



Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A.

Wilver Eduardo Guarín Castro

Código 21131627229

Jorge Jhobany Ruiz Avendaño

Código 21131621027

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A.

Wilver Eduardo Guarín Castro

Jorge Jhobany Ruiz Avendaño

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

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

Hugo Alba Díaz

Línea de Investigación:

Energías Renovables

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A.

Universidad Antonio Nariño sede Tunja,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de **Ingeniero Electromecánico**

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

Introducción	13
Planteamiento del problema.....	16
Objetivos.....	17
<i>Objetivo general</i>	17
<i>Objetivos específicos</i>	17
Ubicación	18
1. MARCO TEORICO.....	20
1.1. Antecedentes.....	20
1.1.1. Internacionales.....	20
1.1.2 Nacionales.....	22
1.2. Marco Conceptual.....	24
1.2.1. Radiación solar:.....	24
1.2.2. Irradiancia:.....	25
1.2.3. Irradiación:.....	25
1.2.4. Instalaciones fotovoltaica:.....	26
1.2.5. Sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCCR):.....	26
1.2.6. Potencia:.....	26
1.2.7. Tensión:.....	27
1.2.8. Corriente:.....	27
1.2.9. Energía eléctrica:.....	27
1.2.10. Panel solar:.....	27
1.2.11. Tipos de módulos fotovoltaicos:.....	28
Módulos de silicio monocristalino:.....	28
Módulo de silicio policristalino:.....	28
Módulo de capa fina:.....	28
1.2.12. Inversor:.....	29
1.2.13. VPN (valor presente neto):.....	30
1.2.14. TIR (Tasa Interna de Retorno):.....	31
1.2.15. Seguidor solar:.....	31
Por sus movimientos:.....	32
Según su algoritmo de seguimiento:.....	33
1.2.16 Arduino:.....	33
1.2.17 Fotorresistores:.....	34
1.2.18 Servomotor:.....	34
1.2.19 Tarjeta Reguladora:.....	34
1.2.20 Modulo sensor shield v5:.....	34
1.3. Bases teóricas.....	34
2. Diseño Metodológico.....	38
2.1 Fase 1: Potencial de radiación.....	38
2.2 Fase 2: Definición de criterios técnicos.....	38
2.3 Fase 3: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	39

2.4 Fase 4: Análisis de costos	39
2.5 Fase 5: Diseño prototipo seguidor solar.....	40
3. Resultados.....	41
3.1 A. Fase 1: Potencial de radiación.....	41
3.1.1 Zona de Incidencia	41
3.1.2 Potencial de radiación en zona de incidencia	41
3.1.3 Energía incidente en la zona del cultivo.....	44
3.2 B. Fase 2: Definición de criterios técnicos	47
3.2.1 Características del cultivo	47
3.2.2 Características de riego.....	48
3.2.3 Verificación de potencia necesaria a asegurar en paneles	52
3.3 C. Fase 3: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	54
3.3.1 Cálculo de paneles a usar.....	54
3.3.2 Selección de inversor idóneo	55
3.3.3 Analizar la energía consumida y la energía generada por el sistema.	56
3.3.4 Realizar planos eléctricos y memorias de cálculo teniendo en cuenta los lineamientos establecidos por los entes respectivos.	60
3.4 D. Fase 4: Análisis de costos	60
3.4.1 Costo total de instalación del proyecto.....	60
3.4.2 Costo anual de mantenimiento y depreciación del proyecto.....	62
3.4.3 Ahorro en dinero pagado al operador de red.....	64
3.4.4 Flujo de Caja, Retorno de la inversión, VAN y TIR	67
3.5 E. Fase 5: Diseño prototipo del seguido solar.....	73
3.5.1 Definir un Prototipo de seguidor solar	73
3.5.2 Diseñar isométricos del cuerpo general del prototipo del seguidor mediante el software Inventor.....	73
3.5.3 Determinar los componentes del prototipo definido.....	78
3.5.4 Llevar a escala el prototipo para una comprensión didáctica de su funcionamiento.....	82
Conclusiones.....	90
Referencias Bibliograficas	92

Lista de Figuras

Figura 0-1. Ubicación general del proyecto.....	18
Figura 0-2. Dimensión del cultivo y zona destinada para instalación de paneles.....	19
Figura 1-1 Tipos de radiación.	25
Figura 1-2. Sistema fotovoltaico conectado a la red.....	26
Figura 1-3. Panel solar.	28
Figura 1-4. Tipo de paneles solares	29
Figura 1-5. Inversor	30
Figura 1-6. Tipo de paneles solares	32
Figura 1-7. Tipo de paneles solares	33
Figura 1-8 Inicio paneles solares	36
Figura 3-1 Coordenadas agrícola Cactus.	41
Figura 3-2 Radiación solar y parámetros meteorológicos	43
Figura 3-3 Medidas zona disponible para instalación de paneles solares.....	45
Figura 3-4 Placa característica de bomba de riego principal	49
Figura 3-5 Placa característica de bomba de pozo profundo	49
Figura 3-6 Irradiación global horizontal por día, Fuente base de datos Global Solar atlas.....	53
Figura 3-7 Esquema de conexión para paneles solares por fase.....	56
Figura 3-8 Análisis de energía	59
Figura 3-9 Valor kWh agosto 2021.	66
Figura 3-10 Retorno de la Inversión.	69
Figura 3-11 Soporte Panel.	74
Figura 3-12. Base eje vertical.	74
Figura 3-13. Base horizontal.....	75
Figura 3-14. Estructura fotorresistencias.	76
Figura 3-15. Soporte Cuerpo.....	77
Figura 3-16. Cuerpo general seguidor	78
Figura 3-17. Arduino.	79
Figura 3-18. Fotorresistencia LDR.	79
Figura 3-19. Servomotor MG90S.	80
Figura 3-20. Tarjeta reguladora LM2596.	81
Figura 3-21. Modulo sensor shield v5.	81
Figura 3-22. Coordenadas en impresión 3D.	82
Figura 3-23. Impresión 3D.....	82
Figura 3-24. Impresión 3D con PLA.	83
Figura 3-25. Ensamble general.	83
Figura 3-26. Ensamble electrónico.	83
Figura 3-27. Cuadrantes Fotorresistores.	84
Figura 3-28. Prototipo ensamblado.....	84
Figura 3-29. Prototipo seguidor terminado.....	84
Figura 3-30. Diagrama de flujo programación seguidor.....	89

Lista de tablas

Tabla 3-1. Promedio mensual de horas con brillo solar para el municipio de Toca – Boyacá.....	42
Tabla 3-2. Irradiación global horizontal en kW-h/m ²	44
Tabla 3-3. Hora de riego según rango de temperatura.....	48
Tabla 3-4. Estimación de consumo energético promedio.....	50
Tabla 3-5. Promedios de consumo mensual en cultivo hechos con datos del año 2018 a 2021...	51
Tabla 3-6. Total de consumos Periodos del 2018 a 2021.....	51
Tabla 3-7. Análisis de energía.....	58
Tabla 3-8. Valor de la Inversión.....	61
Tabla 3-9. Costo anual de mantenimiento.....	62
Tabla 3-10. Cálculo de depreciación.....	64
Tabla 3-11. Relación energía consumida y excedentes del sistema solar fotovoltaico.....	65
Tabla 3-12. Valores que no se cancelaran al operador de red.....	66
Tabla 3-13. Flujo de Caja.....	67
Tabla 3-14. Retorno de la inversión.....	68
Tabla 3-15. VPN Y TIR.....	72
Tabla 3-16. Programación electrónica.....	85

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado principalmente a Dios, por permitirme haber llegado a este momento tan importante en mi formación personal y profesional.

A mis padres Ana Victoria Avendaño Cantor y Jorge Armando Ruiz Villate, por la formación que me han dado basada en principios, valores y fundada en amor inagotable.

A mi cómplice incondicional; Nancy Avella por su cariño infinito y por darme siempre esa voz de aliento convenciéndome de creer en mis capacidades.

A mis hermanos, personas muy bonitas, que en todo momento me han acompañado en diversas etapas de mi vida, contagiándome siempre de buena energía.

A mi compañero de viaje, Wilver Guarín con quien emprendimos este proyecto que hoy culmina. Gracias por su apoyo y constancia.

A mis compañeros y amigos, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías, tristezas y anécdotas.

A todas aquellas personas que estuvieron en algún momento apoyándome y permitieron que este sueño se haga realidad.

Jorge Ruiz Avendaño

Dedico este trabajo de grado principalmente a Dios, y dar gracias a él, ya que nos regaló el don de la vida para estar hoy aquí disfrutando este momento luego de tantos sacrificios, noches largas y complicadas, pero siempre de su mano, con fe paciencia y amor por nuestra profesión.

A mis padres María del Carmen Castro y Eduardo Guarín, quienes fueron el apoyo principal para culminar esta etapa, a mi madre que con sus consejos y oraciones me animo a seguir adelante para hoy por hoy entregarle el resultado de nuestro trabajo.

A mis hermanos, que aun en la distancia me regalaron su apoyo moral y me enseñaron a ser perseverante para alcanzar cualquier logro.

A mi compañera sentimental, con quien he compartido todo este proceso de aprendizaje y me motivo desde el primer día al último, dándome siempre una voz de aliento para no desfallecer y regalándome siempre su apoyo incondicional y amoroso.

A mi hijo quien se ha convertido en mi motor de vida y que con sus sonrisas me motiva día a día a ser un mejor profesional y ser humano, no solo para ser ejemplo, sino para contribuir con el desarrollo de una mejor sociedad.

Finalmente, a mi compañero, Jorge Ruiz quien a lo largo del desarrollo de este proyecto trabajo conmigo hombro a hombro y dedico su tiempo, experiencia y conocimientos a este proyecto con el único propósito de salir adelante y realizarnos profesionalmente.

Wilver Guarín Castro

Agradecimientos

Esta tesis de grado si bien ha requerido esfuerzo, perseverancia y mucha dedicación, no hubiese sido posible sin la ayuda desinteresada de cada una de las personas que a continuación mencionaré:

A Dios, que siempre fortaleció mi corazón e ilumino mi mente en momentos cruciales de mis estudios.

A nuestra querida alma mater, Universidad Antonio Nariño y su cuerpo docente por la formación como profesional ético y compartir sus conocimientos invaluable. Sin dejar de lado al director de tesis Ing. Hugo Alba, por su apoyo, confianza y capacidad para guiar este barco llamado tesis.

En especial, a la Empresa de Energía de Boyacá EBSA, por su importante apoyo brindándome los espacios para lograr este peldaño; quiero que tengan plena seguridad que este aprendizaje estará al servicio de tan importante compañía en la región.

Jorge Ruiz Avendaño.

Resumen

La investigación desarrollada tiene como objetivo principal proponer el diseño de un sistema fotovoltaico de riego con energía solar automatizado. El estudio se dio a partir de una investigación de tipo descriptiva para el análisis de características solares y su posible aprovechamiento en área de influencia definida como finca 2 de la empresa agrícola El Cactus S.A. en Toca-Boyacá. En primera instancia, el planteamiento se dio a partir de 4 fases, que incluyen 1). Identificar el potencial de radiación solar presente 2). Definición de criterios técnicos del cultivo 3). Dimensionamiento del sistema fotovoltaico 4). Estimación de costos. El análisis de información secundaria consultada de investigaciones relacionadas, artículos, bases de datos meteorológicas, seguido de fuentes primarias como la georreferenciación y demarcación, procesos, características de producción, bitácoras de la empresa, registros de consumos de energía eléctrica, cotizaciones y fichas técnicas de las bombas de riego.

Por otro lado, los cultivos de la empresa agrícola, tienen un sistema de riego por goteo, debido a esto se cuenta con dos bombas que generan un consumo energético elevado con una afectación en las finanzas de la empresa. Dentro de los resultados encontrados están: 1). La irradiación solar de $5,08 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ día}$. 2). Histórico del consumo energético entre los años 2018-2021, tabulación de promedios mensuales y anuales del periodo y finalmente se corrobora que las horas de funcionamiento de las bombas tienen relación con el consumo facturado. 3). Dentro del cálculo para determinar la cantidad de paneles que garantice el consumo de $161 \text{ kWh} / \text{día}$, es de 103 paneles, ajustado a 108 paneles, cada uno de ellos de 445 Wp y un inversor de 50 kW . También se desarrolló una App para notificar la cantidad de corriente en los paneles. 4). El costo del proyecto a implementar sería de $\$ 231.381.63 \text{ COP}$.

Ahora bien, se concluye que: 1) El estudio es viable económicamente ya que la inversión se recupera en 8 años y genera utilidades en los próximos 17 años restantes de vida útil del sistema. 2). Esta iniciativa puede ser pionero de procesos similares la región. 3). El sistema fotovoltaico se puede ver afectado por las condiciones climáticas, por ello es importante la conexión a un sistema de respaldo. Finalmente, se incluye en el desarrollo de la investigación el diseño de un prototipo de seguidor solar basado en la simplicidad, complemento al estudio, lo anterior dio como resultado que no es factible tenerlo en cuenta, debido a los altos costos para su implementación y se elimina del presupuesto general para no alterar la viabilidad de la propuesta.

Palabras Clave: Sistema fotovoltaico, energía solar, generación de energía, sistemas eléctricos.

Abstract

The main objective of the research developed is to propose the design of a photovoltaic irrigation system with automated solar energy. The study was based on descriptive research for the analysis of solar characteristics and their possible use in an area of influence defined as farm 2 of the agricultural company El Cactus S.A. in Toca-Boyacá. In the first instance, the approach was given from 4 phases, which include 1). Identify the solar irradiation potential present 2). Definition of technical criteria for crops 3). Sizing of the photovoltaic system 4). Cost estimation. The analysis of secondary information consulted from related research, articles, meteorological databases, followed by primary sources such as georeferencing and demarcation, processes, production characteristics, company logs, records of electricity consumption, quotations and technical data sheets of irrigation pumps.

