoría de los casos resultando ser la solución más económica para el aprovisionamiento de agua caliente. No obstante, en casos como el de instalaciones que utilizan GLP a costos mayores que el gas natural domiciliario utilizado en las principales ciudades de Colombia, este tipo de sistemas puede representar ahorros que hacen atractiva su implementación, lo mismo que en algunas ciudades y zonas que se caracterizan por contar con muy buenos niveles de irradiación solar como puede ser el caso de la Costa Caribe.

Un factor importante a ser analizado aún y a tener muy presente al momento de evaluar la conveniencia de impulsar en mayor medida la utilización de este tipo de sistemas a nivel nacional radica en los estándares técnicos de rendimiento y de calidad con que es necesario que cumplan los colectores, que dados sus principios básicos de funcionamiento hoy en día son fabricados por diferentes firmas a nivel nacional, pudiendo en casos representar productos confiables que han de ofrecer un buen rendimiento, pero en muchos otros pudiendo tratarse de productos cuyo desempeño no puede ser contrastado contra una ficha técnica debidamente elaborada y respaldada en pruebas que permitan determinar de manera certera la conveniencia o inconveniencia de

Un sistema de generación eléctrica a partir de energía fotovoltaica, ya sea en reemplazo de motores de combustión interna o no, sin duda traerá beneficios en los siguientes aspectos:

En el aspecto medio ambiental se hace uso y aprovechamiento de una fuente de energía limpia. Los recursos naturales en zonas aisladas, representan una alternativa que cumple con estas condiciones, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al uso eficiente de recursos naturales [11].

En lo relacionado con la salud, la contaminación del aire se ha convertido en un problema de importancia crítica en muchos países en desarrollo, donde hasta 2.900 millones de personas todavía dependen de la madera, el carbón y el carbón vegetal para cocinar y calentar sus hogares, [7], como actualmente sucede en muchas áreas rurales del país. En este sentido, las opciones más limpias, como las tecnologías solares, producen poca o ninguna contaminación del aire.

Por otra parte, de acuerdo con el mapa de radiación solar del IDEAM, la región presenta un gran potencial energético derivado del aprovechamiento de la radiación solar [12], siendo ésta inagotable, sostenible y altamente disponible en el área de aplicación, lo cual la hace conveniente tanto para la economía, la sociedad y la naturaleza. De esta manera, se puede contar con un servicio constante y confiable, brindando a los habitantes el servicio de energía eléctrica a un costo asequible.

En el aspecto económico, el acceso al servicio de energía mediante el aprovechamiento de la energía solar traerá consigo a la finca "Torre Solar" progreso económico, mayor productividad, mejoramiento del servicio de agua potable y bienestar a sus habitantes. Así mismo, este proyecto de diseño puede replicarse en las fincas vecinas generando beneficios comunitarios, dado que la mayoría de las fincas que componen el municipio de Turbaco son pequeños productores agrícolas y ganaderos, por lo tanto, este proyecto puede servir como una opción de mejora en su calidad de vida.

Además, se puede mencionar que los costos de las tecnologías asociadas están bajando de manera rápida y las políticas gubernamentales de incentivos han hecho que este tipo de solución de generación de electricidad de manera independientes sea viable para quienes no tienen acceso en áreas rurales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de generación de energía fotovoltaica para suplir las necesidades energéticas en la finca “Torre Solar”, ubicada en zona rural del municipio de Turbaco, departamento de Bolívar.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Establecer los requerimientos energéticos diarios y mensuales y el perfil de carga de la Finca Torre Solar.
2. Evaluar el aporte de energía solar del lugar a partir del análisis de información en bases de datos especializadas en irradiación solar y condiciones meteorológicas.
3. Dimensionar el sistema de generación de energía fotovoltaica adecuado a las necesidades establecidas para la finca “Torre Solar”.
4. Realizar una selección técnica de los componentes principales del sistema de generación de energía fotovoltaica y una evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto.
5. Determinar a partir de simulación con software la capacidad de generación solar fotovoltaica que proporcionará el sistema diseñado.

1.5. Metodología

La metodología que se desarrolló se basó en el cumplimiento de los objetivos propuestos, siguiendo las fases del diseño ingenieril de sistemas electromecánicos. Los pasos lógicos efectuados para la obtención de resultados fueron los siguientes:

1. Establecimiento de los requerimientos de consumo energético de la Finca. Se hizo el inventario de todos los equipos y dispositivos a alimentar, teniendo en cuenta la potencia instantánea consumida, tipo de alimentación (ac o dc), las horas de uso y su perfil de demanda. Los datos fueron tomados de las placas de especificaciones que trae el equipo. Se determinaron la potencia total requerida diaria y mensual, lo cual se empleó para el dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica.
2. Evaluación del aporte de energía solar del lugar. Para ello, se consultaron las bases de datos PVGIS e IDEAM y se obtuvieron datos de producción de energía solar fotovoltaica en el lugar de instalación. Además de la irradiación total, se obtuvieron datos de las horas pico de sol (HSP) y se determinó el ángulo de inclinación de los paneles FV para un mejor aprovechamiento del recurso solar.
3. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica. En este paso se calcularon el número de paneles a partir de un valor comercial de potencia de panel y de los requerimientos energéticos y aportación de energía solar del lugar. De la misma manera, se calculó la capacidad requeridas de las baterías, el regulador de carga e Inversor.
4. Selección técnica de los componentes principales del sistema de generación de energía fotovoltaica. En este paso fueron seleccionadas las tecnologías, marcas y modelos disponibles en el mercado nacional, teniendo en cuenta, la relación costo/beneficio. Así mismo, se realizó una evaluación de los costos asociados a la implementación del proyecto, permitiendo al usuario (propietario de la finca) conocer las ventajas y desventajas de instalar el sistema de generación eléctrica fotovoltaica en el lugar determinado.
5. Finalmente, se realizó una simulación del sistema de generación solar fotovoltaica diseñado con el software PVGIS, en donde se muestra la capacidad energética que proporciona el sistema diseñado.

2. Capítulo 2 - Marco Referencial

2.1 Marco teórico

Dentro de los conceptos importantes para considerar en el desarrollo de este trabajo se tiene: sistema de iluminación, diseño de un sistema de iluminación, deslumbramiento, lámparas y luminarias, el color, sistema de alumbrado. La generación de electricidad con energía solar empleando sistemas fotovoltaicos ha estado siempre dirigida al sector rural, en donde los altos costos de generación originados principalmente en el precio de los combustibles, y los costos de Operación y Mantenimiento en las distantes zonas remotas, hacen que la generación solar resulte más económica en el largo plazo y confiable.

2.1.1. Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida. La energía renovable ha tomado una gran fuerza a nivel mundial gracias a los objetivos de desarrollo sostenible proyectados por la ONU específicamente el número 7 el cual pone como meta la energía asequible y no contaminante para el bien del planeta y la humanidad.

De acuerdo con La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en 2020, la capacidad de generación renovable se expandió mucho más que en los últimos años, muy por encima de la tendencia a largo plazo. A finales de 2020, la capacidad de generación renovable aumentó en 260 GW (+ 10,3%). La energía solar continuó liderando la expansión de capacidad, con un aumento de 127 GW (+ 22%), seguida de cerca por la energía eólica con 111 GW (+18%). La energía solar y eólica continúa dominando la expansión de la capacidad renovable, representando conjuntamente el 91% de todas las adiciones renovables netas [13].

2.1.2. Energía Solar

La energía solar puede ser la mejor opción para el futuro de la humanidad porque es el recurso más abundante de energía renovable. El sol emite cerca de 3.8×10^{23} kW, de los

cuales aproximadamente 1.8×10^{14} kW son interceptados por nuestro planeta [14]. Entre las fuentes de energías renovables, la energía solar es la más importante, debido a su abundancia y sostenibilidad. Independientemente de la intermitencia de la luz solar, la energía solar está ampliamente disponible y completamente libre de costo [15].

2.1.2.1 Irradiación solar

El Sol es la fuente primordial de energía del planeta, la temperatura y presión en el interior del Sol da comienzo a reacciones nucleares que despiden grandes importes de energía que alcanzan el planeta en forma de radiación directa o difusa reflejada en los polvos de la atmósfera, en las nubes y demás sustancias en el ambiente [16]. La irradiación se mide en unidades de energía la que se define como kilowatts hora por metro cuadrado (W/m^2).

En términos usuales sólo el 47% de la radiación incidente sobre la atmósfera terrestre llega a la superficie del planeta. El 31% lo consigue directamente y el otro 16% posteriormente de ser disipada por polvo en suspensión, vapor de agua y elementos del aire. La energía sobrante, un 53%, es irradiada hacia el espacio exterior o absorbida en la atmósfera [17].

2.1.2.1.1 Radiación directa

Esta radiación hace referencia a los rayos de luz que inciden sobre la superficie de la tierra de forma directa desde el sol, sin ningún tipo de reflexiones o alteraciones.

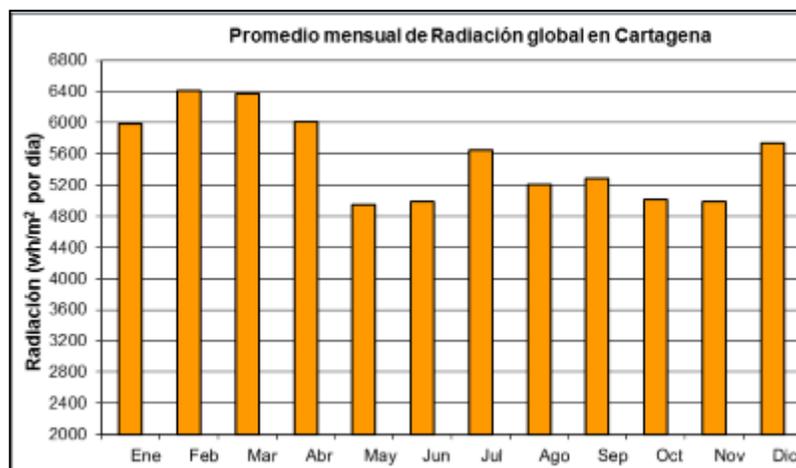
2.1.2.1.2. Radiación difusa

Es aquella tomada de la atmósfera como resultado del esparcimiento. Esta se forma cuando los rayos solares, son obstruidos o reflejados por cualquier partícula que se localiza suspendida en la atmósfera, y es difundida en todas las orientaciones; esta oleada de energía es la que especialmente incide sobre planos horizontales.