On the other hand, the crops of the agricultural company, have a drip irrigation system, due to this there are two pumps that generate a high energy consumption with an impact on the finances of the company. Among the results found are: 1). Solar irradiation of 5.08 kWh / m² day. 2). Historical energy consumption between the years 2018-2021, tabulation of monthly and annual averages of the period and finally it was confirmed that the hours of operation of the pumps are related to the billed consumption. 3). Within the calculation to determine the number of panels that guarantees the consumption of 161 kWh / day, it is 103 panels, adjusted to 108 panels, each of them of 445 Wp and an inverter of 50 kW. An App was also developed to notify the amount of current in the panels. 4). The cost of the project to be implemented would be \$ 231.381.63 COP.

However, it is concluded that: 1) The study is economically feasible because the investment is recovered in 8 years and generates profits in the next 17 years of the remaining useful life of the system. 2). This initiative can be pioneer of similar processes in the region. 3). The photovoltaic system can be affected by weather conditions, so it is important to connect to a backup system. Finally, the design of a prototype of a solar tracker based on simplicity, complement to the study, is included in the development of the research, the above resulted in the fact that it is not feasible to take it into account, due to the high costs for its implementation and is eliminated from the general budget so as not to alter the viability of the proposal.

Keywords: Photovoltaic system, solar energy, power generation, electrical systems.

Introducción

Inicialmente, en Colombia se incentiva la implementación de energías renovables con el fin de proteger los recursos naturales en el desarrollo de los sectores primario y secundario, principalmente desde la industria y agrícola. Por lo anterior, se establecen políticas gubernamentales como la ley 1715 del 2014, esta presenta una serie de beneficios tributarios que buscan promover el uso y desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), estos beneficios están encaminados a la deducción en impuestos de renta a aquellos bienes adquiridos para poner en marcha un proyecto de transición energética, la eliminación de IVA a equipos destinados para esta transición y la exención de gravámenes arancelarios en toda la maquinaria, equipos, materiales e insumos usados en proyectos con FNCER. (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014). Dichos beneficios convierten la instalación de un sistema de energía solar fotovoltaica en algo más llamativo para un usuario residencial o industrial, pues su impacto económico se ve altamente reducido, es por esto que la empresa Agrícola El Cactus S.A, dedicada al cultivo de flores, ha despertado un interés por la puesta en marcha de este tipo de proyectos, pues es un camino para cumplir con su compromiso ambiental en cuanto a eficiencia energética se refiere.

Ahora bien, surge la idea de plantear el uso de un sistema solar fotovoltaico, que permita suplir las necesidades de potencia eléctrica para los sistemas de riego en las fincas productoras de flores de la empresa Agrícola El Cactus S.A; así mismo, busca disminuir los costos de funcionamiento y mejorar la rentabilidad de la empresa. El diseño del sistema solar fotovoltaico para la finca 2, ubicada en el municipio de Toca – Boyacá, es un plan piloto con la intención de replicar la experiencia en otras fincas de la región, para el desarrollo de este diseño, se inició por evaluar la radiación solar presentada en la zona, actividad que posibilito en parte la medición de

la viabilidad para la instalación de paneles solares en el lugar, adicionalmente esto permitió obtener información sobre la ubicación más conveniente de los paneles a determinadas hora del día para elevar la eficiencia en la producción de potencia eléctrica.

Además, se calculó la potencia necesaria para la alimentación de las bombas encargadas del riego de los cultivos ubicados en la finca piloto, dato que permitió calcular la cantidad de paneles que debían usarse para cumplir dichas necesidades. Por otro lado, se desarrolló un estudio de costos donde se definió presupuesto de inversión para llevar a cabo la construcción e instalación de dicho sistema solar fotovoltaico, TIR, VAN, y una proyección a 25 años de vida útil del sistema. Seguido, del diseño y análisis de un prototipo de seguidor solar a escala, este último se configuro como uno de los limitantes de la investigación ya que su implementación en el proyecto incurre en costos elevados de fabricación y mantenimiento, igualmente, la eficiencia no es significativa para los resultados esperados, por tanto, no se incluyó en el presupuesto general para no alterar los efectos positivos del sistema.

Por otro lado, en la definición inicial de objetivos se estableció que se iba a proponer el diseño de un sistema fotovoltaico de riego con energía solar automatizado, para lograr el objetivo se identificaron limitantes de alcance ya que la automatización de este sistema de riego requiere profundizar en diferentes cálculos, procesos y conceptos complejos, también es demasiado extenso, se estaría dando solución solamente a este apartado y se desvía de la propuesta inicial de la investigación, es importante resaltar que este limitante ha sido el tema central de otras investigaciones y su exclusión no afecta el desarrollo del presente estudio.

Finalmente, el entorno del diseño requerido de este proyecto pretende mejorar en cierta medida el proceso de riego en términos energéticos ya que los sistema solares fotovoltaicos se destacan de modo positivo en el ambiente y la retribución de capital a mediano plazo si se aporta

excedentes a la red, proceso que de alguna manera es novedoso en el municipio y será pionero en el desarrollo e implementación de este sistema a favor del sector agrícola de la región para el desarrollo de futuros proyectos de este tipo.

Planteamiento del problema

En los cultivos de la empresa Agrícola “El Cactus S.A”, debido a la extensión del cultivo (4.2 hectáreas) se hace necesario el uso de una bomba de 12 HP para llevar a cabo el riego de la plantación (bomba que se enciende según las necesidades de temperatura y humedad del cultivo), adicionalmente, debe usarse otra bomba de 5 HP, la cual es requerida para la extracción de agua de un pozo profundo, para llevar a cabo el proceso de riego durante 12 y 6 horas en funcionamiento respectivamente. A raíz de este proceso los consumos energéticos de 151,7 kWh/día aproximado, tienen costos elevados y se ven reflejados en el pago mensual de la factura de energía, en consecuencia, se evidencia una afectación en las finanzas de la empresa.

Dentro de los beneficios identificados con el desarrollo de la presente investigación están, en primera medida, la minimización de impactos ambientales con la reducción en el consumo de energía eléctrica suministrada por la red en un tiempo prolongado, ya que la vida útil de este sistema fotovoltaico es de aproximadamente 25 años, también se resalta el aprovechamiento de la radiación solar para mayor eficiencia y la ampliación del uso en sectores poco explorados como la agricultura. Sin dejar de lado los beneficios económicos y tributarios que se despliegan para las empresas que incursiones en el tema.

Por último, el objetivo central del estudio espera determinar las generalidades del sistema fotovoltaico que requiere la empresa “El Cactus S.A”, así mismo el estudio de costos que va desde la inversión inicial, el tiempo de retorno de la misma y un balance de costo beneficio de la implementación de dicho sistema.

Objetivos

Objetivo general

- Proponer el diseño de un sistema fotovoltaico de riego con energía solar automatizado.

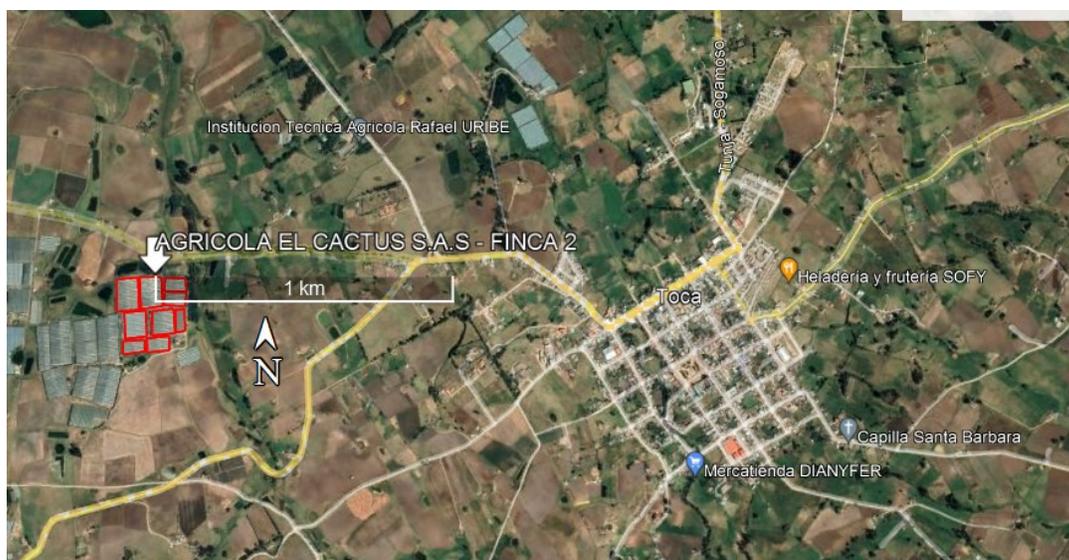
Objetivos específicos

- Averiguar el índice de radiación solar incidente en la zona del cultivo destinada a la instalación de paneles solares, de esta forma se calculará el potencial de energía eléctrica que puede generarse con el proyecto.
- Diseñar los componentes para un sistema solar fotovoltaico que sea capaz de suplir las necesidades energéticas del sistema de riego existente en el cultivo de flores de la empresa Agrícola el Cactus S.A, finca 2 ubicada en el municipio de Toca – Boyacá
- Diseñar un mecanismo que asemeje los movimientos de un sistema de seguidor solar automatizado, de acuerdo a las características solares de la zona.
- Determinar el impacto económico que traería la implementación del proyecto, mostrando el tiempo de recuperación de la inversión si se implementara este sistema en el año 2021.

Ubicación

La finca donde se encuentra el cultivo a intervenir, se encuentra ubicada en la zona rural del municipio de Toca - Boyacá, a menos de 2 kilómetros de su casco urbano, puede verse la localización general de la finca 2 de la empresa Agrícola el Cactus en la figura 0-1, y la zona dispuesta para la ubicación de los paneles en la figura 0-2.

Figura 0-1. Ubicación general del proyecto



Fuente: Autores

Gracias a la visita realizada en campo se logra establecer un área de 3162 m², que podrá ser destinada para la instalación de los paneles solares.

Figura 0-2. Dimensión del cultivo y zona destinada para instalación de paneles.



Fuente: Autores

1. MARCO TEORICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

En un contexto global, existen innumerables investigaciones que demuestran que los sistemas automatizados de energía solar son fundamentales para el cuidado y protección del ambiente, así como para el uso racional de los recursos naturales y protección de diferentes ecosistemas. Por lo anterior, enunciamos los siguientes estudios consultados:

Inicialmente, se analizó la investigación titulada diseño de un sistema de riego automatizado con energía solar, desarrollada en cuatro hectáreas del sector Campana B - Distrito Batangrande, Perú. Tuvo como objetivo general diseñar un sistema de riego automatizado con fuente de energía solar, para obtener el título de Ingenieros en Mecánica Eléctrica de la Universidad Señor de Sipan (Liza y Valencia, 2015).

En cuanto a los instrumentos utilizados en el estudio agronómico e hidráulico se determinó un número importante de caudal de aproximadamente de 59 l/s y una altura manométrica de 15.4m. A partir de estos parámetros, se determinó una máxima demanda de 8.4 kW, se usaron estos datos para diseñar un sistema a través de paneles solares (Liza y Valencia, 2015).

Por otro lado, para el diseño fotovoltaico se analizaron los datos estadísticos obtenidos de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) y SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). Tomando como referencia horas solares pico y (HSP), y así determinar la radiación solar del lugar de estudio (Liza y Valencia, 2015).

A su vez, se obtuvo 3.9 HSP con una inclinación de 0° grados, para las condiciones del diseño se elevó a 15°, generando un efecto de factores que condicionan entre ellos polvo y lluvia. También, se calculó 12 paneles solares, cada uno de 250 Wp y 9 baterías de 25 Ah, cumpliendo con los requerimientos del diseño (Liza y Valencia, 2015).

En las pruebas realizadas para la simulación con el software Labview y Proteus, este se calculó con 4 sensores de humedad tipo Vegetronix, dispuestos en cada hectárea del área de estudio. La señal de salida del sensor es digitalizada y procesada por el microcontrolador PIC16F87XA, el cual toma decisiones de requerimiento del recurso hídrico y da un pulso según el programa, finalmente la señal se transmite al sistema (Liza y Valencia, 2015).

En el panorama económico del sistema diseñado e implementado, se obtuvo un costo de 58,000.00 Nuevos soles y un valor actual neto de 250,000.00 nuevos soles, con una, tasa interna de retorno de 220% lo cual indica la rentabilidad y factibilidad del proyecto (Liza y Valencia, 2015). Este estudio, representa un aporte teórico importante para la presente investigación, especialmente por el recorrido metodológico que siguió. También, permite dar una mirada a los aspectos teóricos y conceptuales utilizados (Liza y Valencia, 2015).

Por otro lado, Juárez y Vera (2017), presentaron una tesis titulada “Estudio de sistema automatizado de riego por goteo por medio de energía solar para un invernadero”. Desarrolló como objetivo general el diseño de un sistema de riego por goteo a través de la energía fotovoltaica, aplicado en cultivos e invernaderos para la Universidad Tecnológica de Tecamachalco, en un área de 218.15 km².

A través de paneles fotovoltaicos, se utilizó la radiación solar con la que cuenta el lugar, transformando la energía solar en energía eléctrica, para definir los parámetros del sistema, se consideraron las dimensiones y características especiales del invernadero de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco. El estudio concluyó, que este sistema de bombeo fotovoltaico para riego funciona de manera autónoma, debido al uso de un micro controlador Arduino y funciona a partir de la programación realizada sin necesidad de supervisión. Este también utiliza otras aplicaciones que controlan tiempo, ventilación e iluminación en función de los sensores utilizados. Por último, este proyecto representa un interesante aporte al desarrollo institucional, especialmente por los postulados teóricos utilizados y los procesos implementados por Juárez y Vera (2017).

1.1.2 Nacionales

En el contexto nacional, Colombia también ha desarrollado algunas investigaciones sobre los sistemas de energía fotovoltaica, los cuales generaron diversos aportes para el alcance de los objetivos planteados. A continuación, se tiene que:

Con respecto a los avances de (Pedraza, 2020), este presentó una investigación titulada “Proyecto de riego utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca Contador del Municipio de Viani”. Como opción de grado para optar al título de Especialista en Gerencia Integral de Proyectos de la Universidad Militar Nueva Granada en la Facultad de Ingeniería. El objetivo de la investigación fue diseñar un sistema de riego fotovoltaico a partir de energía solar para el cultivo de limón en la finca contador en el Municipio de Viani-Cundinamarca.

Se desarrollo inicialmente con la descripción del proceso, posterior a ello el diseño del sistema fotovoltaico y concluye con los resultados. Una de las conclusiones del proceso alude que los ecosistemas acuáticos, sufren drásticos cambios que disminuyen la producción de servicios

ecosistémicos para el sector agrícola, lo cual debe fortalecerse a través de alternativas que minimicen el consumo y reduzcan los impactos de la actividad económica. Por lo anterior, algunos problemas asociados al agotamiento y deterioro del recurso hídrico y energético que actualmente se vive, requieren de estudios que desarrollen instrumentos que contribuyan a la protección de los recursos, en relación al presente estudio.

Así mismo, las estudiantes (García y Peñuela, 2019), realizaron el estudio enfocado en “Diseño e implementación de un sistema de paneles solares como prueba piloto para el suministro energético de dispositivos móviles”, para optar al título de Ingeniero ambiental de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, Colombia. Se realizó una investigación de tipo descriptivo y cuantitativo a partir de la revisión de información secundaria basada en un modelo de plantas fotovoltaicas, con criterios de eficiencia y eficacia ambiental y económica, capaz de suplir las necesidades de energía para dispositivos móviles de los estudiantes de la Universidad Santo Tomás campus Loma Linda.

En teoría esta investigación consistió en la transformación de energía solar en energía eléctrica, que favorece la minimización de impactos negativos al ambiente por el uso masivo de electricidad y generación de gases contaminantes. Por otro lado, se realizó una instalación aislada de fácil diseño e implementación, los resultados se organizaron en tres fases, la primera enfocada en el análisis estadístico de la percepción de la comunidad, seguido de una descripción de mapas de radiación solar y los impactos socio-ambientales generados posterior a la instalación. Esto a partir de 250 encuestas con un formato aplicado a la comunidad estudiantil, además de los datos obtenidos por el IDEAM para los cálculos sobre la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Como conclusión, los autores resaltaron la pertinencia de emplear sistemas de energías renovables que permitan disminuir el uso de los recursos naturales y contaminantes como los combustibles derivados del petróleo y el acelerado aumento del CO_2 , igualmente, da una mirada metodológica bastante amplia y orienta el camino epistemológico para el alcance de los objetivos planteados.

1.2. Marco Conceptual

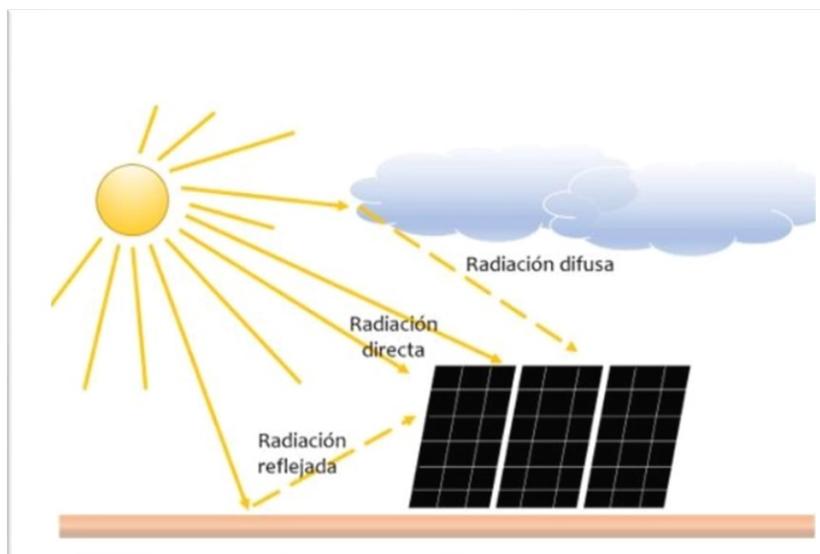
En el presente apartado se relaciona los términos relevantes para el desarrollo contextual de la investigación, principalmente se usó como fuente el libro Configuración de Instalaciones Solares Fotovoltaicas del autor Julián Cantos Serrano, igualmente, de la investigación realizada por Claudia Marcela Espitia Rey, esta como opción de grado de Maestría en Sistemas Energéticos Avanzados, ente otros.

1.2.1. Radiación solar: Es la energía generada del sol a través de reacciones nucleares aproximándose a la superficie terrestre, teniendo en cuenta que la radiación que recibe se clasifica de la siguiente manera:

- **Radiación directa:** proviene directamente del sol, este tipo de radiación disminuye notoriamente en días nublados, debido a la proyección de sombra.
- **Radiación difusa:** proviene de la atmosfera, debido a la dispersión de parte de la radiación solar en ella y se dirige en todas las direcciones. Si no existen nubes este tipo de radiación suele ser del 15% de la radiación global, pero en días nublados alcanza valores del 50%.

- **Radiación reflejada:** proviene de la tierra, de los cuerpos capaces de reflejar la radiación solar, se mide por el coeficiente de reflexión de la superficie, ejemplo lagos, terrenos, entre otros.

Figura 1-1 Tipos de radiación.



Fuente: SunFields Europe-SFE Solar Logistic.

1.2.2. Irradiancia: medida de la potencia solar incidente por unidad de superficie. Se expresa en W/m^2 del mismo modo múltiplo de esta misma unidad (ejemplo KW/m^2) teniendo en cuenta que esta se ve reducida en el tránsito por la atmosfera, llegando a la superficie terrestre a un valor aproximado de $1000 W/m^2$, valor utilizado en la definición de parámetros en condiciones estándar en los módulos fotovoltaicos.

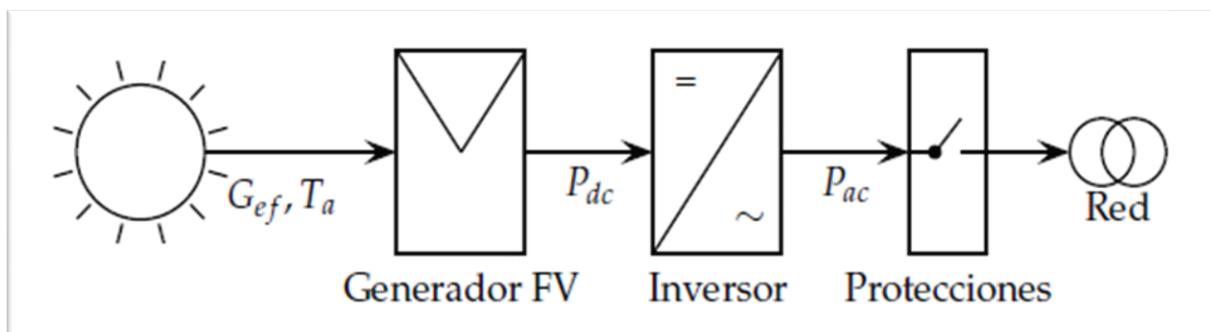
1.2.3. Irradiación: es la energía solar que percibe una unidad de superficie en un determinado tiempo. Entendiéndose que es la suma de las irradiancias presentes en ese periodo de tiempo

midiéndose en $W h/m^2$ o $k W h/m^2$ siendo un múltiplo. se designa con la letra G acompañado de uno o más subíndices como horario (h), diario (d), mensual (m), anual (a).

1.2.4. Instalaciones fotovoltaica: las instalaciones solares fotovoltaica son instalación eléctrica especiales que puede producir energía a partir de energías limpias como la energía solar en la actualidad conocemos dos tipos de instalaciones fotovoltaicas, conectadas a la red ON GRID esta puede alternarse oportunamente con la red local existente, por otro lado, las aisladas de la red OFF GRID este tipo de instalación requiere un sistema de almacenamiento como las baterías para así garantizar el suministro de energía.

1.2.5. Sistema fotovoltaico conectado a la red (SFGR): es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional. La energía consumida por este sistema puede ser consumida parcial o totalmente y la energía resultante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo.

Figura 1-2. Sistema fotovoltaico conectado a la red.



Fuente: Perpiñán, 2021

1.2.6. Potencia: cantidad de Energía entregada o absorbida por una carga en un tiempo determinado, su unidad de medida es el Vatio (W).

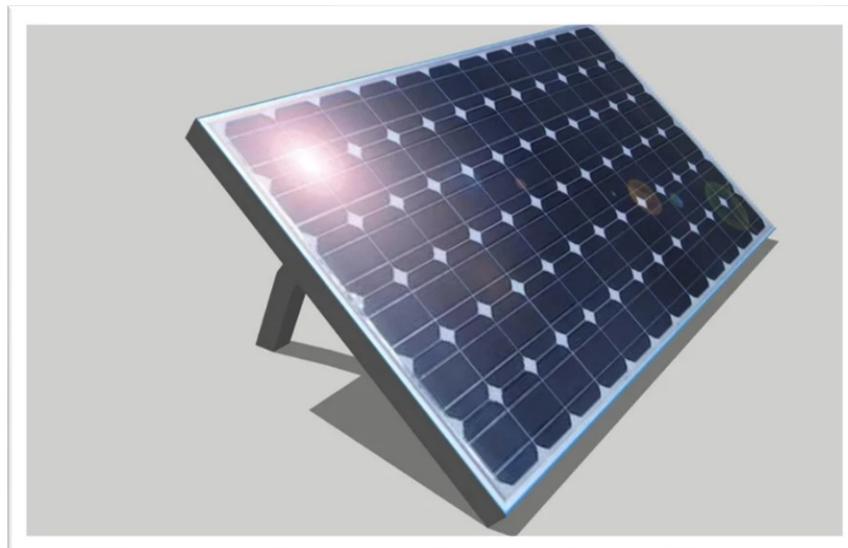
1.2.7. Tensión: magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, su unidad de medida es el voltio (V)

1.2.8. Corriente: velocidad con la que un flujo de electrones atraviesa cierta sección de un conductor, su unidad de medida es el amperio (A)

1.2.9. Energía eléctrica: diferencia de potencial entre dos puntos estableciendo una corriente poniéndola en contacto con un conductor, puede transformarse en energía lumínica, mecánica o térmica.

1.2.10. Panel solar: Es un conjunto de celdas solares iguales, conectadas de tal forma que puedan suministrar las condiciones de tensión y corriente óptimas para lograr ser integradas en un sistema de generación de energía. En Colombia, los paneles solares deben registrarse bajo la NTC 5899-1 y la NTC 5899-2 de 2011 (donde se hablan de los requisitos para su construcción y requerimientos de pruebas) y dependiendo del tipo de panel a instalar la NTC 2853 de 2006 (para paneles de silicio de cristalino), la NTC 5464 de 2010 (para paneles fotovoltaicos de película delgada) y la NTC 5512 de 2013 (para paneles en condiciones especiales).

Figura 1-3. Panel solar.



Fuente: 3dwarehouse, 2018

1.2.11. Tipos de módulos fotovoltaicos: dependiendo del tipo de construcción y su materia prima los encontramos en varios tipos:

Módulos de silicio monocristalino: este presenta gran durabilidad gracias a las propiedades, el deterioro con el paso del tiempo no es significativo garantizando una vida útil prolongada, está catalogado como uno de los más eficientes en el mercado, los fabricantes sostienen un correcto funcionamiento entre 18 y 20 años.

Módulo de silicio policristalino: con menor porcentaje de eficiencia con respecto al anterior, su costo también es inferior, en cuanto a su vida útil es notable el rendimiento que posee ya que tiene similitud a los de silicio monocristalino.

Módulo de capa fina: su principal característica está en la fabricación ya que contiene un material semiconductor, con una ventaja frente a los anteriores por su versatilidad y flexibilidad

pudiéndose usar en distintas aplicaciones por su construcción basado en los materiales se encuentra; silicio amorfo ya que este tiene menor costo de fabricación, pero respecto a su eficiencia es menor y disminuye con el pasar del tiempo; Telururo de cadmio (CdTe), la fabricación de estos módulos en este material es de gran uso por su eficiencia y además no presentan son amigables con el medio ambiente, debido al tratamiento y reciclaje del material; Arseniuro de Galio (GaAs), tiene la eficiencia más alta de casi el 30%, sin embargo, tiene unos costos de fabricación elevados que limitan el uso para aplicaciones espaciales.

Figura 1-4. Tipo de paneles solares



Fuente: Celdares.S.A, 2019

1.2.12. Inversor: Equipó usado en instalaciones eléctricas, su principal función es convertir corriente continua en alterna teniendo en cuenta que es necesario que haya cargas o consumos de corriente alterna dispuestas en instalaciones conectadas a la red su principio de funcionamiento

internamente incluye transistores y tiristores que realizan la conversión de la forma de onda, adicional a esto cuenta con filtros para afinarla para obtener una mejor señal, otra propiedad de estos equipos son la de buscar el punto máximo de potencia en la que los módulos deben trabajar.

Figura 1-5. Inversor



Fuente: Tecnosolar.

1.2.13. VPN (valor presente neto): Es el indicador más importante para determinar si el proyecto es viable desde el punto de vista económico, pone en pesos de hoy los ingresos (+) y los egresos (-). Es el valor medido en pesos de hoy o el equivalente en pesos actuales de todos los ingresos y egresos presentes y futuros que constituyen el proyecto. Este indicador permite saber el valor actual del proyecto teniendo en cuenta diferentes tiempos de financiación

1.2.14. TIR (Tasa Interna de Retorno): Es la tasa en la que los flujos de entrada y de salida de un proyecto traídos a valor presente se igualan, es la tasa en la cual el VPN se iguala a cero. Donde se mide la rentabilidad del proyecto y establece la viabilidad en los proyectos de inversión, se debe calcular el flujo de caja, que tiene en cuenta las ganancias producidas por el ahorro de electricidad consumida de la red, menos los gastos operativos, gastos de mantenimiento y su respectiva depreciación.