Debido a la forma elíptica de la órbita de la tierra y su movimiento de rotación, la radiación varía según la posición de la tierra por lo que Colombia al estar ubicada en una latitud ecuatorial recibe una radiación constante durante todo el año. De acuerdo con la figura 2-1 se puede observar que el área alrededor de Cartagena tiene un promedio mensual de radiación global que oscila entre 4,95 y 5,27 $kW/m^2/día$. Esta condición es favorable para el desarrollo de proyectos de generación de energía fotovoltaica, por lo que

los sistemas de generación fotovoltaica tendrían una mayor eficiencia, mayor producción energética y menores costos de implementación.

Figura 2-1. Promedio mensual de radiación global en Cartagena



Fuente: (IDEAM, 2014) [12]

2.1.2.2. Angulo de incidencia de la radiación solar directa

La cantidad de energía solar que es convertida en electricidad por el panel solar fotovoltaico está íntimamente relacionada, directamente con la forma misma del panel y el ángulo con el que chocan los rayos de luz sobre este. Cuando se tiene amplios ángulos de incidencia con relación a la normal del panel ($>6^\circ$) origina que los rayos sean irradiados por el panel en lugar de ser absorbido por este. En situaciones ambientales reales se puede calcular una energía media que procede de la radiación solar, es invariable y tiene un valor de $1367\text{W}/\text{m}^2$. Analizando el movimiento de rotación del planeta el ángulo de incidencia sobre la superficie del panel estático cambia en función del tiempo, consecuentemente, la energía recogida por ese siempre es menos que la radiación promedio.

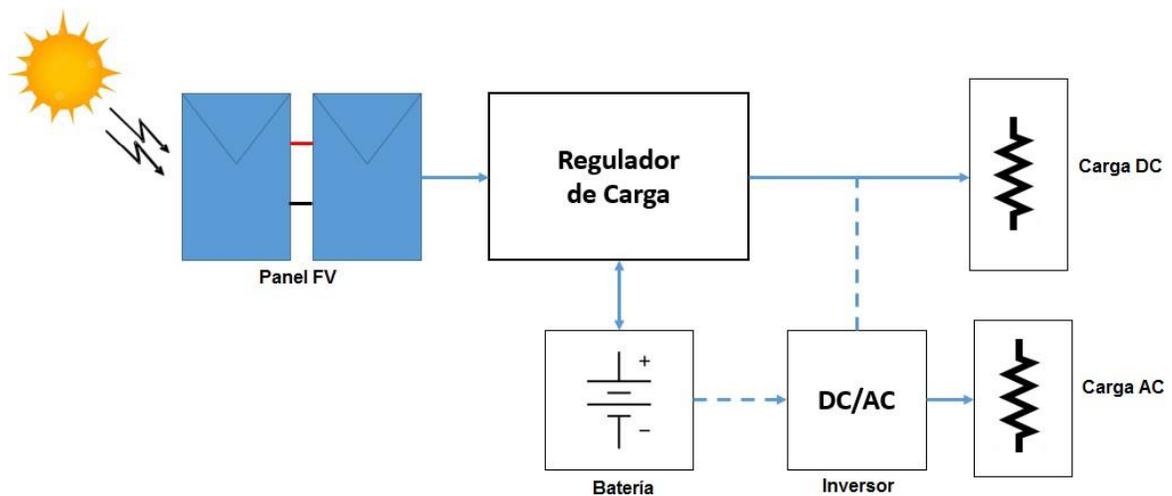
2.1.3. Energía solar fotovoltaica

Se denomina “energía solar fotovoltaica” a la energía eléctrica generada directamente en un dispositivo llamado célula solar, a partir de la radiación solar que incide sobre él. El

proceso de transformación de luz en electricidad, llamado “efecto fotovoltaico”, se produce gracias a las propiedades de los materiales semiconductores. En ellos se puede generar un determinado voltaje, dependiendo del material empleado, por interacción de la energía de las partículas de luz incidente con electrones de dicho material receptor [18].

En la figura 2-2 se muestra la configuración básica de una instalación fotovoltaica autónoma para electrificación, con los componentes principales: generador fotovoltaico, regulador o controlador de carga, sistema de almacenamiento de energía (baterías) e inversor de corriente.

Figura 2-2. Sistema de generación fotovoltaica



Fuente: Autoría propia.

2.1.4. Panel Fotovoltaico

Un panel solar es una asociación de celdas fotovoltaicas que son un dispositivo electrónico que convierte la energía luminosa, la luz, en energía eléctrica. Es decir, absorbe los fotones de la luz para liberar electrones que puede usar en una corriente eléctrica. Los paneles solares no son más que varias celdas trabajando de forma conjunta para generar un mayor potencial eléctrico [19]. Estas celdas o células fotovoltaicas están acopladas entre

sí eléctricamente, ya sea, en serie y/o paralelo, con el fin de originar la configuración necesaria de corriente y tensión según la aplicación a desarrollar.

Los sistemas de generación autónomos o aislados se encuentran en el rango de bajas potencias, no excediendo los 10 kWp, y son usados para el suministro de electricidad a viviendas, electrificación en zonas rurales, sistemas de bombeo, entre otras aplicaciones. Utilizan por lo general paneles de tecnología de silicio cristalino. Estos sistemas se por lo general se configuran para operar normalmente entre 12-48 V de tensión nominal, según la aplicación y dependiendo de la potencia.

2.1.4.1. Tipos de paneles solares

- **Silicio Mono cristalino** Son formadas primariamente de cristales puros de silicio por lo que son las más eficientes. No obstante, su costo es el más elevado.
- **Silicio Poli cristalino** Son construidas de silicio, pero con una estructura más aleatoria. Por tanto, son menos eficientes, pero más económicos en su fabricación.
- **Materiales Amorfos** Son construidas de silicio sin una estructura cristalina. Son muy económicos, pero poco eficientes.

2.1.4.2. Especificaciones de un panel fotovoltaico

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos incluyen en las hojas técnicas de características diferentes valores de muchos parámetros necesarios para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos. Entre los más importantes parámetros usados en el dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas se puede citar (ver figura 2-3):

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): es la corriente que circula entre los bornes del panel, cuando estos se cortocircuitan ($V=0$). Es la máxima intensidad que se puede obtener de un panel.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): es el voltaje que se obtiene entre los bornes del panel solar cuando estos se encuentran en circuito abierto ($I=0$) o no hay carga

conectada. Es la mayor tensión que se puede obtener de la placa cuando trabaja como generador.

- Tensión Nominal (V_N): es el valor de la tensión a la cual trabaja el panel.
- Corriente de Potencia Máxima (I_{mp}): es el valor de la corriente que puede suministrar el panel cuando trabaja a máxima potencia (P_m).
- Voltaje de Potencia Máxima (V_{MP}): es el valor de voltaje cuando la potencia también es máxima (P_{Max}) y el panel está suministrando la máxima intensidad de corriente.
- Potencia Máxima (P_{max}): es el máximo valor obtenido al multiplicar la intensidad I_{mp} (Intensidad en el punto de máxima potencia) y V_{mp} (Tensión en el punto de máxima potencia). También se le llama Potencia de Pico del panel (W_p).
- Eficiencia: relación entre la potencia eléctrica entregada por el panel solar y la potencia de la radiación que incide sobre él.

Figura 2-3. Especificaciones eléctricas de un panel solar



Electrical characteristics

<i>P_{max}, V_{oc}, I_{sc}, V_{mp} and I_{mp} at STC (1000W/m², 25°C, AM 1.5):</i>								
Maximum Power (P _{max})	225W	230W	235W	240W	245W	250W	255W	260W
Open Circuit Voltage (V _{oc})	36.8V	36.9V	37.0V	37.1V	37.2V	37.3V	37.4V	37.5V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.16A	8.31A	8.42A	8.52A	8.62A	8.72A	8.82A	8.91A
Maximum Power Voltage (V _{mp})	30.1V	30.2V	30.3V	30.3V	30.4V	30.5V	30.6V	30.7V
Maximum Power Current (I _{mp})	7.48A	7.62A	7.76A	7.92A	8.06A	8.20A	8.34A	8.48A
Module Efficiency (%)	13.8	14.1	14.4	14.7	15.0	15.3	15.6	15.9

Temperature Coefficients

Temperature Coefficients of P _{max}	-0.43 %/°C
Temperature Coefficients of V _{oc}	-0.33 %/°C
Temperature Coefficients of I _{sc}	+0.056 %/°C

Absolute Maximum Limits

Maximum System Voltage	1000V DC
Module Operating Temperature	-40°C to +85°C
NOCT	45°C±2°C

Fuente: (Tecnosolab.com, 2021) [20]

2.1.5. Regulador de carga

El regulador o controlador de carga (ver figura 2-4) tiene como función principal la protección de la batería, evitando que opere en estados de sobrecarga o sobredescarga excesiva, en los que los procesos de degradación se aceleran. En la carga de la batería garantiza una carga suficiente al acumulador y evita las situaciones de sobrecarga. En el proceso de descarga asegura el suministro eléctrico diario suficiente y evita la descarga excesiva de las baterías.

El Regulador de carga también realiza las siguientes funciones:

- Gestionar el consumo directo de las placas y las baterías.
- Cargar de manera óptima a la batería.
- Bloqueo de corriente inversa con lo que evita que la batería se descargue por las noches.
- Conectar y desconectar cargas según prioridades.
- Señalizar el estado de carga, flujo de carga de la batería a través del indicador respectivo.
- Informar sobre tensiones y corrientes de carga, descarga y dar alarmas.

Figura 2-4. Regulador de carga



Fuente: (Amazon.com, 2021) [21]

Dentro de la información técnica suministrada por los fabricantes de reguladores de carga, se pueden mencionar los siguientes parámetros básicos, que definen el rango de aplicación del equipo:

- Tensión nominal del regulador (V_{nom}): se refiere al nivel del voltaje de salida, el cual debe ser igual a la tensión nominal de la batería asociada, ya que el regulador recibe la alimentación de la propia batería. Como en esta, la tensión de trabajo del regulador varía en un cierto margen alrededor de dicho valor de referencia. En el mercado, existen reguladores que trabajan con tensión nominal a baja potencia, que van desde los 12 V hasta los 24 V. Para sistemas de potencias mayores se recurre a controladores de 48 V.
- Corriente máxima (I_{max}): es la corriente que puede circular por regulador de forma segura, tanto en la línea de generación como de consumo. Este valor debe considerarse siempre en la selección del equipo apropiado para un determinado sistema. Como regla general, la corriente máxima de diseño del regulador debe ser superior en un 25% a la máxima corriente del generador fotovoltaico asociado (corriente de cortocircuito), en condiciones de máxima radiación.