1.2.15. Seguidor solar: Dispositivo encargado de posicionar módulos solares mediante uno o más motores, esto con el fin de que se sigan los movimientos del sol y captar así la mayor cantidad de rayos solares. Pueden clasificarse según el tipo del movimiento que realizan o según el algoritmo de seguimiento que manejan, para esto se tiene:

Seguidor pasivo: Este tipo de seguidor solar realiza su movimiento sin consumo de energía eléctrica utilizando el calor del sol modificando la distribución del peso entre sus lados este y oeste su funcionamiento consiste en un depósito a lado y lado conteniendo un líquido de bajo punto de ebullición de igual manera placas bimetálicas expuestas de lado y lado, cuando el lado del líquido está expuesto al sol aumenta su temperatura y entra en ebullición mientras que el lado de la sombra se mantiene en estado líquido generando una diferencia en el peso del panel y así genera un movimiento.

Seguidor activo: A diferencia de los seguidores pasivos, el mecanismo de seguimiento activo requiere cierta cantidad de energía este tipo de seguidores son empleados en granjas solares además económicamente compensa realizar la inversión ya que la energía generada es superior al costo y consumo de los mecanismos. (Cantos,2016).

Por sus movimientos:

Seguidores de un eje: Diseñados con solo un grado de libertad, la rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, no puede realizar un seguimiento completo del sol pues solo pueden seguir el azimut o la altura solar.

Seguimiento en acimut: Tienen una inclinación fija y su estructura gira en el mismo este y oeste, su velocidad de giro es variable a lo largo del día.

Seguimiento de altura solar (cenital): los módulos se colocan de forma paralela a un eje horizontal (cuya dirección es norte ... sur), que gira la estructura de este a oeste para que la incidencia de los rayos sean lo más perpendicular posible. (Cantos,2016)

Seguimiento polar: Es semejante al seguidor de eje horizontal, pero incluye la mejora de incluir cierta inclinación por lo que consigue una mejor ganancia y velocidad de giro en un eje 15°por hora.

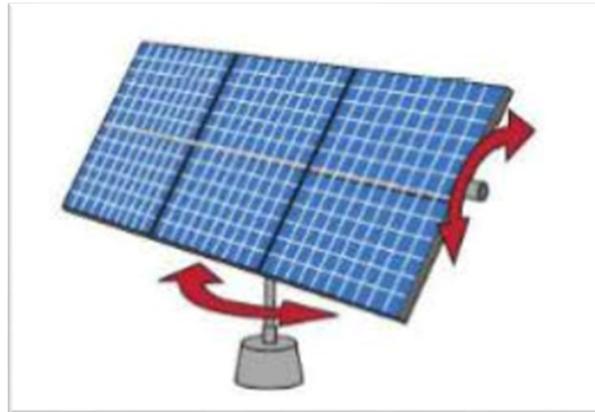
Figura 1-6. Tipo de paneles solares



Fuente: Cantos, 2016.

Seguidores a dos ejes: Tiene dos grados de libertad, por lo tanto, tienen mayor movimiento, siguen completamente el movimiento del Sol, azimut y altura. Seguimiento acimut mediante un eje vertical, seguimiento de la altura del sol (cenital) gracias a un eje horizontal.

Figura 1-7. Tipo de paneles solares



Fuente: Cantos, 2016.

Según su algoritmo de seguimiento:

Seguidores por punto luminoso: Posee sensores que buscan el punto más luminoso para definir la dirección a la que deben apuntar los módulos solares y acomodarlos de forma perpendicular a los rayos del sol.

Seguidores con programación astronómica: No hacen uso de sensores, poseen un software que predice la posición del Sol a cada hora.

1.2.16 Arduino: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso.

1.2.17 Fotorresistores: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso

1.2.18 Servomotor: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso.

1.2.19 Tarjeta Reguladora: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso.

1.2.20 Modulo sensor shield v5: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso

1.3. Bases teóricas

Este apartado comprende los principales autores y las teorías relevantes frente a los sistemas de energía solar fotovoltaica, de manera cronológica para la comprensión del tema y como modelo de desarrollo para la presente investigación. Inicialmente, el físico francés Alexandre Edmond Becquerel a mediados de 1839, incursiona en el fenómeno fotoeléctrico a partir de observar como aumenta la conductividad eléctrica en soluciones líquidas que han sido expuestas a la luz. Luego en el año de 1873 el Ingeniero Willoughby Smith, describe en su artículo “Efecto de la luz sobre el selenio durante el paso de una corriente eléctrica” el efecto de la luz en el selenio y como este es capaz de generar un flujo de electricidad. Otro autor de estudios similares es Charles Fritts quien en el año de 1883 con base en los trabajos anteriores logra construir la primera célula solar con láminas de selenio cubiertas de oro, con el fin de usarlas como sensores para el

funcionamiento de cámaras fotográficas con una eficiencia del 1% demostrando así la conversión de energía de la luz en energía eléctrica. Hay que mencionar también los avances de el físico Aleksandr Stoletov quien, a partir del trabajo realizado por Hertz en 1891, construyó la primera célula fotoeléctrica.

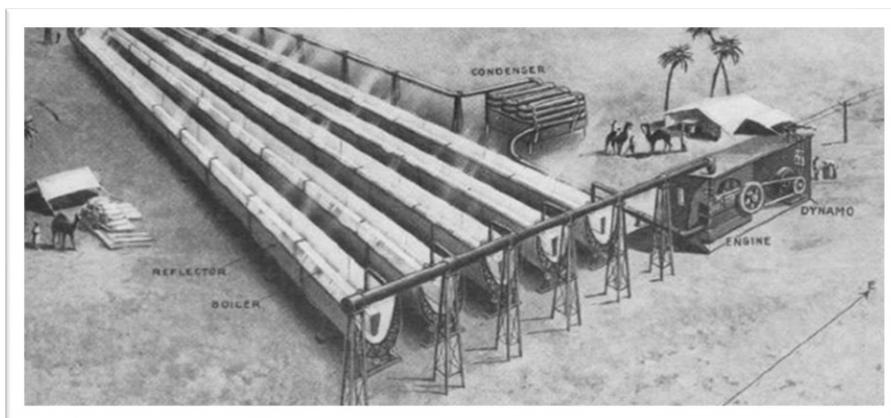
Por otro lado, en 1905 Albert Einstein planteó una nueva teoría cuántica de la luz y profundiza en el efecto fotoeléctrico, a partir de su descubrimiento al aplicar iluminación a la luz violeta los fotones podían arrancar los electrones de un metal y producir corriente eléctrica; por esta investigación recibió el premio nobel de física en 1921. (Tres) más aún autores como el estadounidense Russel, diseña la primera célula de silicio moderna, seguido del trabajo adelantado por los laboratorios Bell, Gerald Pearson, Daryl Chaplin y Calvin Fuller en 1953, adelantan las primeras células solares aumentando así la eficiencia a 6%. En 1956 la empresa Hoffman Electronics se consolida con el fin de crear y comercializar paneles fotovoltaicos, posicionándose en diferentes usos, ejemplo en satélites espaciales, faros, celdas solares en las calculadoras de marca Sharp. Así que, en los años 70 la francesa Dominique Campana en su preocupación por los problemas ambientales, realiza su tesis doctoral en el uso de sistemas fotovoltaicos para las bombas de agua, con el objetivo de permitir el recurso vital en lugares con difícil acceso a la energía eléctrica y que padecen de sequias, tomado de (Puig & Jofra).

Entre los años 1838 y 1890 autores como Horace de Saussure, Edmond Becquerel y Charles Fritts, avanzaron en la generación de electricidad aprovechando la energía solar. En la intervención del gobierno a través de políticas que apoyen y promuevan el uso de energías renovables, estas desde los años 90 con algunos presidentes de Estados Unidos, la participación de la UNESCO, en la celebración de diferentes eventos que reconocían los avances en el tema, así como la

participación de diversas empresas privadas como pioneras en el uso y desarrollo de más investigaciones que promuevan en el uso de energía fotovoltaica.

Ahondando en los autores renombrados en su aporte a la energía solar esta Frank Shuman considerado el padre de la energía solar. «Hemos demostrado la utilidad comercial de la energía del sol en los trópicos y en particular el resultado eficaz, nuestras tiendas de petróleo y carbón se agotan y la raza humana puede recibir el poder ilimitado de los rayos del Sol». Palabras escritas en 1916 por Shuman cuando explicaba sus hallazgos, a sus 30 años ya tenía numerosos inventos como el vidrio de alambre, algunos otros provenientes de este y la máquina para elaborarlos, cuando tenía 35 años mostro al mundo un motor capaz de funcionar con energía solar en cajas cuadradas de un pie llenas de éter, tuvo tal funcionamiento que llego a funcionar durante 2 años en el estanque de su casa. Llego Shuman formó la Sun Power Company, con la intención de construir plantas de energía a gran escala en 1912 y en 1913 logro ocupar el puesto de pionero de la energía solar. Su trabajo es uno de los más reconocidos a nivel mundial y facilito la aparición de otros investigadores a partir de su trabajo a lo largo de su vida.

Figura 1-8 Inicio paneles solares



Fuente: Blog Holaluz.

Finalmente, hay que mencionar que la luz solar como fuente de energía se conoce desde la antigua Grecia con la representación del Dios Helios o del sol. Los griegos se reconocen como la primera civilización en aprovechar la luz y el calor emitido del sol para su desarrollo, aproximadamente 400 A.C. unos años después los romanos incursionaron en el uso de la luz solar para favorecer el proceso de los invernaderos a través del efecto causado por las ventanas de cristal.

2. Diseño Metodológico

Para la ejecución de este proyecto se realizó una investigación descriptiva, en la que se analizaron las características solares del municipio de Toca-Boyacá y su posible aprovechamiento para un caso en particular, el de la finca 2 de la empresa Agrícola el Cactus S.A. Para esto se realizó un estudio de factibilidad y un diseño el cual se presentará en consideración de la empresa para ser evaluada su implementación. Esto se ejecutará en cuatro fases descritas a continuación:

2.1 Fase 1: Potencial de radiación

Identificar el potencial de radiación solar presente en la finca 2 de la empresa Agrícola el Cactus S.A, ubicada en Toca-Boyacá

En esta fase se pretende realizar una consulta del potencial de radiación en el cultivo

- Actividad 1.1: Ubicar la zona de incidencia mediante coordenadas de latitud y longitud.
- Actividad 1.2: Búsqueda en bases de datos que muestren el potencial de radiación de la zona de incidencia a través del tiempo.
- Actividad 1.3: Determinar la cantidad de energía incidente respecto a la zona principal del cultivo.

2.2 Fase 2: Definición de criterios técnicos

- Actividad 2.1: Definición del tipo de cultivo, características como humedad, temperatura etc.

-Actividad 2.2: Características del riego, en esta etapa se buscó dar a conocer datos como la potencia requerida del sistema y la frecuencia del riego.

-Actividad 2.3: Verificación de potencia necesaria, analizando los equipos presentes para así tener en cuenta el dimensionamiento eléctrico del sistema fotovoltaico, para el caso dos bombas trifásicas.

2.3 Fase 3: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

-Actividad 3.1: Dimensionar el número de paneles, este número se mantiene sujeto a la potencia necesaria y al consumo energético de las bombas usadas en la empresa.

-Actividad 3.2: Verificación de los diferentes tipos de inversores disponibles en el mercado para seleccionar el sistema idóneo en potencia y vida útil.

-Actividad 3.4: Realizar curvas de recurso energético y hacer un análisis entre la energía consumida y la energía generada por el sistema, para establecer posibles excedentes entregados al operador de red.

-Actividad 3.5: Realizar planos eléctricos y memorias de cálculo teniendo en cuenta los lineamientos establecidos por los entes respectivo.

2.4 Fase 4: Análisis de costos

-Actividad 4.1: Hacer una búsqueda de proveedores de equipos e infraestructura que permita entregar las mayores ventajas en costo beneficio.

-Actividad 4.2: Realizar un análisis de parámetros económicos con la implementación del sistema solar fotovoltaico de riego para la empresa el Cactus S.A.

-Actividad 4.3: Presentar el resultado del análisis del estudio de costos (Se presentan los resultados con cifras).

2.5 Fase 5: Diseño prototipo seguidor solar.

Actividad 5.1: Definir un prototipo que asemeje los movimientos de un seguidor solar basado en la simplicidad.

Actividad 5.2: Diseñar isométricos del cuerpo general del prototipo del seguidor mediante el software Inventor.

Actividad 5.3: Determinar los componentes del prototipo definido.

Actividad 5.4: Llevar a escala el prototipo para una comprensión didáctica de su funcionamiento.

3. Resultados

3.1 A. Fase 1: Potencial de radiación

3.1.1 Zona de Incidencia

El planteamiento del diseño del sistema fotovoltaico se realiza para la empresa agrícola el Cactus S.A, concretamente para la finca 2 ubicada en el municipio de Toca del departamento de Boyacá – Colombia, para tener la ubicación exacta se recurre a la información arrojada por el software UgCS Mapper, que ubico la zona con las coordenadas $5^{\circ}33'54.8''N$ y $-73^{\circ}12'01.3''W$.

Figura 3-1 Coordenadas agrícola Cactus.



Fuentes: Autores

3.1.2 Potencial de radiación en zona de incidencia

Existen diversas fuentes de consulta de donde se puede obtener el índice de radiación solar y el brillo solar de la zona en la que se desea desarrollar el proyecto, al consultar los estudios realizados en el país, se ha encontrado en la base datos del IDEAM (obtenida desde enero de 1992 hasta abril del 2012) que el municipio de Toca – Boyacá, tiene un brillo solar promedio anual de 5 h/día los resultados promedio mes a mes pueden observarse en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Promedio mensual de horas con brillo solar para el municipio de Toca – Boyacá.

Promedio mensual de horas con brillo solar para el municipio de Toca – Boyacá	
MES	Brillo solar (h/día)
Enero	6.9
Febrero	6.6
Marzo	5.1
Abril	4.1
Mayo	3.9
Junio	4.4
Julio	4.7
Agosto	4.6
Septiembre	4.4
Octubre	4.4
Noviembre	5.0
Diciembre	6.1

Fuente: Autores a partir de bases de datos IDEAM

Al revisar los datos arrojados por el IDEAM, se encuentra un mapa de radiación solar del país, lastimosamente este mapa solo muestra la ubicación exacta de las principales ciudades de cada departamento, por lo que averiguar el valor promedio de la radiación incidente en el municipio de Toca se vuelve una tarea compleja, es por esto que se recurre a la base de datos de GLOBAL SOLAR ATLAS y SOLARGIS, sitios web en el que proporcionando las coordenadas exactas del lugar a estudiar se pueden obtener valores históricos de la radiación solar de este. Dependiendo de la aplicación, pueden verse datos como el de irradiación solar, velocidad del viento, frecuencia de cielos cubiertos y otras variables de interés; para el desarrollo de este proyecto se mostrarán los datos obtenidos de irradiación global horizontal ya que es el parámetro más importante para la evaluación de potencial de energía solar en un lugar determinado.

Figura 3-2 Radiación solar y parámetros meteorológicos

Mes	GHI kWh/m ²	DNI kWh/m ²	DIF kWh/m ²	D2G	TEMP °C	WS m/s	CDD Grados día	HDD Grados día
Ene	182.6	192.7	59.4	0.326	13.2	1.4	3	152
Feb	167.3	159.1	59.4	0.355	13.5	1.5	4	131
Mar	172.9	133.5	78.2	0.452	13.7	1.4	3	139
Abr	143.8	97.5	77.1	0.537	13.7	1.4	1	131
May	147.0	104.5	78.9	0.537	13.6	1.6	1	139
Jun	141.7	108.2	73.9	0.521	13.0	1.8	0	150
Jul	150.4	116.1	76.2	0.507	12.6	1.9	0	169
Ago	150.7	109.5	79.7	0.529	12.6	1.9	0	169
Sep	145.8	103.0	77.7	0.533	13.0	1.8	1	153
Oct	147.9	108.9	76.3	0.516	13.3	1.4	1	149
Nov	141.7	115.8	67.9	0.479	13.5	1.3	1	137
Dic	164.5	163.3	62.9	0.382	13.4	1.4	2	145
Anual	1856.4	1512.2	867.6	0.467	13.2	1.6	17	1763

Fuente: Base de datos Global Solar Atlas.

Con los datos obtenidos anteriormente se realiza una tabulación mes a mes y anualmente, obteniendo un promedio de la irradiación global horizontal, datos esenciales que luego se utilizarán para determinar la cantidad de energía generada por el sistema fotovoltaico, en la tabla 3-2 se observa en detalle los valores mencionados.

Tabla 3-2. Irradiación global horizontal en kWh/m².

Irradiación Global Horizontal (GHI)	
MES	GHI (kW-h/m²)
Enero	182.6
Febrero	167.3
Marzo	172.9
Abril	143.8
Mayo	147.0
Junio	141.7
Julio	150.4
Agosto	150.7
Septiembre	145.8
Octubre	147.9
Noviembre	141.7
Diciembre	164.5
Anual	1856.3

Fuente: Autores a partir de bases de datos obtenidos en Solargis.

3.1.3 Energía incidente en la zona del cultivo

La empresa agrícola el “Cactus S.A” cuenta con un predio disponible de 3162 m² determinado por la ecuación 1 (Requena, 2014), a partir de la información mostrada en la fig. 3-3, que resulta ser una fotografía aérea tomada con un dron DJI Mavic Pro, en la cual se puede medir el área de interés usando el software PIXADmapper, de acuerdo a este dato y teniendo en cuenta parámetros técnicos se destinara dicho predio para llevar acabo el estudio y diseño necesario para la instalación de los paneles fotovoltaicos, el área en mención no se ocupara en su totalidad por tal motivo quedara disponible una zona restante que se puede usar a futuro para una posible ampliación del sistema.

Figura 3-3 Medidas zona disponible para instalación de paneles solares.



Fuente: Autores

$$A_{predio} = \frac{L_1 * H_1}{2} + \frac{L_2 * H_2}{2} \quad (1)$$

$$A_{predio} = \frac{42,72 * 73,60}{2} + \frac{44,05 * 72,18}{2} = 3162 \text{ m}^2$$

Adicional a esto, una vez se haya definido el área ocupada por los módulos fotovoltaicos, la cual depende de la cantidad de paneles a utilizar y el área por unidad de cada módulo, esta se sobredimensionará un 30% por criterios técnicos, debido a que este tipo de proyectos requieren accesos y espacios amplios para la ejecución de mantenimiento y atención a posibles contingencias.

Por otra parte con los datos obtenidos en la tabla 3-2, y teniendo en cuenta que geográficamente Colombia se encuentra cerca de la línea del ecuador, se empleara como uno de los parámetros el promedio anual de irradiación global horizontal (GHI), dato necesario para el

cálculo de producción de energía solar fotovoltaica del sistema, la cual se calculara mediante la ecuación 2 (Cantos, 2016), otro dato importante es el Pr (Coeficiente por perdidas) con este evaluamos el rendimiento aproximado de la instalación, este estimara las diferentes perdidas que se pueden presentar en el sistema, pueden ser perdidas por temperatura en las celdas, bajo rendimiento del inversor, polvo, partículas y suciedad en los módulos, generalmente oscilan entre 0,7 y 0,8 para este caso se considerara un valor de 0,775, lo único que resta para determinar la producción de energía es la potencia pico del generador fotovoltaico, se obtendrá una vez determinada la cantidad de paneles necesarios y su respectiva potencia seleccionando el más acorde según su especificaciones técnicas .

$$E_p = \frac{P_{mp} * Pr * G_{da}(\alpha, \beta)}{G_{cem}} \quad (2)$$

Donde:

*Pmp = Potencia pico del generador fotovoltaico ($W_{panel} * N^{\circ}$ Paneles)*

Gda(α, β) = Irradiación global horizontal (promedio anual)

Pr = Coeficiente por perdidas

Gcem = 1 kW/m²

3.2 B. Fase 2: Definición de criterios técnicos

3.2.1 Características del cultivo

La finca 2, de la empresa Agrícola el Cactus S.A, ubicada en el municipio de Toca – Boyacá, está destinada exclusivamente al cultivo de claveles, estos son de las variedades Don Pedro, Icaro, Red Magic, Daniko, Grandsole, Moonlight, Sinfonia, ilusión, Ikebana, Mandalay, Zeppelin, Hermes, Lumier, Hermes Orange, Orange Triumph, Caroline Gold, Rodas, Eco, Novia, Te de Manzana, Farida, Farieta, Zurigo e Hipnosis. Es de vital importancia tener controlada la temperatura dentro de los viveros, pues en el cultivo de claveles se requiere que esta oscile entre los 8°C y los 25 °C, ya que mantener temperaturas fuera de las nombradas en el rango disminuye la producción del cultivo y se presentarían problemas como alteraciones en la velocidad del crecimiento, altura de las flores, capacidad reproductiva, contenido de agua y duración de la vida postcosecha de la flor cortada.

El rango óptimo de humedad relativa para este cultivo oscila entre el 60-70%. Una humedad relativa fuera del rango indicado puede traer la aparición de enfermedades en la flor (si está por encima) o puede presentarse el desecamiento de la planta y la incidencia de araña roja (si se está por debajo). Este cultivo prefiere riegos cortos y frecuentes, por lo que el método de riego adecuado es el riego por goteo. Los aportes de agua dependen de la época y del sustrato. No obstante, es importante que el sustrato se encuentre húmedo en todo momento (evitando el encharcamiento). Un déficit de riego influye negativamente en el desarrollo y calidad de la flor, así como en el crecimiento de las hojas. En estas condiciones, las hojas son de menor tamaño y consistencia. Por el contrario, un exceso de riego provoca clorosis generalizada en la planta

Es por esto que en Agrícola el Cactus S.A, se tienen rangos de temperatura que pueden ser inferiores o iguales a 15°C o incluso llegar a ser de 24°C o más, dependiendo de la nubosidad de la zona. Sin embargo, este rango de temperatura no afectará de ninguna manera el tiempo de duración del riego, variando según se muestra en la tabla 3-3 intensidad diaria y la hora del día en que debe realizarse. Adicional a esto se tiene instalado un sistema de riego por goteo, sistema ideal para este cultivo y que no necesita la modificación en su estructura base.

Tabla 3-3. Hora de riego según rango de temperatura.

# RIEGO	RANGO DE TEMPERATURA		
	$T \leq 15^{\circ}\text{C}$	$15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 24^{\circ}\text{C}$	$24^{\circ}\text{C} \leq T$
1	6:15 am	6:15 am	6:15 am
2	11:30 am	9:30 am	9:00 am
3	--	12:00 pm	11:30 am
4	3:00 pm	3:00 pm	1:30 pm
5	--	--	3:30 pm

Fuente: Autores con datos de Agrícola Cactus S.A.

3.2.2 Características de riego

Potencia requerida para alimentación de equipos de riego existentes

Actualmente en la finca 2, de la empresa Agrícola el Cactus S.A ubicada en Toca – Boyacá, se tienen en funcionamiento dos bombas usadas para el riego, la principal de 12 HP / 9 kW cuya placa característica puede verse en la Fig. 3-4, esta bomba es usada según los valores de temperatura y humedad descritos en los títulos anteriores, generalmente su tiempo de trabajo es de 5 am a 5 pm, y la secundaria, usada en los momentos en que el lago artificial usado para la recolección de aguas lluvia está por debajo del nivel mínimo de agua permitido, esta bomba tiene una potencia de 5 HP / 3.7 kW, su tiempo de trabajo diario en promedio es de 6 horas y su placa característica puede verse en la Fig. 3-5.

Figura 3-4 Placa característica de bomba de riego principal



Fuente: Autores

Figura 3-5 Placa característica de bomba de pozo profundo



Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la potencia de cada una de las bombas y su respectivo tiempo de funcionamiento durante el día, se elaboró un cuadro de cargas, este con el fin de estimar un consumo energético promedio y corroborar una relación similar con los costos facturados por la empresa de energía de Boyacá S.A E.S.P. estos datos se detallan en la tabla 3-4.

Tabla 3-4. Estimación de consumo energético promedio.

EQUIPO	POTENCIA (W)	CANTIDAD (und)	HORAS DE USO AL DIA APROX	CONSUMO DIARIO PROMEDIO (W-h/día)
Bomba Principal	8948	1	12	107376
Bomba Secundaria	3728	1	6	44736
Energía total consumida (simultáneamente) (Wh/día)				151752
Energía total consumida (simultáneamente) (kWh/día)				151.7

Fuente: Autores

Adicionalmente, gracias a información recolectada con las empresas Agrícola el Cactus S.A y EBSA E.S.P, se logró conocer el histórico de consumos mes a mes de las bombas principal y de pozo profundo (Anexo A y B respectivamente), con esta información se sacaron datos promedios de todos los meses, estos datos se observan en la tabla 3-5, además se tiene el total de consumo anual en la tabla 3-6.

Tabla 3-5. Promedios de consumo mensual en cultivo hechos con datos del año 2018 a 2021.

PROMEDIOS DE CONSUMO MENSUAL (kWh)			
MES	BOMBA PRINCIPAL	BOMBA POZO PROFUNDO	TOTAL
Ene	2548	1532	4080
Feb	2428	1941	4369
Mar	2699,25	1920	4619,25
Abr	2492,25	2477,75	4970
May	1951	1565,75	3516,75
Jun	1738	2376,75	4114,75
Jul	2073,5	1531,25	3604,75
Ago	2655	1964,333333	4619,333333
Sep	2457	1947,333333	4404,333333
Oct	2428,666667	1446,333333	3875
Nov	2605,666667	2621	5226,666667
Dic	2864,333333	1741,333333	4605,666667
PROMEDIO MENSUAL	2411,722222	1922,069444	4333,791667

Fuente: Autores

Tabla 3-6. Total de consumos Periodos del 2018 a 2021.

CONSUMO ANUAL (kWh)			
AÑO	BOMBA PRINCIPAL	BOMBA POZO PROFUNDO	TOTAL
2018	28552	20674	49226
2019	33917	24770	58687
2020	27036	23307	50343
2021	13247	13788	27035

Fuente: Autores

Gracias a los datos registrados en las tablas 3-5 y 3-6, se debe generar mínimo 58687 kWh en el año, ya que es este el año en que más potencia se consumió en el periodo analizado. Teniendo en cuenta el consumo anual promedio más elevado, se tendría 4890.6 kWh de consumo mensual y 161 kWh en el día, valor por encima del promedio mensual de consumo, aunque inferior al

promedio consumido en el mes de abril y noviembre. Debe pensarse en que la empresa tendrá un crecimiento en el tiempo que dure la vida útil de la instalación solar, lamentablemente con los datos recogidos por la empresa de energía de Boyacá no puede hacerse un pronóstico adecuado de crecimiento pues los años 2020 y 2021 estuvieron afectados por una pandemia que freno las exportaciones, por esto se escogerá un inversor que tenga una potencia mayor a la requerida, así si es necesario se podrá aumentar la capacidad del sistema, teniendo en cuenta que la mayoría de fabricantes recomiendan llevar la potencia de paneles a 1.2 veces la potencia del inversor.