En la tabla 1 se muestran dos ejemplos de reguladores empleados en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos domésticos aislados.

Tabla 1. Especificaciones técnicas Smart Series

eSmart Series		eSmart-20A	eSmart-30A	
Product Category	Controller Properties	MPPT (Maximum Power Point Tracking)		
	MPPT Efficiency	≥99.5%		
	Standby Power	0.5W-1.2W		
	System Voltage	Auto-recognition		
	Heat-dissipation	Fan-cooling		
Input Charateristics	Max. PV Input Volt Point	DC150V		
	Start Charge Volt Point	Battery Voltage +3V		
	Low Input Volt Protection Point	Battery Voltage +2V		
	Over Voltage Protection Point			
	PV Rated Power	12V System	260W	390W
		24V System	520W	780W
		36V System	780W	1170W
48V System		1040W	1560W	

Fuente: (Solartex.co, 2021) [22]

2.1.6. Baterías solares

En las instalaciones fotovoltaicas autónomas, aisladas de la red eléctrica convencional, es necesario incorporar un sistema de almacenamiento de energía para garantizar el suministro eléctrico en periodos en los que la demanda de consumo supera a la generación, como en las horas nocturnas.

Las instalaciones destinadas a iluminación y alimentación de equipos eléctricos de consumo se incluyen, generalmente, baterías electroquímicos recargables. Existen diversas tecnologías de acumuladores electroquímicos recargables en el mercado. Sin embargo, los tipos de baterías más comúnmente utilizadas son las batería plomo-ácido (Pb-ácido), baterías de Ion-Litio (Li-ión) y baterías de Niquel Cadmio (Ni-Cd). Dentro de ellas se consiguen distintas tecnologías, tales como baterías solar de tipo monoblock, AGM, Gel y las baterías estacionarias. Cada una de ellas ofrece cierto nivel de calidad, lo cual va asociado también a su costo de fabricación. En este sentido, las baterías solar monoblock son las más económicas y simples del mercado, le siguen en su orden las baterías AGM, las baterías de Gel, en tanto que las estacionarias OPZS son las más costosas pero a su

vez son las que tienen una mayor vida útil y mejor desempeño. En la figura 2-5 se muestran ejemplos de algunas de estas baterías.

Figura 2-5. Tipos de baterías



Fuente: (Damia Solar, 2021) [23]

Las características específicas de las instalaciones fotovoltaicas aisladas requieren una importante capacidad de acumulación y al mismo tiempo deben operar con ciclados profundos de carga y descarga. En algunos casos, las baterías actúan más como suministradoras de energía que de potencia instantánea, al contrario que en las aplicaciones de arranque, donde se extrae mucha corriente pero poca energía [24]. En la Tabla 2 se muestran las características técnicas de las diferentes baterías estudiadas a modo de mejor ilustración de las mismas.

Tabla 2. Características de diferentes tipos de baterías

Tecnología	Potencia [MW]	Tiempo de descarga [ms-h]	Rangos de Eficiencia	Densidad de potencia [W/kg]	Densidad de energía [Wh/kg]	Durabilidad del almacenamiento	Vida útil (años)	Ciclos de vida
Plomo-ácido	>20	s-h	0.70-0.90	75-300	30-50	min-días	5-15	2000-4500
NaS	0.05-8	s-h	0.75-0.90	150-230	150-250	s-h	10-15	2500-4500
Ni-Cd	>40	s-h	0.60-0.73	50-1000	15-300	min-días	10-20	2000-2500
Li-ion	>0.01	m-h	0.85-0.95	50-2000	150-350	min-días	5-15	1500-4500
VRFB*	0.03-3	s-10h	0.65-0.85	166	10-35	h-meses	5-10	10,000-13,000
Zn-Br	0.05-2	s-10h	0.60-0.70	45	30-85	h-meses	5-10	5000-10,000

*VRFB: Vanadium Redox Flow Battery

Fuente: (B. Zakeri, S. Syri, 2015)

2.1.7. Inversor

Los generadores fotovoltaicos proporcionan potencia en continua. Cuando se requiere una línea de consumo para alimentar equipos en alterna, es necesario incluir un inversor DC/AC que realice la transformación. De esta manera, este dispositivo convierte la energía almacenada en las baterías o la que entregan los paneles FV en corriente alterna, para alimentar las cargas eléctricas o equipos electrónicos. Se utilizan en sistemas acoplados a CC para suministrar una carga de CA y en sistemas de CA a CC para facilitar el flujo de energía desde el bus de CC al bus de CA.

En el mercado existen diversos tipos de inversores para instalaciones aisladas en función del tipo de onda de salida. Actualmente se fabrican inversores de onda semicuadrada, (o onda sinusoidal modificada) y de onda sinusoidal pura. Los inversores de onda modificada son económicos y se emplean en el manejo de cargas resistivas, como sistemas de iluminación, calefactores resistivos, entre otros. Este tipo de inversores no se aconsejan para cargas inductivas, como motores, electrodomésticos, lámparas fluorescentes, equipos de música, monitores, entre otros. Por el contrario, los inversores onda sinusoidal pura son de mayor calidad, más costosos, más eficientes. Su funcionamiento se basa en la modulación de ancho de pulso, PWM, resultando un nivel de armónicos muy inferior, que se filtran. Las pérdidas por conmutación de esta modulación por pulsos deben controlarse mediante el uso de transistores MOSFET o IGBT de bajas pérdidas [24]. Pueden manejar cargas inductivas de forma segura y suministrar los elevados picos de arranque que los motores requieren. De la misma manera, deben operar cargas inductivas, con factor de potencia bajos.

Los inversores cumplen con las siguientes funciones [26]:

- Operar en un amplio rango de tensión DC de entrada.
- Poseer autoprotecciones y seguridad al usuario.
- Regular la tensión y la frecuencia de salida.
- Proporcionar potencia AC a las cargas eléctricas con buena calidad de suministro.

- Operar un amplio rango de condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.
- Poseer interfaces con otros controles de sistemas.
- Satisfacer las necesidades de seguridad exigidas por la carga.

Las especificaciones técnicas suministradas comúnmente por los fabricantes se resumen en la siguiente tabla, con valores de equipos del mercado tomados como ejemplo.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de Inversor

N ° de Modelo.	SUN2000 -5KTL-L1	Datos de salida (CA)	
Datos de entrada (DC)		Max. Alimentación de CA	5,5 kW
Max. Energía DC	7,5 kW	Max. Corriente alterna	25 A
Max. Voltaje DC	600 V	Frecuencia	50, 60 Hz
Voltaje DC clasificado	360 V	Factor de potencia (cosθ)	0,8
Min. Voltaje CC para iniciar la alimentación	100 V	Distorsión (THD)	<3%
Max. Corriente DC	25 A	No de fases de alimentación	1
Rango de voltaje MPP (T)	90 ~ 560 V	Max. Eficiencia	98,4%
No de rastreadores MPP	2	Eficiencia euro	97,8%
Entradas DC	2	Información General	
Clase de protección	IP65	Dimensiones (Al / An / Pr)	365x365x156 milímetro
Humedad	0-100%	Peso	12 kilogramos
		Temperatura de funcionamiento	-25 ~ +60 °C

Fuente: (Solartex, 2021) [27]

3. Capítulo 3 - Diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica

El objetivo de este capítulo es, en primer lugar, estimar el consumo energético requerido en el lugar de la instalación. En segunda medida se evalúa el aporte de la energía solar, las horas pico de sol (HSP) y el ángulo de inclinación de los paneles FV. En tercera medida, se determina el tamaño que debe tener el generador fotovoltaico para producir la energía necesaria, se estima la capacidad de almacenamiento que permita disponer de energía suficiente, se calculan los valores operativos básicos de controlador de carga e inversor. En cuarta medida, se realiza la selección de los equipos disponibles en el mercado. Finalmente se simula el diseño efectuado para observar su desempeño.

3.1. Definición de los requerimientos energéticos de la finca “Torre Solar”

Esta sección tiene como propósito establecer los requerimientos energéticos diarios y mensuales y el perfil de carga de la Finca Torre Solar. Por ello, se presentan los resultados relacionados con los cálculos de los consumos energéticos requeridos en el lugar de la instalación.

3.1.1. Cálculo de los requerimientos de cargas eléctricas.

El primer paso por desarrollar es la cuantificación de los consumos energéticos requeridos, tanto por cargas AC como DC. Para ello, se realiza un listado con el equipamiento eléctrico de consumo, su potencia y las horas diarias de uso previstas. De esta forma, se determina la energía diaria a satisfacer (E_T) expresada en Wh/día, la potencia instantánea máxima de la instalación con todos los aparatos eléctricos conectados (E_{MAX}).

A continuación, se tomaron en cuenta los días de autonomía (1 día) y las horas de operación de cada equipo. Los requerimientos energéticos tanto AC como DC se muestran en la tabla 4 y 5.

El consumo diario de energía se calcula haciendo el producto entre la potencia consumida por cada equipo y el tiempo de uso (ver ecuación 1):

$$C_E = P * t \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde,

C_E : Consumo Energético en Whd

P: Potencia unitaria en W

t: Tiempo de uso diario en h

El consumo energético total de las cargas AC (E_{caT}) se calcula teniendo en cuenta las pérdidas que introducen el uso del regulador de carga (η_{reg}) y del inversor (η_{inv}); la demanda energética diaria resultante se obtiene a partir de la ecuación 2:

$$E_{caT} = E_{ca} / (\eta_{inv} \times \eta_{reg}) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$E_{caT} = 4.600,5 \text{Whd} / (0.95 \times 0.97) = 4.992,4 \text{ Wh/d}$$

$$E_{caT} = 4.992,4 \text{ Wh/d}$$

Dónde,

E_{caT} : demanda energética diaria

η_{inv} : rendimiento del inversor (se toma un $\eta_{inv} = 95\%$)

η_{reg} : rendimiento del regulador de carga (se toma un $\eta_{reg} = 97\%$)

Tabla 4. Cálculo de la demanda de consumo en AC.