3.2.3 Verificación de potencia necesaria a asegurar en paneles

De acuerdo a la información procesada anteriormente, se tiene que deben asegurarse 161 kWh/día para suplir las necesidades de potencia que requiere el sistema. Adicionalmente gracias a la información obtenida por la base de datos Global Solar Atlas se define la irradiación global horizontal (GHI) promedio en el municipio de Toca – Boyacá de 5,08 kWh/m² por día, dato que podemos encontrar en la figura 3-6. Con base en lo anterior podemos calcular las Horas Solares Pico (HSP), valor que proporciona una hipotética irradiancia solar de 1000 W/m² en unas condiciones de medida estándar (STC), para establecer las HSP del municipio de Toca, se utiliza la ecuación 3 (Cantos, 2016).

$$HSP = \frac{Gd(\alpha, \beta)}{G_{cem}} \quad (3)$$

Donde:

$Gd(\alpha, \beta)$ = Irradiación global horizontal diaria

G_{cem} = Potencia de radiación incidente en $\frac{W}{m^2}$ para las STC , siendo su valor 1000W/m²

Figura 3-6 Irradiación global horizontal por día, Fuente base de datos Global Solar atlas.

Map data		Per day ▾	
Direct normal irradiation	DNI	4.099	kWh/m ² per day ▾
Global horizontal irradiation	GHI	5.088	kWh/m ² per day ▾
Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.368	kWh/m ² per day ▾
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI _{opta}	5.137	kWh/m ² per day ▾
Optimum tilt of PV modules	OPTA	10 / 180	°
Air temperature	TEMP	13.3	°C ▾
Terrain elevation	ELE	2714	m ▾

Fuente: Global Solar Atlas

Resolviendo la ecuación 3, obtenemos.

$$HSP = \frac{5,08 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * \text{dia}}}{1 \text{ kW/m}^2}$$

$$HSP = 5,08 \frac{h}{\text{dia}}$$

Una vez desarrollada la ecuación 3, se establece el promedio de HSP de 5 h por día, por lo tanto, escogiendo un panel cuya relación generación / precio parezca apropiada y siguiendo la ecuación 4 (Espitia, 2017), se podrá tener el número de paneles necesarios en la instalación.

$$N_{\text{paneles}} = \frac{\text{Energia necesaria (kw-h)}}{HSP * \text{Rendimiento trabajo} * P_{\text{Max modulo}}} \quad (4)$$

3.3 C. Fase 3: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

3.3.1 Cálculo de paneles a usar

Después de revisar los paneles presentes en el mercado colombiano, cuya ficha técnica se encuentran en el Anexo C1, se llegó a escoger un panel de 445 Wp, marca Jinko, modelo JKM445M-72HLM-V, este panel es ofrecido por la empresa Solar Tex con un costo de \$819.000 M/CTE; para resolver la ecuación 4 se toma un valor de rendimiento de trabajo de 0.7 si se considera un sistema solar fotovoltaico con inversor y de 0.6 si se considera el sistema con inversor, regulador y baterías (Santamaria y Castejón, 2011).

$$N_{\text{paneles}} = \frac{161 (kW - h)}{5 * 0.7 * 0,445kW}$$

$$N_{\text{paneles}} = 103.3$$

Puesto que se necesita de un numero entero para determinar paneles necesarios se aproxima al valor cercano dado por la ecuación, en tal caso se establecen 103 paneles.

Inicialmente se calcularán los paneles con un rendimiento de 0.7, pues es más económico montar un sistema al que no se le agrega un banco de baterías, con esto y siguiendo la ecuación 4 se tiene que deben usarse 103 paneles solares, si no se tuviese en cuenta esta eficiencia de trabajo sería suficiente con usar solo 72 paneles. En la ficha técnica de estos paneles se especifica que se tiene una tensión en potencia máxima de 41.17 V y una corriente en potencia máxima de 10.81 A.

3.3.2 Selección de inversor idóneo

Definido lo anterior, se procede a calcular la potencia del inversor a usar en la instalación, debe resaltarse que se seleccionará un inversor con algo más de capacidad que la obtenida pues puede crecer la demanda de energía y debe tenerse en cuenta una posible ampliación del sistema. La ecuación 5 (Espitia, 2017) calcula la potencia necesaria en el inversor.

$$P_{inversor} = P_{panel} * N^{\circ}_{paneles} \quad (5)$$

$$P_{inversor} = 0,445 \text{ kW} * 103$$

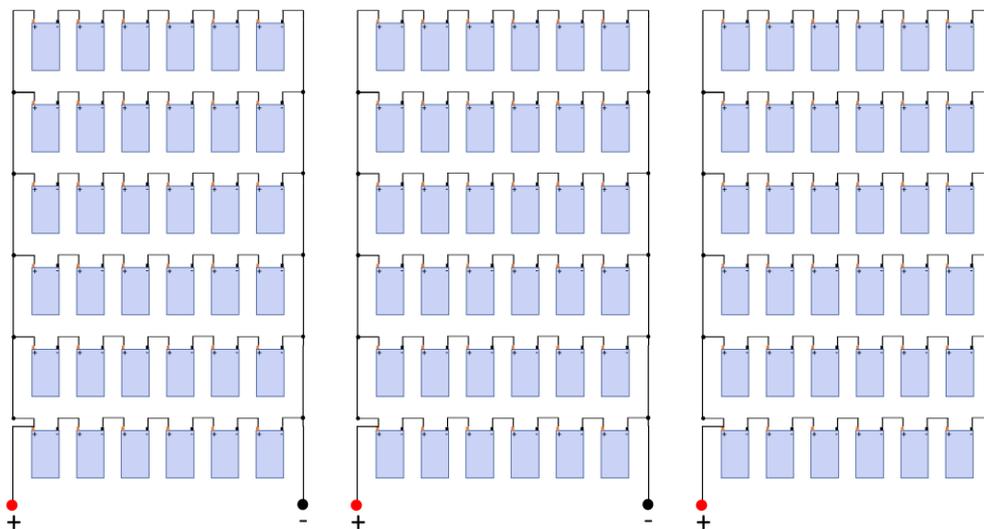
$$P_{inversor} = 45.835 \text{ kW}$$

Dando esto como resultado una potencia de inversor necesaria de 45.835 kW, por esto se escogerá un inversor de 50 kW. Revisando los inversores presentes en el mercado, se ha escogido un inversor CPS, referencia SCA50KTL-DO/U

S-480, cuya ficha técnica se encuentra en el anexo C2. La empresa proveedora de este inversor es Solar Tex, con un costo de \$ 23.270.000 M/CTE.

De acuerdo a la ficha técnica y el manual de instalación de este inversor (Contenidos en el anexo C2), se cuentan con 5 entradas DC, conectadas internamente en paralelo, estas 5 entradas están presentes por cada fase del inversor, debe asegurarse un suministro de tensión mínimo de 200 V y máximo de 1000 V, con una corriente de 60 A por fase. Es por esto que debe hacerse un arreglo o string de 6 paneles conectados en serie, que a su vez se conectaran con 6 ramificaciones idénticas en paralelo, esto se hará en cada fase, dando como resultado un total verdadero de 108 paneles, que en su máximo funcionamiento generan 48.060 kW, valor aún inferior al de la potencia máxima permitida por el inversor. El arreglo de paneles propuesto puede verse en la Fig. 3-7.

Figura 3-7 Esquema de conexión para paneles solares por fase



Fuente: Autores

Considerando cada entrada de Rastreador de Punto de Máxima Potencia (MPPT), se conectará cada uno de los arreglos de los paneles propuesto en la figura 3-7. Teniendo finalmente una tensión de entrada de 247 V y 64.86 A por cada MPPT y finalmente 247 V y 194.58 A en la entrada del inversor cuando los paneles trabajen a su máxima potencia.

3.3.3 Analizar la energía consumida y la energía generada por el sistema.

Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del panel y el inversor ya seleccionados, se contemplan los parámetros necesarios para determinar la cantidad de energía producida por el sistema, seguidamente, se procede a resolver la ecuación 2, la cual se definió en la fase 2.

$$E_p = \frac{P_{mp} * P_r * G_{da}(\alpha, \beta)}{G_{cem}} \quad (2)$$

Donde:

$Pmp = \text{Potencia pico del generador fotovoltaico } (W_{panel} * N^{\circ} \text{ Paneles})$

$Gda(\alpha, \beta) = \text{Irradiación global horizontal (promedio anual)}$

$Pr = \text{Coeficiente por perdidas } (0,775)$

$Gcem = 1 \text{ kWh/m}^2$

$$Ep = \frac{(0,445 \text{ kW} * 108 * 0,775 * 1856,3 \text{ kWh/m}^2)}{1 \text{ kW/m}^2}$$

$$E = 69.140 \text{ kWh}$$

Una vez resuelta la ecuación anterior se determina que el sistema va a generar anualmente 69.140 kWh, cubriendo el consumo energético promedio anual más elevado basados en la facturación por parte del operador de red, en este caso Empresa de Energía de Boyacá, dicho valor se estipulo anteriormente en la tabla 3-6.

Por otra parte, se elabora una tabla donde se analiza el comportamiento mensual de la energía generada respecto a la energía consumida, corroborando que el sistema fotovoltaico suministre la energía necesaria para este caso en particular, los datos consignados se observan en la tabla 3-7.

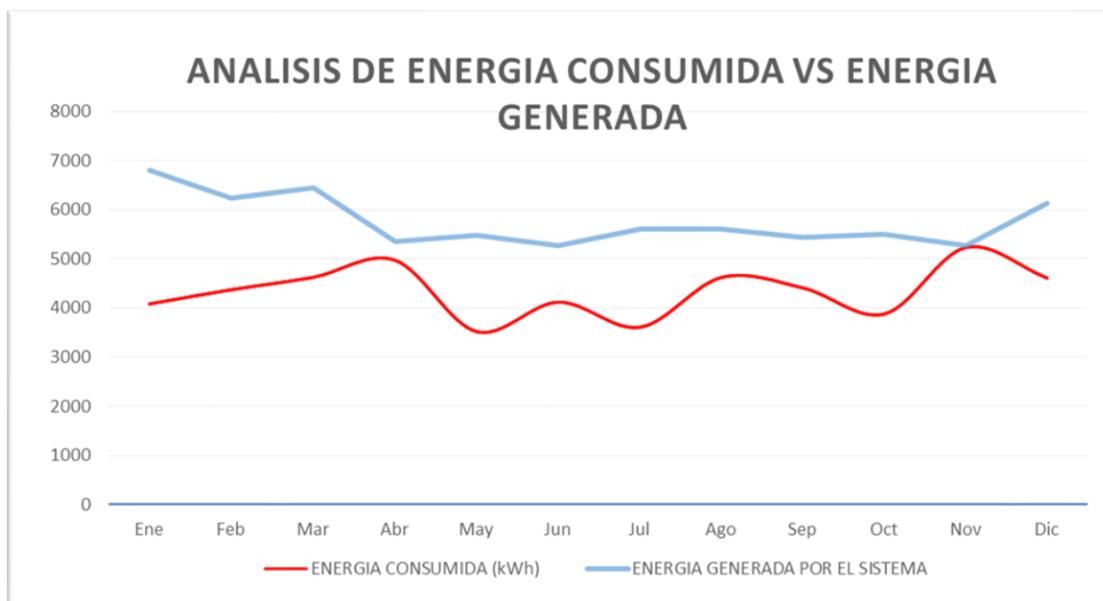
Tabla 3-7. Análisis de energía.

ANÁLISIS DE ENERGIA			
MES	ENERGIA CONSUMIDA (kWh)	ENERGIA GENERADA POR EL SISTEMA	EXCEDENTE
Ene	4080	6801,2	2721,2
Feb	4369	6231,3	1862,3
Mar	4619,2	6439,9	1820,7
Abr	4970	5356,0	386,0
May	3516,7	5475,2	1958,5
Jun	4114,7	5277,8	1163,1
Jul	3604,7	5601,9	1997,2
Ago	4619,3	5613,0	993,7
Sep	4404,3	5430,5	1026,2
Oct	3875	5508,8	1633,8
Nov	5226,6	5277,8	51,2
Dic	4605,6	6127,0	1521,4
TOTAL	52005,1	69140,7	17135,6

Fuente: Autores

Con base a los valores registrados en la tabla 3-7, se realiza la figura 3-8 donde se indican las curvas de energía generada y energía consumida.

Figura 3-8 Análisis de energía



Fuente: Autores

En la Fig. 3-8 se puede ver un resumen de la información consignada en la tabla 3-7, se aprecia como la energía producida por el sistema es superior a la energía consumida en todos los meses del año, en tales circunstancias donde la energía consumida es menor que la generada, el beneficio del usuario se ve en el ahorro que dejó de consumir de la red y de la venta en entrega de excedentes, cuyo valor es establecido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), realizando una diferencia entre los valores anuales de energía generada y consumida, se tiene una entrega de excedentes de 17.135 kW cada año, valor esencial para el estudio de costos realizado posteriormente.

3.3.4 Realizar planos eléctricos y memorias de cálculo teniendo en cuenta los lineamientos establecidos por los entes respectivos.

Teniendo en cuenta el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050) se considera una instalación especial aquellas que por estar situadas en ambientes peligrosos o por alimentar equipos o sistemas complejos aumenta su riesgo en comparación a una instalación básica, y necesitan de una medida especial para evitar dichos riesgos. Una de estas instalaciones son los sistemas solares fotovoltaicos que, al clasificarse dentro este grupo, deben cumplir con ciertos requisitos entre ellos presentar un diseño que incluye planos eléctricos y contemplar los ítems de un diseño detallado para la elaboración de memorias de cálculo, debido al extenso desarrollo de estos parámetros, se estipulan y se da solución debidamente en el anexo G y en el anexo H.

D. Fase 4: Análisis de costos.

Con el siguiente análisis se estimará algunos parámetros económicos como son VNA (Valor neto actual), TIR (Tasa interna de retorno) y periodo de recuperación de la inversión.