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA Pca (W)	Factor de simultaneidad	TIEMPO DE OPERACIÓN (horas/Día)	CONSUMO DE DIARIO DE ENERGÍA Eca (Wh/DIA)
Electrobomba 1 HP	1	1437	1	2	2874
Televisor	1	60	0,5	8	240
Ventilador	2	40	0,6	10	480
Radio	1	10	0,6	10	60
WiFi	1	40	0,75	24	720
Cargador Teléfonos	2	5	0,6	4	24
Computador	1	45	0,75	6	202,5
					0
Consumo Total Alterna Eca (Wh/día)					4600,5
Rendimiento del Inversor η_{inv} (tanto por uno)					0,95
Rendimiento del Regulador η_{reg} (tanto por uno)					0,97
Consumo total alterna $E_{ca}/\eta_{inv} \eta_{reg}$ (Wh/día)					4992,40

Fuente: Autoría propia.

El consumo energético total de las cargas DC se hace teniendo en cuenta las pérdidas que introducen el uso de un regulador de carga (η_{reg}). Por tanto, la demanda energética diaria resultante se obtiene a partir de la ecuación 3:

$$E_{cdT} = E_{cd} / \eta_{reg} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$E_{cdT} = 360 \text{ Whd} / 0.97 = 371,3 \text{ Wh/d}$$

$$E_{cdT} = 371,13 \text{ Wh/d}$$

Donde,

Dónde,

E_{cdT} : demanda energética diaria total en continua.

E_{cd} : demanda energética diaria en continua. η_{reg} :

rendimiento del regulador de carga ($\eta_{reg} = 97\%$)

Tabla 5. Cálculo de la demanda de consumo en DC.

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA Pca (W)	Factor de simultaneidad (Cs)	TIEMPO DE OPERACIÓN (horas/Día)	CONSUMO DE DIARIO DE ENERGÍA Eca (Wh/DIA)
Lámparas	8	10	0,75	6	360
Consumo Total Continua Ecd (Wh/día)					360
Rendimiento del Regulador n_{reg} (tanto por uno)					0,97
Consumo total Continua $E_{cd}/n_{inv} n_{reg}$ (Wh/día)					371,13

Fuente: Elaborada por los autores

El coeficiente de simultaneidad (Cs), se refiere a la probabilidad de que todos los equipos estén encendidos a la vez. Por lo tanto, está en función del tipo y cantidad de consumo, ya que casi nunca funcionan todos los equipos a la vez. Para casos prácticos se considera que **Cs** puede estar comprendido entre **0.5 y 0.75**.

La demanda energética diaria a satisfacer (E_T) se obtiene mediante la ecuación 4:

$$E_T = E_{caT} + E_{cdT} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$E_T = 4.992,4 \text{ Wh/d} + 371,13 \text{ Wh/d} = 5363,53 \text{ Wh/d}$$

$$E_T = 5363,53 \text{ Wh/día}$$

3.2. Cálculo de la radiación solar recibida

Esta sección tiene como propósito evaluar el aporte de energía solar del lugar a partir del análisis de información en bases de datos especializadas en irradiación solar y condiciones meteorológicas.

Para el dimensionado de instalaciones fotovoltaicas se aplican diferentes métodos. Uno de los más sencillo, y a la vez el más práctico, es en el que se usan datos de radiación solar

del mes de baja radiación o el mes más desfavorable. Con estos datos se diseña la instalación para el mes más desfavorable, por lo que se requieren los valores medios mensuales de energía diaria incidente y consumida. A continuación se obtendrán valores históricos de radiación media del lugar de la instalación.

Los datos de irradiación solar del lugar de instalación se obtienen de bases de datos especializadas sobre irradiación solar incidente, como la base de datos que ofrece de manera gratuita en la web el Sistema de Información Geográfica para Instalaciones Fotovoltaicas (Photovoltaic Geographical Information System – PVGIS). La base de datos PVGIS proporciona acceso a la siguiente información [28]:

- Datos medios anuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal (kWh/m².día).
- Datos medios mensuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal (kWh/m².día).
- Datos medios diarios de radiación incidente sobre superficie horizontal (kWh/m².día).
- Datos medios horarios de radiación incidente sobre superficie horizontal (kWh/m²).
- Datos de horas de sol diarias (medias anuales, mensuales o valores diarios).

Esta información también se puede obtener del Atlas interactivo del IDEAM [12]. Allí se publica datos referentes a aspectos ambientales tales como radiación solar, radiación ultravioleta, brillo solar entre otros.

El primer paso para el cálculo del aporte solar en el sitio de instalación es determinar el ángulo de inclinación (β) del panel FV respecto a la horizontal, para un mayor aprovechamiento de la radiación incidente. En principio, si la orientación e inclinación de los paneles no está ya definida por las condiciones del lugar de instalación (techo, cubiertas), entonces se trabaja desde el inicio con los valores modificados a la posición de los paneles.

Este ángulo se calcula a partir de la latitud y longitud del lugar con ayuda del software Google Earth. En este caso, el sitio de instalación se encuentra ubicado en las siguientes

coordenadas geográficas: 10.388666811486228, -75.4151085409096. Este valor de la latitud se convierte a valores sobre superficie inclinada, en función del ángulo adecuado para el panel solar. El ángulo de inclinación (β) para el sitio seleccionado se calcula a partir de la ecuación 5:

$$\beta = \varphi \pm 10^\circ \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\beta = 10^\circ + 10^\circ \approx 20^\circ$$

Con el valor del ángulo de inclinación seleccionado ($\beta=20^\circ$) se realiza la consulta a PVGIS para determinar el menor valor de radiación mensual, el cual se tomará como el peor caso y el punto de inicio del dimensionamiento del campo generador fotovoltaico. Los datos obtenidos de PVGIS sobre irradiación horizontal global e irradiación global con un ángulo de inclinación dado ($\beta=20^\circ$), se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Irradiación global horizontal e irradiación global con ángulo seleccionado

Irradiación global horizontal		Global irradiation at user angle	
Mes	2015	Mes	2015
Enero	182.33	Enero	213.45
Febrero	179.91	Febrero	198.37
Marzo	208.98	Marzo	213.47
Abril	187.15	Abril	178.53
Mayo	175.4	Mayo	160.26
Junio	183.86	Junio	161.17
Julio	180.76	Julio	160.82
Agosto	188.17	Agosto	174.06
Septiembre	176.19	Septiembre	174.37
Octubre	171.88	Octubre	181.85
Noviembre	149.1	Noviembre	167.84
Diciembre	170.58	Diciembre	202.05

Fuente: PVGIS (2021) [28]

De la tabla 7 se extrae el dato de trabajo para el diseño. Como se puede observar, el valor medio de radiación diaria incidente del mes más desfavorable (menor valor de la irradiación horizontal global) para el sitio de instalación es de 149.1 kW/m² mes (noviembre) y de

160.26 Wh/m² mes (mayo) para superficie inclinada a 20°. La radiación captada por el panel FV mejora con los 20° de inclinación con respecto al valor de radiación en superficie horizontal. Este valor se tomará como referencia (peor caso) para calcular las horas pico de sol del lugar de la instalación.

La Radiación Media Diaria (R_{β}) se calcula tomando el dato del valor más bajo de irradiación global mensual de la tabla 7 y se divide por 30 días del mes y se calcula mediante la ecuación 6:

$$R_{\beta} = R_{GM}/t \quad \text{Ecuación 6}$$

$$R_{\beta} = 160.26 \text{ kWh/m}^2 / 30 \text{ días} = 5,342 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$$

$$\mathbf{R_{\beta} = 5,342 \text{ kWh/m}^2/\text{día}}$$

Para determinar el tiempo diario en el cual se puede aprovechar la radiación del sol, es necesario calcular las horas pico de sol. El cálculo de las horas sol pico (HSP) se obtiene dividiendo el promedio de radiación solar incidente entre la radiación solar necesaria para calibración en STC (1 kW/m²) [29]. Este valor corresponde a las horas que el sol debería iluminar con una fuerza 1000 W/m² para insolar un día (ver ecuación 7):

$$HSP = \frac{\text{Radiación Solar Tablas}}{1 \text{ kW/m}^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$HSP = \frac{5,342 \text{ kW/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} = \mathbf{5,3 \text{ horas}}$$

3.2. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica

Esta sección tiene como propósito el dimensionamiento del sistema de generación de energía fotovoltaica adecuado a las necesidades establecidas para la finca "Torre Solar".

La tabla 7 muestra el resumen del consumo eléctrico total requerido. A partir de estos datos se podrá establecer la cantidad y especificaciones de los paneles solares y de los demás dispositivos.

Tabla 7. Cálculo de la demanda total (AC y DC)

RESUMEN DE LAS CARGAS	CONSUMO DE ENERGÍA (Wh/DIA)
Cargas DC	371,13
Cargas AC	4992,4
Demanda Total (E_T)	5363,53

Fuente: de los autores

Este apartado presenta la definición de los requisitos técnicos que debe cumplir el diseño del sistema de generación fotovoltaica para satisfacer la carga demandada.

3.3.1. Cálculo del número de módulos FV:

En esta etapa se tiene en cuenta cuándo la radiación es menos favorable para así poder estimar la cantidad de paneles solares necesarios. En este caso se tomaron módulos de 500 W. La potencia requerida por el campo generador FV se obtiene a partir de la demanda total de energía requerida dividida por las horas pico de sol con el ángulo seleccionado (HSP β). Este cálculo se obtiene aplicando la ecuación 8:

$$P_{req} = \frac{E_T}{HSP\beta} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

P_{req} : potencia requerida por el campo generador fotovoltaico.

E_T : demanda total de energía.

$HSP\beta$: horas pico de sol.

Reemplazando, se obtiene:

$$P_{req} = \frac{5363,3 \text{ Wh/d}}{5,3 \text{ h}} = 1.011,98 \text{ W}$$

El valor de P_{req} corresponde a la potencia por hora que debe suministrar el generador fotovoltaico.

En el siguiente paso se calcula el número de paneles FV, teniendo en cuenta el valor de potencia (P_m) del panel. En este caso, se calculará con paneles de 500 W, que son los paneles de potencia alta disponibles en el mercado nacional. El número de paneles fotovoltaicos (N_p) requeridos se obtuvo aplicando la ecuación 9, en el que se divide la potencia requerida entre el producto de la potencia pico del panel FV (P_m) por el factor global de funcionamiento del panel solar (η)

$$N_{pan} = \frac{P_{req}}{\eta P_m} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

P_{req} : es el consumo medio diario mensual (5.363,53 Wh/d).

P_m : es la potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida STC ($P_m = 500 \text{ W}$).

η : factor global de funcionamiento del panel solar que varía entre 0.65 y 0.90. Es necesario tener en cuenta que la suciedad y el uso continuo deterioran y produce disminución en la eficiencia. En este caso se usó un valor de 0.80 por defecto.

Reemplazando los datos en la ecuación 9, se obtiene:

$$N_{pan} = \frac{1.011,98 \text{ W}}{(0.8)(500 \text{ W})} = 2,52$$

Este valor se aproxima al número entero por encima, en este caso, 3 paneles FV.

$$N_{pan} \approx 3 \text{ paneles}$$

A continuación se fija el voltaje de operación de la instalación (24 V) y se configuran las ramas de paneles en serie. Para calcular el número de ramas en series se divide el voltaje de operación del sistema fotovoltaico (V_{NOMG}) entre el voltaje nominal del panel FV seleccionado ($V_{NOMpanel}$) (ver ecuación 10)

$$N_s = \frac{V_{NOM,G}}{V_{NOM,panel}} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$N_s = \frac{24 \text{ V}}{54.32 \text{ V}} = 0,44 \approx 1 \text{ panel en serie}$$

El número de ramas en paralelo (N_p) debe ser tal que se alcance la potencia nominal estimada anteriormente. Para ello se divide el producto del voltaje de operación del sistema fotovoltaico (V_{NOMG}) por el número de paneles (N_{pan}) entre el número de ramas en serie (N_s) por voltaje nominal del panel FV seleccionado ($V_{NOMpanel}$) (ver ecuación 11):

$$N_p = \frac{V_{NOM,G}}{N_s V_{NOM,panel}} \times N_{pan} \quad \text{Ecuación 11}$$

Reemplazando se obtiene:

$$N_p = \frac{24 \text{ V}}{0,44 \times 54,32} \times 3 = 3 \text{ paneles en paralelo}$$

De esta forma, el generador fotovoltaico efectivamente configurado contará con tres (3) paneles FV conectados en paralelo. Aplicando la ecuación 12 se obtiene la potencia nominal ($P_{NOM,G}$) del arreglo, esto es:

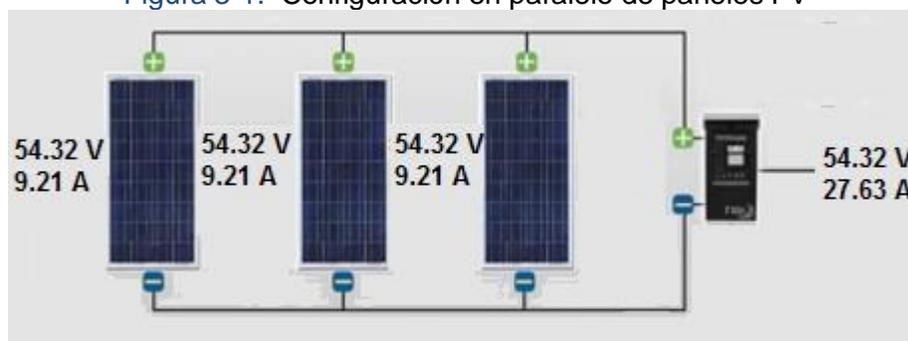
$$P_{NOM,G} = N_s \times N_p \times P_m \quad \text{Ecuación 12}$$

$$= 1 \times 3 \times 500 \text{ W} = 1500 \text{ W}$$

$$P_{NOM,G} = 1500 \text{ W}$$

El arreglo de las conexiones de los paneles FV se muestra en la figura 3-1. En este caso, se conectarán tres paneles en paralelo, trabajando a una tensión de 24 V y una corriente total de 27,63 A.

Figura 3-1. Configuración en paralelo de paneles FV



Fuente: Elaborado por los autores

3.3.2. Estimación de la capacidad de las baterías:

Para calcular la capacidad de acumulación de las baterías es necesario incorporar los datos de días de autonomía, voltaje de operación y profundidad de descarga máxima. La capacidad de la batería (C_b) se obtiene dividiendo el producto de la energía necesaria multiplicada por los días de autonomía entre el producto del voltaje de operación multiplicado por la profundidad de descarga (DOD), ver ecuación 13.

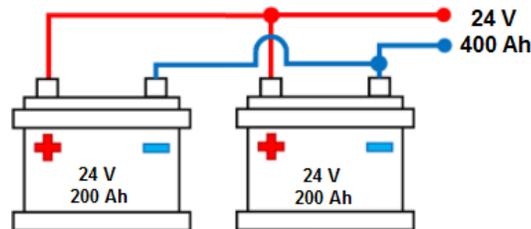
$$C_b = \frac{\text{Energía necesaria} * \text{Días de autonomía}}{\text{Voltaje} * \text{Profundidad de descarga de la batería}} \quad \text{Ecuación 13}$$

La profundidad de descarga varía entre 20% a 80%, dependiendo del tipo de batería que se seleccione para la instalación FV. En este caso, se escoge una batería con una profundidad de descarga del 60%:

$$C_b = \frac{5.363,53 \text{ Wh/d} * 1}{24 \text{ V} * 0,6} = 372,5 \text{ Ah}$$

De entre los modelos disponibles en el mercado, debe seleccionarse una batería o varias de capacidad similar a la estimada. El arreglo de las conexiones de las baterías se muestra en la figura 3-2. En este caso, se conectarán dos baterías en paralelo, trabajando a una tensión de 24 V y una corriente total de 400 Ah.

Figura 3-2. Configuración de conexión de baterías



Fuente: (de los autores modificada de Tierrasinsolitas.com, 2021) [30]

3.3.3. Elección del regulador carga:

El regulador de carga se selecciona de acuerdo al voltaje de operación, niveles de corriente a la entrada y a la salida. Para calcular la corriente de entrada al regulador (I_{input}) se toma como referencia la corriente de cortocircuito (I_{sc}) que generan los paneles FV. Se toma el valor de la corriente de un panel solar y se realiza el producto por el número de ramas en paralelo (la corriente de cada rama en paralelo es aproximadamente la misma), de acuerdo a la configuración establecida para la conexión de los paneles FV; en este caso, tres ramas en paralelo y cada rama con tres paneles en serie. La corriente de entrada del regulador de carga se calcula con la ecuación 14:

$$I_{input} = N_p \times I_{sc} \times F_s \quad \text{Ecuación 14}$$

$$I_{input} = 3 \times 9,72 \text{ A} \times 1,25 = 36,45 \text{ A}$$

Donde,

I_{input} = Corriente de entrada del cargador.

N_p = Número de ramas en paralelo (3).

I_{sc} : Corriente de cortocircuito del panel MS650PM6-S6 (9,72 A).

Fs: es un factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador (25%).

3.3.4. Elección del Inversor:

Para calcular la potencia del inversor CC/AC se toma en cuenta la sumatoria de las potencias nominales instantánea, como se muestra en la tabla 8. Se toman los valores de potencia asumiendo que todos los equipos estén funcionando (coeficiente de simultaneidad = 0,75). El caso crítico corresponde a la electrobomba que genera un pico de corriente tres veces su corriente nominal. Los valores de potencia instantánea por equipo y total se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Potencia instantánea total

EQUIPO	Potencia Nominal (W)	Potencia instantánea (W)
Electrobomba 1 HP	1.437	4.311
Televisor	60	60
Ventilador	40	40
Radio	10	10
WiFi	40	40
Cargador Teléfonos	5	5
Computador	45	45
Potencia Instantánea Total (W)		4.511

Fuente: Elaborada por los autores

Cómo se observa, la potencia instantánea total es de 4.511 W, potencia que se genera durante los primeros 30 segundos después del arranque de los equipos. En este caso se selecciona un Inversor cuya potencia pico esté por encima del valor anterior, por lo que se selecciona un Inversor de 5.000 W de onda sinusoidal pura.

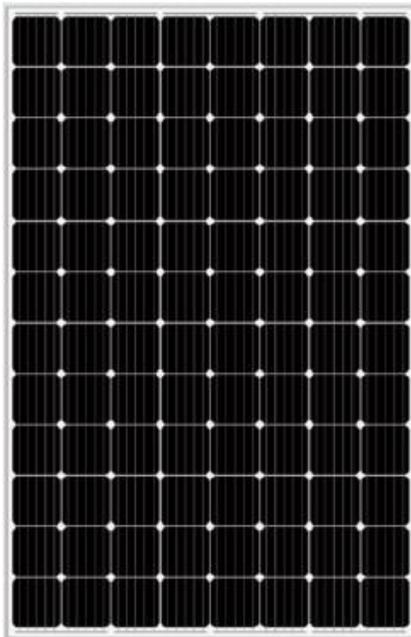
3.4. Selección técnica de los componentes del sistema FV

En esta sección se realiza la selección técnica de los componentes principales del sistema de generación de energía fotovoltaica y una evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto.

3.4.1. Selección del panel FV:

Teniendo en cuenta que en la sección anterior se tuvo como referencia paneles FV de 500 W para determinar el número de paneles FV a emplearse en el presente diseño, se procede a seleccionar un módulo FV que cumpla con este requisito. Es importante recalcar que en el mercado hay abundante oferta de módulos FV, de diferentes marcas y potencias. Para efectos del presente proyecto, se tuvo como referencia el panel FV modelo SY-M500W-96P. Éste es un módulo monocristalino de 500 W y 96 celdas, para sistemas de 24 V - 36 V. Este panel y sus especificaciones técnicas más importantes se muestran en la figura 3-3.

Figura 3-3. Panel modelo SY-M500W-96P



ELECTRICAL SPECIFICATIONS (NOCT)	
Model Type	SY-M500W-96P
Peak power	500w
Vmp	54.32V
Lmp	9.21A
Voc	66.27V
Lsc	9.72A

Fuente: (Alibaba, 2021) [31]

3.4.2. Selección de las baterías:

Para conformar el banco de almacenamiento se selecciona la batería del fabricante *Shenzhen Vikli Power Co., Ltd.*, modelo LFP24200. Es una batería de 24 V y 200 Ah de capacidad, de tecnología LFP. De esta manera, el banco quedará conformado por dos (2) baterías LFP24200 conectadas en paralelo, con lo que se obtendrán hasta 400 Ah de capacidad, operando a 24 V. El Paquetes de baterías LiFePO4 24V200Ah son ampliamente recomendadas para el almacenamiento de energía solar (ver figura 3-4). El precio del paquete oscila entre los US\$ 672 - US\$ 686 cada pieza. Las especificaciones de la batería LiFePO4 24V200Ah se muestran en la tabla 9.