3.4.1 Costo total de instalación del proyecto.

Una vez analizado las propuestas se tomó la más acertada y ajustada a las necesidades de la empresa el cactus S.A y si se llegara a ejecutar se negociaría con la empresa la instalación, operación y mantenimiento del sistema solar fotovoltaico.

La inversión inicial para ejecutar la instalación del sistema solar fotovoltaico se estableció a partir de la sumatoria de los componentes necesarios para el funcionamiento del mismo, los

cuales se resumen y presentan de conformidad a los precios indicados en la cotización del anexo

F. La inversión inicial del proyecto se detalla en la tabla 3-8.

Tabla 3-8. Valor de la Inversión.

VALOR DE LA INVERSIÓN				
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	Panel fotovoltaico 156 celdas 445W + 3% Jinko solar	108	818.000	88.344.000
2	Inversor CPS SCA50KTL-DO/US-480	1	23.270.000	23.270.000
3	Tablero eléctrico en DC con protección DPS, IP=65	1	6.318.000	6.318.000
4	Tablero eléctrico en AC con protección DPS, IP=65	1	6.324.750	6.324.750
5	Contador bidireccional	1	1.655.933	1.655.933
6	Cables: Potencia 4x12 awg x 30m encauchetado, control x 6mt, fotovoltaico x 20mt	1	1.506.530	1.506.530
7	Estructura en aluminio para módulos con sistema de puesta a tierra	50	1.002.456	50.122.800
8	Protecciones eléctricas y ductos	1	5.211.000	5.211.000
9	Trámite O.R			2.906.250
10	Diseño e instalación transporte			26.600.000
SUBTOTAL				212.259.263
IVA 19%				19.122.600
TOTAL				231.381.863

Fuente: Autores.

3.4.2 Costo anual de mantenimiento y depreciación del proyecto

Los sistemas solares fotovoltaicos se encuentran expuestos a diferentes agentes externos e internos como: la polución, cambios de temperatura, falsos contactos que puedan afectar el correcto funcionamiento; por esto es importante implementar un buen mantenimiento de las instalaciones. Para este caso se realizará mantenimiento a partir del primer año de ejecución y puesta en marcha del sistema por un valor de \$4'200.000, el cual tendrá un incremento anual del acumulado del IPC durante la vida aprovechable o funcional del sistema.

Tabla 3-9. Costo anual de mantenimiento.

COSTO MANTENIMIENTO POR AÑO	
AÑO	VALOR
1	4.200.000
2	4.326.000
3	4.455.780
4	4.589.453
5	4.727.137
6	4.868.951
7	5.015.020
8	5.165.470
9	5.320.434
10	5.480.047
11	5.644.449
12	5.813.782
13	5.988.196
14	6.167.842
15	6.352.877
16	6.543.463
17	6.739.767
18	6.941.960
19	7.150.219
20	7.364.725
21	7.585.667
22	7.813.237
23	8.047.634
24	8.289.063
25	8.537.735
TOTAL	\$ 153.128.910

Fuente: Autores

El costo de mantenimiento para el primer año se basa en el valor incluido en la cotización de Solar Efficiency (ver anexo F) y para los años siguientes resulta de multiplicarlo por el IPC (3%) estimado para el estudio financiero del proyecto solar.

La depreciación es un método mediante el cual se reconoce contable y/o financieramente el desgaste y pérdida de valor que sufre un bien o un activo por el uso que se haga de éste con el paso del tiempo. (gerencie.com,2016)

Existen varios métodos para realizar el cálculo de la depreciación, para este proyecto se utilizó el procedimiento de la suma de los dígitos del año cuyo objetivo es determinar un mayor valor de depreciación en los primeros años de vida útil del activo.

Según (Espitia, 2017) el cálculo de la depreciación se realiza de la siguiente manera:

1. Año: enumerar los años de vida útil.
2. Inverso: enumerar los años de vida útil al inverso (de último año al primero).
3. Factor de depreciación (FD): dividir cada dígito de la columna Inverso por el resultado de la suma de los años de vida útil (325).
4. Depreciación anual: multiplicar el FD por el valor inicial del proyecto.
5. Valor Residual: Valor Residual anterior menos la depreciación del año.
6. Depreciación Acumulada: valor acumulado de la depreciación de cada año.

Tabla 3-10. Cálculo de depreciación.

Cálculo de la depreciación - método suma de los dígitos					
Año	Inverso	FD	Depreciación anual	Valor residual	Depreciación acumulada
				115.690.931,50	
1	25	0,08	8.899.302,42	106.791.629,08	8.899.302,42
2	24	0,07	8.543.330,33	98.248.298,75	17.442.632,75
3	23	0,07	8.187.358,23	90.060.940,52	25.629.990,98
4	22	0,07	7.831.386,13	82.229.554,39	33.461.377,11
5	21	0,06	7.475.414,04	74.754.140,35	40.936.791,15
6	20	0,06	7.119.441,94	67.634.698,42	48.056.233,08
7	19	0,06	6.763.469,84	60.871.228,57	54.819.702,93
8	18	0,06	6.407.497,74	54.463.730,83	61.227.200,67
9	17	0,05	6.051.525,65	48.412.205,18	67.278.726,32
10	16	0,05	5.695.553,55	42.716.651,63	72.974.279,87
11	15	0,05	5.339.581,45	37.377.070,18	78.313.861,32
12	14	0,04	4.983.609,36	32.393.460,82	83.297.470,68
13	13	0,04	4.627.637,26	27.765.823,56	87.925.107,94
14	12	0,04	4.271.665,16	23.494.158,40	92.196.773,10
15	11	0,03	3.915.693,07	19.578.465,33	96.112.466,17
16	10	0,03	3.559.720,97	16.018.744,36	99.672.187,14
17	9	0,03	3.203.748,87	12.814.995,49	102.875.936,01
18	8	0,02	2.847.776,78	9.967.218,71	105.723.712,79
19	7	0,02	2.491.804,68	7.475.414,04	108.215.517,46
20	6	0,02	2.135.832,58	5.339.581,45	110.351.350,05
21	5	0,02	1.779.860,48	3.559.720,97	112.131.210,53
22	4	0,01	1.423.888,39	2.135.832,58	113.555.098,92
23	3	0,01	1.067.916,29	1.067.916,29	114.623.015,21
24	2	0,01	711.944,19	355.972,10	115.334.959,40
25	1	0,00	355.972,10	0,00	115.690.931,50

Fuente: Autores.

3.4.3 Ahorro en dinero pagado al operador de red.

El ahorro corresponde al valor de la energía generada por el sistema Solar fotovoltaico, la cual asciende a 69.141 kWh (tabla 3-7) y está conformada por el autoconsumo y los excedentes, clasificándose como Generador Distribuido (GD) con capacidad instalada o nominal de generación menor a 1MW y que se encuentra instalada cerca de los centros de consumo, conectada al Sistema de Distribución Local (SDL). Para efectos económicos se puede establecer que el porcentaje de

degradación corresponde al 0,7% anual, teniendo en cuenta que se realiza mantenimiento con la misma periodicidad que previene un mayor desgaste. Cabe resaltar que la exportación y venta de energía está regulada por la resolución CREG 174 de 2021.

Tabla 3-11. Relación energía consumida y excedentes del sistema solar fotovoltaico.

Energía consumida y excedentes por año expresada en kWh					
Año	% Degradación	Energía de consum	Tarifa	Excedentes	Tarifa
1	100%	52.006	685	17.135	200
2	99,30%	51.641	705	17.015	206
3	98,60%	51.277	727	16.895	212
4	97,90%	50.913	748	16.775	219
5	97,20%	50.549	771	16.655	225
6	96,50%	50.185	794	16.535	232
7	95,80%	49.821	818	16.416	239
8	95,10%	49.457	842	16.296	246
9	94,40%	49.093	867	16.176	253
10	93,70%	48.729	894	16.056	261
11	93,00%	48.365	920	15.936	269
12	92,30%	48.001	948	15.816	277
13	91,60%	47.637	976	15.696	285
14	90,90%	47.273	1006	15.576	294
15	90,20%	46.909	1036	15.456	303
16	89,50%	46.545	1067	15.336	312
17	88,80%	46.181	1099	15.216	321
18	88,10%	45.817	1132	15.096	331
19	87,40%	45.453	1166	14.976	340
20	86,70%	45.089	1201	14.856	351
21	86,00%	44.725	1237	14.736	361
22	85,30%	44.361	1274	14.616	372
23	84,60%	43.997	1312	14.496	383
24	83,90%	43.633	1352	14.376	395
25	83,20%	43.269	1392	14.256	407

Fuente: Autores

Figura 3-9 Valor kWh agosto 2021.

SECTOR NO RESIDENCIAL										
CONCEPTO	EBSANT 1		USUARIO NT 1		NT 2		NT 3		NT 4	
	Comercial Industrial	Oficial Especial								
ACTIVA	755,2729	629,3941	684,8093	570,6744	612,2630	510,2192	562,2346	468,5288	510,8591	425,7159
REACTIVA	232,4108	193,6757	158,8198	132,3498	149,5408	124,6173	112,9895	94,1579	32,0348	26,6957
ACTIVA A.P.	547,1270									
* CS para alturas < a 1.000 MSNM			173		kWh					
* CS para alturas >= a 1.000 MSNM			130		kWh					

Fuente: Empresa de Energía de Boyacá

Tabla 3-12. Valores que no se cancelaron al operador de red.

Valor de la energía no pagada al operador de red expresado en COP			
Año	Energía de autoconsumo	Venta de excedentes	Total
1	35.613.850	3.427.036	39.040.886
2	36.425.490	3.505.138	39.930.628
3	37.253.775	3.584.842	40.838.617
4	38.098.975	3.666.174	41.765.149
5	38.961.358	3.749.159	42.710.517
6	39.841.196	3.833.823	43.675.019
7	40.738.758	3.920.194	44.658.952
8	41.654.317	4.008.296	45.662.613
9	42.588.144	4.098.156	46.686.300
10	43.540.513	4.189.800	47.730.313
11	44.511.694	4.283.254	48.794.948
12	45.501.959	4.378.545	49.880.505
13	46.511.580	4.475.699	50.987.279
14	47.540.827	4.574.741	52.115.567
15	48.589.968	4.675.697	53.265.664
16	49.659.270	4.778.593	54.437.863
17	50.749.000	4.883.455	55.632.455
18	51.859.420	4.990.309	56.849.728
19	52.990.791	5.099.178	58.089.969
20	54.143.371	5.210.088	59.353.459
21	55.317.414	5.323.063	60.640.477
22	56.513.171	5.438.128	61.951.299
23	57.730.887	5.555.306	63.286.193
24	58.970.805	5.674.620	64.645.425
25	60.233.160	5.796.094	66.029.253
TOTAL	1.175.539.692	113.119.386	1.288.659.078

Fuente: Autores

3.4.4 Flujo de Caja, Retorno de la inversión, VAN y TIR

Teniendo en cuenta que el flujo de caja hace referencia a las entradas y salidas netas de dinero que tiene un proyecto en un determinado periodo; se calcula la diferencia correspondiente al valor del flujo de caja por cada periodo, precisando que el consumo y los excedentes representan ingresos y el mantenimiento y depreciación representan gastos.

Tabla 3-13. Flujo de Caja.

FLUJO DE CAJA					
Año	INGRESOS		GASTOS		SALDO
	Energía de autoconsumo	Venta de excedentes	Mantenimiento	Depreciación	
1	35.613.850	3.427.036	4.200.000	8.899.302	25.941.584
2	36.425.490	3.505.138	4.326.000	8.543.330	27.061.298
3	37.253.775	3.584.842	4.455.780	8.187.358	28.195.479
4	38.098.975	3.666.174	4.589.453	7.831.386	29.344.309
5	38.961.358	3.749.159	4.727.137	7.475.414	30.507.966
6	39.841.196	3.833.823	4.868.951	7.119.442	31.686.626
7	40.738.758	3.920.194	5.015.020	6.763.470	32.880.462
8	41.654.317	4.008.296	5.165.470	6.407.498	34.089.645
9	42.588.144	4.098.156	5.320.434	6.051.526	35.314.340
10	43.540.513	4.189.800	5.480.047	5.695.554	36.554.712
11	44.511.694	4.283.254	5.644.449	5.339.581	37.810.918
12	45.501.959	4.378.545	5.813.782	4.983.609	39.083.113
13	46.511.580	4.475.699	5.988.196	4.627.637	40.371.446
14	47.540.827	4.574.741	6.167.842	4.271.665	41.676.061
15	48.589.968	4.675.697	6.352.877	3.915.693	42.997.095
16	49.659.270	4.778.593	6.543.463	3.559.721	44.334.679
17	50.749.000	4.883.455	6.739.767	3.203.749	45.688.939
18	51.859.420	4.990.309	6.941.960	2.847.777	47.059.992
19	52.990.791	5.099.178	7.150.219	2.491.805	48.447.945
20	54.143.371	5.210.088	7.364.725	2.135.833	49.852.901
21	55.317.414	5.323.063	7.585.667	1.779.860	51.274.950
22	56.513.171	5.438.128	7.813.237	1.423.888	52.714.173
23	57.730.887	5.555.306	8.047.634	1.067.916	54.170.643
24	58.970.805	5.674.620	8.289.063	711.944	55.644.417
25	60.233.160	5.796.094	8.537.735	355.972	57.135.546
TOTAL	1.175.539.692	113.119.386	153.128.910	115.690.932	1.019.839.237

Fuente: Autores

Retorno de la inversión. El análisis de este indicador se realiza para tener un panorama aproximado del tiempo que se tardará en recuperar la inversión inicial del proyecto. El retorno de la inversión es una herramienta útil para la toma de decisiones relacionada con la aceptación de proyectos en función del plazo de recuperación de la inversión inicial.