Figura 3-4. Baterías LiFePO4 24V200Ah



Fuente: (Guardian Technology Development Co., Limited, 2021) [32]

Tabla 9. Especificaciones batería LFP24200

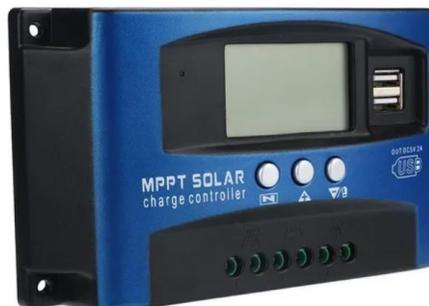
No. de Modelo	LFP24200
Hoja de Datos de la Batería	
Voltaje Nominal	24 V
Capacidad Nominal	200Ah@5hr
Corriente Máxima de Descarga	200 A
Corriente Máxima de Carga	100 A
Resistencia Interna	40 mΩ
Tiempo de Vida de Diseño	10 Años
Ciclos de Vida	4000@80%DOD

Fuente: (ENFsolar, 2021) [33]

3.4.3. Selección del Regulador de carga:

De la gama disponibles de reguladores de carga se selecciona un regulador de tecnología MPPT, de 50 A y tensión de operación de 12 V – 24 V (ver figura 3-5). Tiene un costo de \$250.000 pesos

Figura 3-5. Regulador de carga MPPT Solar



Fuente: (Mercadolibre, 2021) [34]

3.4.4. Selección del Inversor:

Cómo se observa, la potencia instantánea total es de 4.511 W. En este caso se selecciona un Inversor de 5.000 W de onda senoidal pura, marca BELTTT de 24 V (ver figura 3-6). El equipo tiene un costo en Mercadolibre de \$2.176.200.

Figura 3-6. Inversor BELTT de 5.000 W



Fuente: (Mercadolibre, 2021) [35]

3.4.5. Evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto:

Se realizan cotizaciones de empresas locales en la ciudad de Cartagena, Colombia a fin de conocer la mejor alternativa en temas económicos, las tres empresas evaluadas fueron:

- Solartex, Energía para Colombia.
- Solen, Paneles Solares Cartagena.
- Solats, Energía Solar Cartagena.

En la Tabla 10 se presenta el costo de la implementación del sistema FV, teniendo como referencia, los valores comerciales de los diferentes equipos para cada empresa cotizada. Faltan costos asociados a la mano de obra de los instaladores y de obra civil (si se requiere)

Tabla 10. Costos de la implementación del sistema FV.
Empresa Solartex.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1.1	Suministro e instalación de interruptor termomagnético 1x20A enchufable	UN	2	\$11.581	\$23.162

1.2	Suministro e instalación de panel de distribución de 1 Circuitos Monofásico.	UN	1	\$146.991	\$146.991,00
1.3	Paneles FV 500W	UN	3	\$932.400	\$2.797.200
1.4	Batería LiPO4 24V / 200 Ah	UN	2	\$2.750.000	\$5.500.000
1.5	Regulador de Carga MPPT 12 V/24V / 50 A	UN	1	\$250.000	\$250.000
1.6	Inversor BELTTT de 5.000 W Onda pura	UN	1	\$2.170.000	\$2.170.000
1.7	Estructura para montaje	UN	1	\$400.000	\$400.000,00
1.8	Conectores y accesorios	UN	1	\$250.000	\$250.000,00
1.9	Sub Total				\$11.390.509

*Tabla 10.1. Costos de la implementación del sistema FV.
Empresa Solen.*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1.1	Suministro e instalación de interruptor termomagnético 1x20A enchufable	UN	2	\$15.000	\$30.000
1.2	Suministro e instalación de panel de distribución de 1 Circuitos Monofásico.	UN	1	\$160.000	\$160.000
1.3	Paneles FV 500W	UN	3	\$850.000	\$2.550.000
1.4	Batería LiPO4 24V / 200 Ah	UN	2	\$2.620.000	\$5.240.000
1.5	Regulador de Carga MPPT 12 V/24V / 50 A	UN	1	\$270.000	\$270.000
1.6	Inversor BELTTT de 5.000 W Onda pura	UN	1	\$2.270.000	\$2.270.000
1.7	Estructura para montaje	UN	1	\$400.000	\$400.000,00
1.8	Conectores y accesorios	UN	1	\$250.000	\$250.000,00
1.7	Sub Total				\$11.170.000

Tabla 10.2. Costos de la implementación del sistema FV.
Empresa Solats.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1.1	Suministro e instalación de interruptor termomagnético 1x20A enchufable	UN	2	\$11.000	\$22.000
1.2	Suministro e instalación de panel de distribución de 1 Circuitos Monofásico.	UN	1	\$160.000	\$160.000
1.3	Paneles FV 500W	UN	3	\$870.000	\$2.610.000
1.4	Batería LiPO4 24V / 200 Ah	UN	2	\$2.720.000	\$5.440.000
1.5	Regulador de Carga MPPT 12 V/24V / 50 A	UN	1	\$220.000	\$240.000
1.6	Inversor BELTTT de 5.000 W Onda pura	UN	1	\$2.470.000	\$2.470.000
1.7	Estructura para montaje	UN	1	\$400.000	\$400.000,00
1.8	Conectores y accesorios	UN	1	\$250.000	\$250.000,00
1.7	Sub Total				\$11.448.000

Teniendo en cuenta las tres cotizaciones realizadas a empresas locales, se concluye que la mejor alternativa es la empresa SOLEN. Dando como resultado, una cotización financiera.

SUBTOTAL	\$11.170.000
ADMINISTRACIÓN	\$223.400
2%	
IMPREVISTO 1%	\$111.700
UTILIDAD 2%	\$223.400
IVA SOBREUTILIDAD	\$2.122.300
TOTAL A PAGAR	\$13.750.270

Fuente: Los autores

El proyecto requiere de una inversión inicial de \$13.750.270, de los cuales \$5.240.000 serán destinados para la compra de baterías LiPO4, esta será la mayor inversión seguido de los paneles FV que tienen un precio total de \$2.550.000 y del Inversor (\$2.270.000). Este valor aproximado de la implementación del sistema de generación FV tiene un precio accesible y es muy favorable comparado con el desarrollo socioeconómico y ambiental que generará a la finca “Torre Solar”.

En la Tabla 11 se presenta el resumen técnico y financiero del sistema fotovoltaico:

Tabla 11. Resumen técnico y financiero sistema fotovoltaico

USO DEL PROYECTO:	COMERCIAL
NECESIDAD DE GENERACION:	4992,40 Wh/día
No. PANELES:	3 x 500 Wp
No. BATERIAS:	2 x 24 V/200 Ah
No. REGULADOR DE CARGA	1 x 24 V/50 A
No. INVERSOR CC/AC	1 x 5 kW Onda pura
SISTEMA SOLAR:	Off Grid (Aislado de la red).
VALOR PROYECTO:	\$13.750.270

Fuente: los autores

Estimación el gasto económico del moto generador eléctrico, usado en la Casa Finca de 5,4 KW por día, y un estimado para estos de 0, 54 litros de gasolina KW/ hora .

Se necesitan mensualmente 24 litros de gasolina.

Gastos económicos	Subtotal	Total
24 galones de gasolina mensual	\$9.000	\$216.000
Costo anual		\$2.592.000

Lo cual condiciona que la rentabilidad de la inversión sería viable, y los frutos de esta serian

provechosos después de 5 años de instalación.

3.5. Simulación del rendimiento del sistema FV autónomo

En esta sección se determina, a partir de simulación con software PVGIS, el rendimiento y la capacidad de generación solar fotovoltaica que proporcionará el sistema diseñado. Se debe tener en cuenta que este software es un software libre que pertenece a la comunidad económica europea, disponible en línea, y cuyo propósito es brindar información para la implementación de sistemas de generación de energías alternativas, incluyendo a la energía fotovoltaica. Si bien, este software arroja valores aproximados, dado que se basa en datos históricos de las condiciones meteorológicas de una región, sirve para validar la generación energética estimada.

3.5.1. Simulación con el software PVGIS [28]:

El software PVGIS da la opción de evaluar el rendimiento de un sistema FV autónomo. Para ello se siguen los siguientes pasos:

Paso 1: ingreso a la página web (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#) y se selecciona la opción de “FV Autónomo”, como se muestra en la figura 3-7.

Figura 3-7. Pantallazo FV Autónomo

Cursor:
Seleccionado 10.389, -75.415
Elevación 44
(m):

Utilizar las sombras del terreno:

Horizonte calculado

Cargar archivo de horizonte
 Ningún archivo sel

CONECTADO A RED

FV CON SEGUIMIENTO

FV AUTÓNOMO

DATOS MENSUALES

DATOS DIARIOS

DATOS HORARIOS

TMY

RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FV AUTÓNOMO
?

Base de datos de radiación solar* PVGIS-NSRDB ▾

Potencia FV pico instalada [Wp] * 1500 ↓

Capacidad de la batería [Wh]* 9600 ↓

Limitador de descarga [%] * 60 ↓

Consumo diario [Wh] * 5363,53 ↓

Cargar los datos de consumo
 Ningún archivo

Inclinación [°] * 20 ↓

Azimut [°] * ↓

Fuente: (PVGIS, 2021)

Paso 2: Se introducen los valores que solicita el software. En este caso, potencia pico de FV instalada (Wp), capacidad de la batería (en Wh), Profundidad de descarga (60%), consumo diario (Wh), ángulo de inclinación de los paneles FV (20°). En la figura 3-8 se muestran los valores correspondientes al diseño realizado.

Figura 3-8. Datos del sistema FV diseñado

RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FV AUTÓNOMO

Base de datos de radiación solar* PVGIS-NSRDB

Potencia FV pico instalada [Wp] * 1500

Capacidad de la batería [Wh]* 9600

Limitador de descarga [%] * 60

Consumo diario [Wh] * 5363,53

Cargar los datos de consumo Seleccionar archivo Ningún archivo

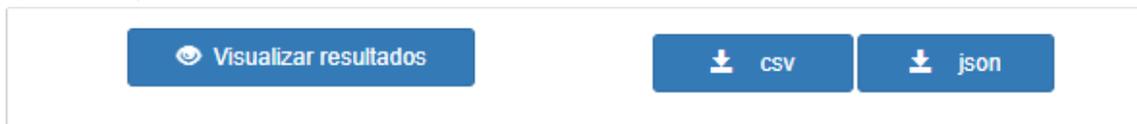
Inclinación [°] * 20

Azimut [°] * 0

Fuente: (PVGIS, 2021)

Paso 3: ejecute dando click en el link “visualizar resultados”, como se observa en la figura 3-9.

Figura 3-9. Ejecución visualizar resultados



Fuente: (PVGIS, 2021)

3.5.2. Resultados de la simulación:

PVGIS entrega los resultados del cálculo del sistema FV autónomo de tres tipos diferentes:

- Valores medios mensuales y anuales de la producción eléctrica diaria y valores medios mensuales de la energía no capturada debido a una batería completamente cargada (ambos expresados en Wh)
- Promedio mensual y anual del número de días en los que la batería se carga y descarga completamente.
- Histograma del estado de carga de la batería.

Continuación se muestran los resultados obtenidos de PVGIS-5, que son valores estimados de la producción eléctrica solar

La tabla 12 muestra de manera resumida los datos ingresados del sistema FV diseñado y los resultados de la simulación.

Tabla 12. Resumen de la simulación del sistema FV

Datos proporcionados

Latitud/Longitud:	10.389, -75.415	Ángulo de inclinación:	20 °
Horizonte:	Calculado	Ángulo de azimut	0 °
Base de datos:	PVGIS-NSRDB	Resultados de la simulación	
FV instalado:	1500 Wp	Porcentaje días batería cargada:	49.36 %
Capacidad de la batería:	9600 Wh	Porcentaje días batería descargada:	45.69 %
Limitador de descarga:	60 %	Energía media no capturada:	1171.71 Wh
Consumo diario:	5363.53 Wh	Energía media que falta:	1008.19 Wh

Fuente: (PVGIS, 2021)

Los resultados se pueden interpretar de la siguiente manera:

- Porcentaje días batería cargada: 49.36%, corresponde a promedio mensual y anual del número de días en los que la batería se carga completamente.
- Porcentaje días batería descargada: 45.69%, %, corresponde a promedio mensual y anual del número de días en los que la batería se descarga completamente.
- Energía media no capturada: 1171.71 Wh, corresponde a los valores medios mensuales de la energía no capturada o desperdiciada debido a las baterías completamente cargada.
- Energía media que falta: 1008.19 Wh, corresponde a la energía faltante para que el sistema diseñado satisfaga los requerimientos energéticos.

La tabla 13 muestra los valores de producción energética media diaria (E_d). Se observa que en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre el sistema FV diseñado cumple con la producción energética esperada. En los otros meses del año se nota un faltante energético (ver figura 3-10). Estos valores son coherentes con la energía media no capturada (E_I) por baterías cargadas completamente. También se muestra los porcentajes

mensuales en que la batería está cargada completamente (f_f) y descargada completamente (f_e).

Tabla 13. Rendimiento medio mensual del sistema FV
Rendimiento medio mensual

Mes	E_d	E_l	f_f	f_e
Enero	5331.0	1577.6	92.7	4.7
Febrero	5292.7	1594.8	89.3	10.4
Marzo	5189.0	1069.3	76.0	19.1
Abril	4984.1	314.6	46.7	42.1
Mayo	4644.0	94.8	23.8	71.0
Junio	4653.7	62.5	17.6	73.6
Julio	4779.7	144.8	30.2	59.5
Agosto	4723.9	158.6	26.4	66.3
Septiembre	4794.3	251.9	37.3	57.6
Octubre	4660.4	245.3	35.5	62.2
Noviembre	4657.0	408.7	41.5	59.4
Diciembre	5152.4	1089.9	78.5	19.9

E_d: Producción energética media diaria [Wh/día].

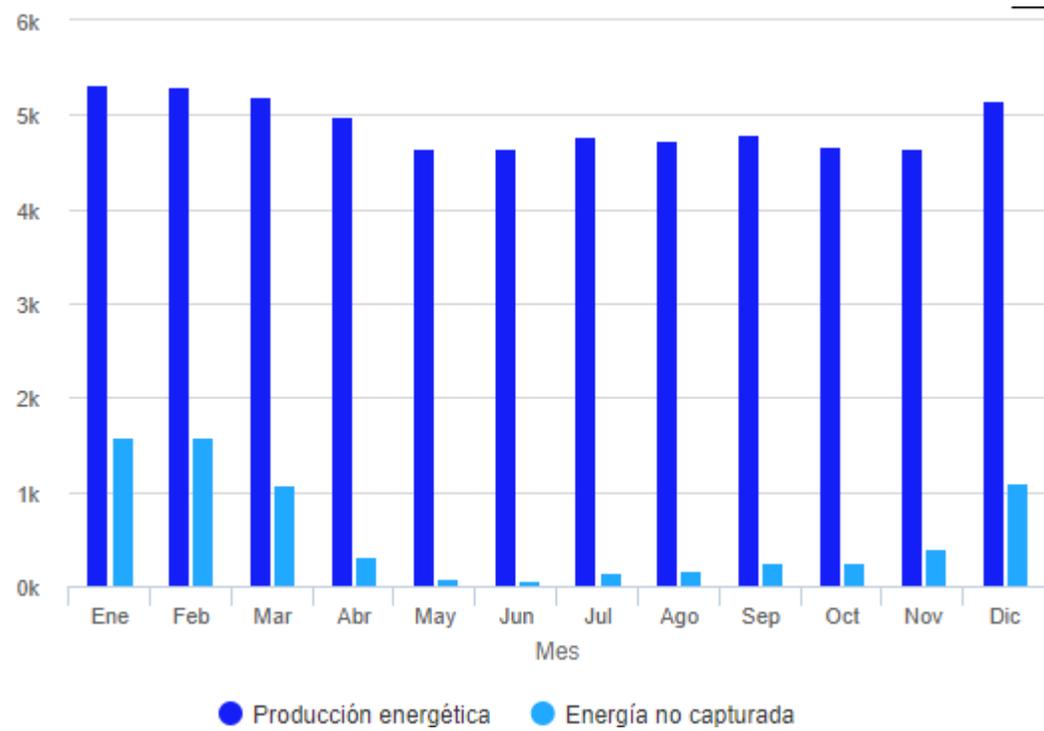
E_l: Energía media diaria no capturada [Wh/día].

f_f: Porcentaje de días con la batería cargada completamente [%].

f_e: Porcentaje de días en los que la batería se descarga completamente [%].

Fuente: (PVGIS, 2021)

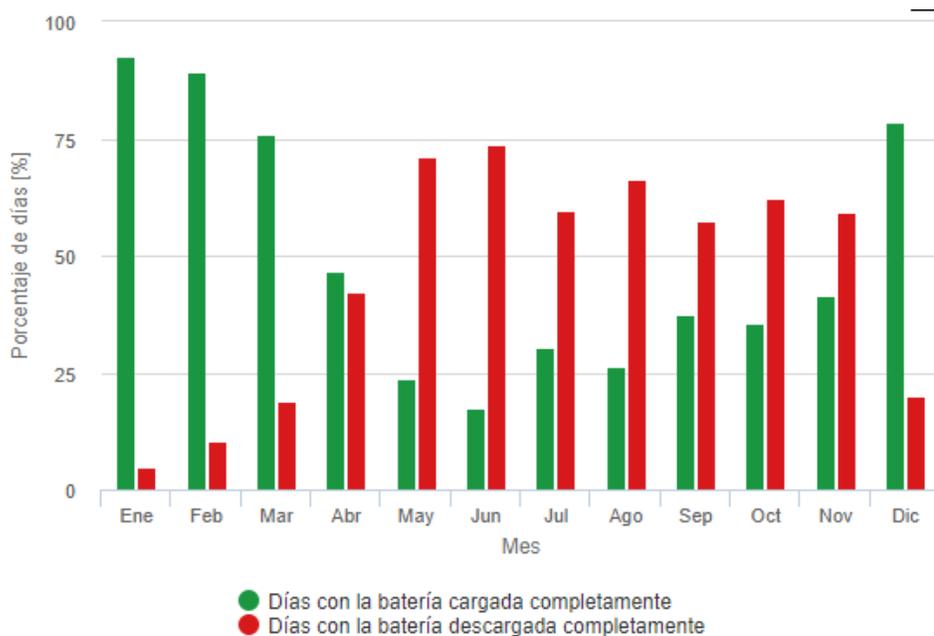
Figura 3-10. Producción estimada para un sistema FV autónomo



Fuente: (PVGIS, 2021)

La figura 3-11 muestra el rendimiento del banco de batería dimensionado en el diseño del sistema FV. Se muestra el porcentaje de carga que alcanza la batería en cada mes del año y de manera inversa, el porcentaje de descarga que alcanza la batería en cada mes.

Figura 3-11. Rendimiento de la batería para un sistema FV autónomo



Fuente: (PVGIS, 2021)

La tabla 14 muestra el estado de carga final de cada día (Cs) y el porcentaje de días con ese estado de carga (Cb).

Cómo se puede observar, el banco de baterías no alcanza a cargarse en algunos meses como se esperaba porque el generador FV es insuficiente. Esto debido a la menor producción de energía solar en aquellos meses del año. También se puede observar que se genera cierta energía no capturada que puede ser debido a insuficiencia de capacidad en las baterías, por lo que se puede recalcular la capacidad de nuevo en el diseño y agregarle un factor de seguridad más amplio. De esta manera se asegura un mayor almacenamiento de cargas. Lo mismo sucede con los paneles FV.

Tabla 14. Probabilidad del estado de carga de la batería al final del día

Cs	Cb
60-64	24.0
64-68	12.0
68-72	11.0
72-76	9.0
76-80	7.0
80-84	7.0
84-88	5.0
88-92	7.0
92-96	6.0
96-100	14.0

Cs: Estado de carga al final de cada día [%].

Cb: Porcentaje de días con este estado de carga [%].

Fuente: (PVGIS, 2021)

3.6. Comparativo Moto generador eléctrico y Paneles solares fotovoltaico

De acuerdo con las características geográficas de la Casa Finca Torres Solar en el departamento de Bolívar, se considera que la alternativa de la instalación de los paneles solares

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Se hizo la evaluación de los requerimientos energéticos diarios de la Finca “Torre Solar” a partir de los consumos de potencia individuales de los equipos existentes, estableciendo un consumo diario de 5.363.53 Wd.

Se realizó la evaluación del aporte energético solar en el lugar de instalación por medio de información obtenida en la en base de datos PVGIS. Se pudo determinar la irradiación promedio mensual para el mes menos desfavorable (160.26 kWh/m^2) y seguidamente la irradiación promedio diaria ($R\beta = 5,342 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$), con lo que se pudo establecer las horas pico de sol ($HSP=5,23 \text{ h}$), necesarias para el dimensionamiento del sistema FV.

Se diseñó un sistema de generación fotovoltaica ajustado a los requerimientos energéticos de la finca. El sistema diseñado resultante quedó conformado por tres paneles FV ($W_p=500 \text{ W}$), capaces de generar la potencia diaria suficiente ($8.013 \text{ Wd} = 1.500 \text{ W} \times 5.23 \text{ h}$) para suplir las necesidades de la Finca ($5.363.53 \text{ Wd}$). Además, el sistema FV quedó conformado por dos baterías de $24 \text{ V}/200 \text{ Ah}$, generando una capacidad de almacenamiento de 400 Ah (9.600 Wh), un regulador de carga MPPT de $24\text{V}/50 \text{ A}$ y un Inversor de 5.000 W .

Se hizo la selección técnica de los componentes principales del sistema de generación de energía fotovoltaica a partir de los catálogos disponibles en el mercado y una evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto, resultando un costo aproximado de \$13.156.342, para la puesta en marcha del sistema, encontrándose el costo total del proyecto, faltando relacionar los costos de instalación.

La simulación del sistema FV diseñado mostró que el sistema no es capaz de suministrar la energía suficiente durante ocho meses del año, en el que la energía solar es más baja. Aunque este resultado no es determinante para validar el diseño, si es una aproximación

que se debe considerar a la hora de asumir criterios de diseño, como el de sobredimensionar algunos de los componentes, como baterías y paneles FV. Así mismo, se pudo determinar los meses y días en que las baterías se alcanzan a cargar y descargar completamente, esto fue calculado para una profundidad de descarga del 60%.

Los resultados de la simulación también mostraron la energía promedio mensual no capturada por baterías cargadas completamente. De lo anterior se concluye que el dimensionamiento de los paneles FV se les debe agregar un margen de seguridad más amplio y, si se requiere, a la capacidad de la batería. Este tipo de proyectos simulados ayuda a poner en escena el proyecto y evaluar posibles oportunidades de mejora a la hora de implementarlo.

En términos generales se puede concluir que el sistema diseñado cumple con los requerimientos esperados, dado que los cálculos se realizaron considerando que todas las cargas estarían operando en los tiempos establecidos, cosa que casi nunca se cumple en la realidad.

3.1. Recomendaciones

Se recomienda validar el proyecto propuesto y el nivel de viabilidad para la implementación. Se debe revisar y calcular con un margen de seguridad más amplio el dimensionamiento de los paneles FV, dado que no se consideraron días de autonomía para abaratar costos. Tener presente que el comportamiento atmosférico no es el mismo todos los días, lo que podría incidir en baja generación de energías en ciertos días del año (época de invierno).

Se recomienda realizar simulaciones de los diseños desarrollados como medio de validación hasta satisfacer los requerimientos establecidos. Así mismo, se recomienda contactar diferentes tiendas donde se puedan comprar dispositivos que ofrezcan una buena relación costo/beneficios.

Se debe realizar una inspección al sitio de instalación para determinar si el área para instalación de los paneles está despejada, si ésta cuenta con obstáculos que ocasionen sombras sobre los módulos, dado que esto podría ocasionar una disminución en el rendimiento.

El valor del proyecto no incluye la mano de obra para la instalación del sistema FV ni el transporte de los equipos y materiales. Se recomienda cotizar todos los equipos, mano de obra y transporte en el momento de la ejecución del proyecto, dado que el valor unitario de los componentes están en función del precio del dolar o euro.

5. Bibliografía

- [1] Valer, L. R., Melendez, T. A., Fedrizzi, M. C., Zilles, R. y de Moraes, A. M. (2016). Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 15, 20-26. Doi: 10.1016/j.seta.2016.03.003.
- [2] TWENERGY (2021). Electrificación sostenible en zonas rurales de Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/electrificacion-sostenible-en-zonas-rurales-de-colombia-2514/>, recuperado: 07 de octubre de 2021.
- [3] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 884 de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20884%20DEL%2026%20DE%20MAYO%20DE%202017.pdf>, recuperado: 08 de octubre de 2021.
- [4] UPME (2020). Plan Energético Nacional 2020 - 2050. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf), recuperado: 08 de octubre de 2021.
- [5] Ministerio de Minas y Energía - Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Ley 1715 de 2014.
- [6] CELSIA (2018). Energía solar en Colombia: así es el panorama en cifras. [En línea]. Disponible en: <https://blog.celsia.com/new/energia-solar-en-colombia-panorama-en-cifras/>, recuperado: 08 de octubre de 2021.
- [7] ENERGÍA ESTRATÉGICA. Los 37 proyectos de energías renovables que se inaugurarán este año en Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/exclusivo-los-37-proyectos-de-energias->

[renovables-que-se-inauguraran-en-colombia-este-ano/](#), recuperado: 10 de octubre de 2021.

[8] Salamanca-Ávila, S. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. Revista Científica, 30 (3), 263-277. Doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.12213>.

[9] Consejo Privado de Competitividad: Informe Nacional de Competitividad - Confiabilidad, cobertura y calidad del servicio de energía, 2020. [En línea]. Disponible en: https://compite.com.co/blog_cpc/confiabilidad-cobertura-y-calidad-del-servicio-de-energia/, recuperado: 10 de octubre de 2021

[10] Plan Desarrollo Bolívar – Bolívar Primero 2020 -2023, pag. 155. [En línea]. Disponible en: <https://www.bolivar.gov.co/web/seccion/planes-e-informes/planes-de-desarrollo-2/>, recuperado: 10 de octubre de 2021.

[11] UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS (2020). Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. [En línea]. Disponible en: <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cpt017-ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL.pdf>, recuperado: 10 de octubre de 2021.

[12] IDEAM. Atlas de radiación solar de Colombia. En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>, recuperado: 10 de octubre de 2021.

[13] IRENA (2020). Perspectivas sobre energías renovables. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/>, recuperado: 07 de octubre de 2021.

[14] Kannan, N. y Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1092-1105. Doi: 10.1016/j.rser.2016.05.022.

[15] Kroposki, B. and DeBlasio, R. 2000. Technologies for the new millennium: photovoltaics

as a distributed resource. IEEE power engineering society summer meeting. 1798-801.

[16] Beltran, J. (2007). Prototipo fotovoltaico con seguimiento. Cuernavaca, Morelos, México: cenidet.

[17] Joaquín, C. (2008). DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTÁICO AISLADO, Guatemala.

[18] Caro Navarro, R. (s.f). Introducción a la energía solar fotovoltaica © ADR Infor SL

[19] Iluminet. (25 de 10 de 2016). *iluminet.com*. Obtenido de:
<https://www.iluminet.com/funcionamiento-paneles-fotovoltaicos-energia-solar/>

[20] Tecnosolab (2021). Características eléctricas de los paneles solares.
<https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>,
recuperado: 10 de octubre de 2021.

[21] Amazon.com (2021). Controlador de carga solar. Obtenido de:
<https://www.amazon.com/-/es/Controlador-Entrada-Pantalla-Identificar-MPPT-60A/dp/B0827DWCL6>, recuperado: 30 de octubre de 2021.

[22] Solartex.co (2021). Especificaciones técnicas eSmart Series MPPT SOLAR CHARGE. Obtenido de: <https://www.solartex.co/tienda/producto/controlador-solar-mppt-60-amperes/>, recuperado: 30 de octubre de 2021.

[23] Damia Solar (2021). Cuáles son los años de vida de cada tipo de batería en una instalación solar?. Obtenido de: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/cuales-son-los-anyos-de-vida-de-cada-bateria-solar_1, recuperado: 30 de octubre de 2021.

[24] Caro Navarro, R. (s.f). Instalaciones fotovoltaicas autónomas © ADR Infor SL.

[25] B. Zakeri, S. Syri, Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42 (2015) 569–596. doi:10.1016/j.rser.2014.10.011.

[26] Villavicencio Aluma, I. C. & Minotta Marín, L. F. (2017) Diseño de alternativas para la generación de energía eléctrica conectada a la red por medio de energía solar para el edificio Almendros de Universidad Javeriana Cali: sistema fotovoltaico. Pontificia Universidad Javeriana, Cali. Disponible en: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/8772?locale-attribute=en>, recuperado: 02 de noviembre de 2021.

[27] Solartex (2021). Especificaciones Inversor Grid TIE 5 kW Sun 2000-5 kTL-L1 Huawei. Disponible en: [Ehttps://www.solartex.co/tienda/producto/inversor-grid-tie-5kw-sun-2000-5ktl-l1-huawei/](https://www.solartex.co/tienda/producto/inversor-grid-tie-5kw-sun-2000-5ktl-l1-huawei/), recuperado: 02 de noviembre de 2021.

[28] PVGIS (2021). Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS). [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>, recuperado: 30 de octubre de 2021.

[29] Click Renovables. (30 de octubre de 2021). *Cómo calcular una instalación solar fotovoltaica en 5 pasos*. Obtenido de <https://clickrenovables.com/blog/como-calcular-una-instalacion-solar-fotovoltaica-en-5-pasos/>, recuperado: 02 de noviembre de 2021.

[30] TierrasInsolitas.com (2021). Conexión de baterías en paralelo. Disponible en: <https://www.tierrasinsolitas.com/conectar-baterias-en-paralelo/>

[31] Alibaba.com (2021). Panel SY-M500W-96P. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/500w-mono-solar-panels-in-house-96cell-mono-pv-module-used-for-50kw-solar-system-1600093954879.html>, recuperado: 02 de noviembre de 2021.

[32] Guardian Technology Development Co.,(2021). Baterías LiFePO4 24V200Ah. Obtenido de: https://es.made-in-china.com/co_kanglida-lydia/product_LiFePO4-Battery-Packs-24V200ah-Lithium-Ion-Battery-for-Solar-Energy-Storage_eryeensyy.html, recuperado 31 de octubre de 2021.

[34] Mercado libre (2021). Controlador, Regulador Solar Mppt 100a Carga 12/24V. Obtenido de: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-611550926-controlador-regulador-solar-mppt-100a-carga-1224v-_JM#position=35&search_layout=stack&type=item&tracking_id=07b1f426-11a8-4cbf-b07c-3425160d886b

[35] Mercado libre (2021). Inversor Marca Belttt 24v 5000 Watt Onda Pura. Obtenido de: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-517991944-inversor-marca-belttt-24v-5000-watt-onda-pura-_JM#position=28&search_layout=stack&type=item&tracking_id=1fee75f1-e356-4256-9d59-6034f67435ed, recuperado 31 de octubre de 2021.