Se calcula el retorno de la inversión sumando los flujos de caja hasta el momento que se aproxime al valor de la inversión inicial.

Tabla 3-14. Retorno de la inversión

Retorno de la inversión		
Año	Flujo de Caja	Saldo
0	-\$ 231.381.863	-\$ 231.381.863
1	25.941.584	-205.440.279
2	27.061.298	-178.378.982
3	28.195.479	-150.183.503
4	29.344.309	-120.839.194
5	30.507.966	-90.331.228
6	31.686.626	-58.644.602
7	32.880.462	-25.764.140
8	34.089.645	8.325.505
9	35.314.340	43.639.845
10	36.554.712	80.194.557
11	37.810.918	118.005.475
12	39.083.113	157.088.588
13	40.371.446	197.460.034
14	41.676.061	239.136.094
15	42.997.095	282.133.189
16	44.334.679	326.467.868
17	45.688.939	372.156.807
18	47.059.992	419.216.799
19	48.447.945	467.664.744
20	49.852.901	517.517.645
21	51.274.950	568.792.595
22	52.714.173	621.506.768
23	54.170.643	675.677.410
24	55.644.417	731.321.828
25	57.135.546	788.457.374
TOTAL	1.019.839.237	5.785.181.198

Fuente: Autores

Figura 3-10 Retorno de la Inversión.



Fuente: Autores.

Según se observa en la figura 3-10, después del año 8° de ser instalado el sistema fotovoltaico, se empieza a recuperar la inversión inicial, por lo tanto, los flujos de caja acumulados empiezan a ser positivos para el resto de tiempo de 25 años de vida útil del proyecto.

VPN (Valor Presente Neto). Es un indicador para determinar si el proyecto es viable desde el punto de vista económico, ya que trae a valor actual en pesos los ingresos (+) y los egresos (-). Es el valor medido en pesos de hoy o el equivalente en pesos actuales de todos los ingresos y egresos presentes y futuros que constituyen el proyecto. Este indicador permite saber el valor actual del proyecto teniendo en cuenta diferentes tiempos de financiación.

- Si el $VPN > 0$, el proyecto es viable. El proyecto generara ganancias y la inversión se acepta.

- Si el $VPN < 0$, el proyecto no es viable, los ingresos son menores que los egresos. El proyecto genera pérdidas, la inversión se rechaza.

- Si el $VPN = 0$, Los ingresos son iguales a los egresos, es indiferente el proyecto. Según (Espitia, 2017), para determinar el VPN del proyecto se usa la ecuación 6.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_o \quad (6)$$

Donde,

V_t : Representa los flujos de caja en cada periodo t .

I_o : Es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n : Es el número de períodos considerado.

k : la tasa de descuento (la tasa de rendimiento que se podría ganar en una inversión en los mercados financieros con un riesgo similar).

TIR (Tasa Interna de Retorno). Es la tasa en la que los flujos de entrada y de salida de un proyecto traídos a valor presente se igualan, es la tasa en la cual el VPN se iguala a cero. La tasa interna de retorno es la tasa de rentabilidad del proyecto y establece la viabilidad en los proyectos de inversión, se debe calcular aplicando la ecuación 7:

$$VPN = \frac{\sum R_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (7)$$

Donde,

t: tiempo del flujo de caja

i: tasa de descuento que se denomina TIR cuando el valor presente es cero.

Rt: el flujo neto de efectivo (la cantidad de dinero en efectivo, entradas menos salidas) en el tiempo t.

Para estos cálculos se debe retomar el flujo de caja indicado con anterioridad. Teniendo en cuenta como referencia las tasas de interés que ofrecen las entidades financieras para otorgar programas de financiación se tomó el 4,79% anual. De igual manera con la herramienta de análisis de datos Excel se puede dar aplicación a las fórmulas.

Tabla 3-15. VPN Y TIR.

VPN y TIR	
TASA	4,79%
Año	Flujo de Caja
0	-\$ 231.381.863
1	25.941.584
2	27.061.298
3	28.195.479
4	29.344.309
5	30.507.966
6	31.686.626
7	32.880.462
8	34.089.645
9	35.314.340
10	36.554.712
11	37.810.918
12	39.083.113
13	40.371.446
14	41.676.061
15	42.997.095
16	44.334.679
17	45.688.939
18	47.059.992
19	48.447.945
20	49.852.901
21	51.274.950
22	52.714.173
23	54.170.643
24	55.644.417
25	57.135.546
VPN	\$ 311.649.106
TIR	13,86%

Fuente: Autores.

Al observar el resultado de la TIR calculada para el proyecto, que es igual a 13,86% se puede establecer que es mayor que la tasa de descuento, con lo cual se confirma la rentabilidad del proyecto.

3.5 E. Fase 5: Diseño prototipo del seguidor solar.

3.5.1 Definir un Prototipo de seguidor solar

Según (Cantos, 2016) en función de los ejes de seguimiento los seguidores solares pueden ser de uno o dos ejes, adicional a esto plantea que la eficiencia de cada uno depende de su movimiento, en el caso de los seguidores en uno solo eje tiene hasta un 25%, comparados con paneles en estructuras fijas, mientras que los seguidores de dos ejes alcanzan un 35%. Con base en lo anterior se define un prototipo de un mecanismo que asemeje los movimientos de un seguidor solar basado en la simplicidad y la eficiencia, en este caso se considera un seguidor solar de dos ejes que permita el movimiento cenital y acimut cumpliendo con lo anteriormente descrito. Por otra parte, vale la pena resaltar que se contara con un componente electrónico que nos facilite el funcionamiento de dicho sistema.

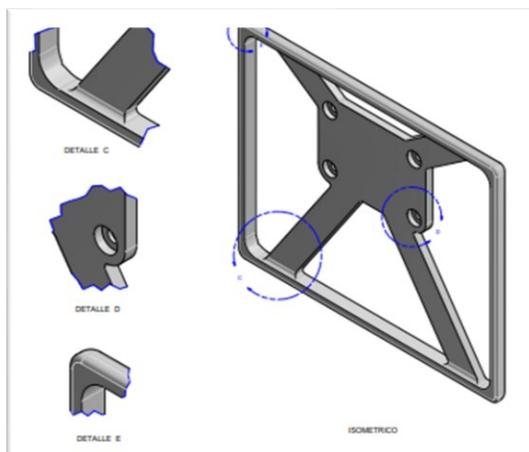
3.5.2 Diseñar isométricos del cuerpo general del prototipo del seguidor mediante el software Inventor.

Teniendo en cuenta el tipo de seguidor definido anteriormente, se emplea como herramienta el software Inventor para el diseño de la estructura o el cuerpo general del prototipo, a continuación, se presenta una pequeña descripción de cada una de las piezas empleadas.

1). Soporte panel.

Se plantea este diseño para la base del módulo, cuya función es soportar el panel y brindarle una estabilidad, el anexo I se puede observar el plano detallado de dicha pieza.

Figura 3-11 Soporte Panel.

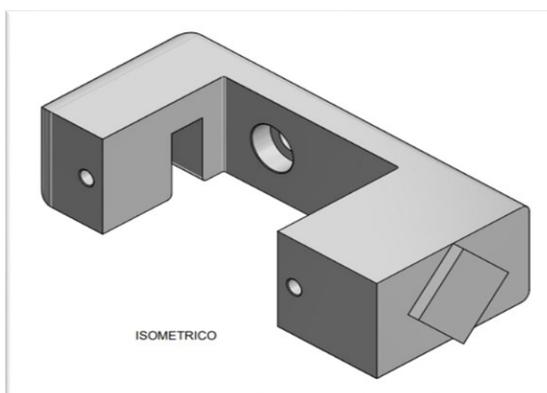


Fuente: Autores.

2). Base eje vertical.

Esta base modelo permite un correcto movimiento giratorio sobre el eje vertical, así capaz de realizar un seguimiento acimutal, para observar el plano en detalle de dicha pieza se puede ver el anexo J.

Figura 3-12. Base eje vertical.

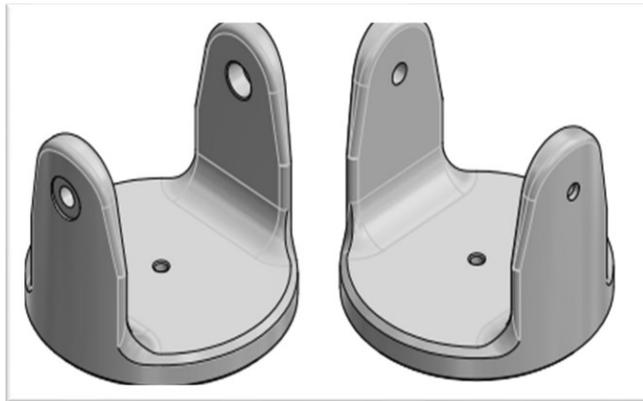


Fuente: Autores.

3). Base eje horizontal.

Debido a su diseño esta pieza nos permite un fácil movimiento sobre el eje horizontal, así capaz de realizar un seguimiento cenital, se puede ver detalladamente remitiéndose al anexo K.

Figura 3-13. Base horizontal.

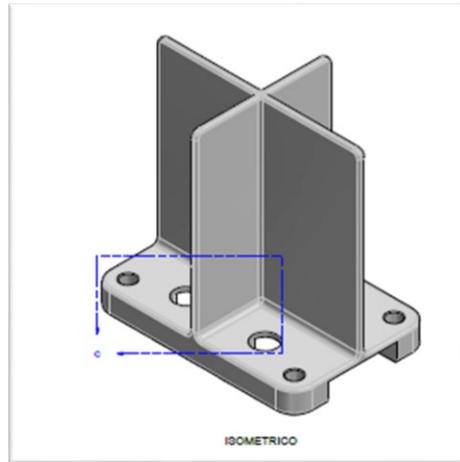


FUENTE: Autores.

4). Estructura fotorresistencias.

En esta pieza debido a la división utilizada para separar las fotorresistencias, brinda una sombra que limita la intensidad lumínica en cada cuadrante y aumenta la precisión del seguimiento, adicional permitirá alojar las cuatro fotoceldas de una manera adecuada (ver anexo L).

Figura 3-14. Estructura fotorresistencias.

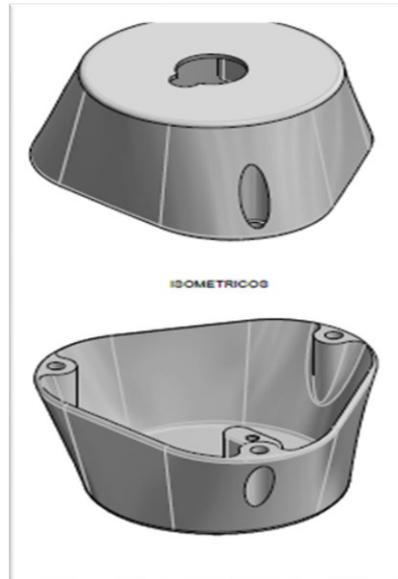


FUENTE: Autores.

5). Soporte Cuerpo.

Esta pieza será la base para soportar el cuerpo del seguidor, gracias al vacío del interior que brinda su diseño nos da la oportunidad de alojar el servomotor que transmitirá el movimiento en el horizontal (ver anexo M).

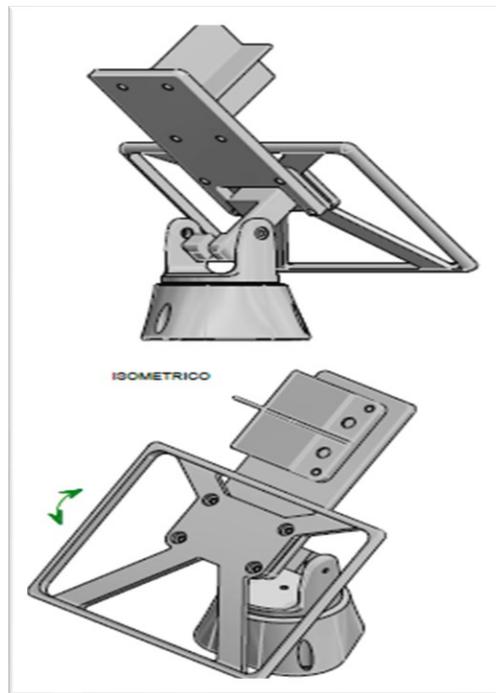
Figura 3-15. Soporte Cuerpo.



Fuente: Autores.

Una vez ensambladas cada una de las piezas diseñadas, en la figura 3-16 se puede percibir el modelo general del cuerpo del prototipo del seguidor solar, sin embargo, en el anexo N se puede apreciar con detalle.

Figura 3-16. Cuerpo general seguidor



Fuente: Autores.

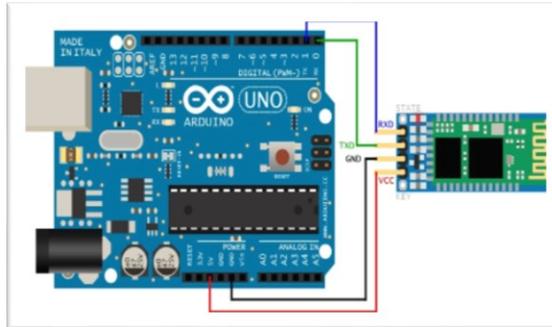
3.5.3 Determinar los componentes del prototipo definido.

Para el desarrollo de esta actividad se tiene en cuenta que el prototipo de seguidor definido realizara movimientos acimut y cenital, por tal razón aparte de su estructura general necesita una serie de dispositivos electrónicos que brinda la automatización y facilita al correcto funcionamiento del mismo. Los dispositivos electrónicos utilizados fueron:

1). Arduino: Es una plataforma de creación electrónica, posee un hardware y software libre que permite la creación de códigos o programas para llevar a cabo un proceso, para este caso es

fundamental ya que para el control de movimiento procesa distintas instrucciones definidas en la programación del seguidor. Su ficha técnica se aprecia en el anexo C3.

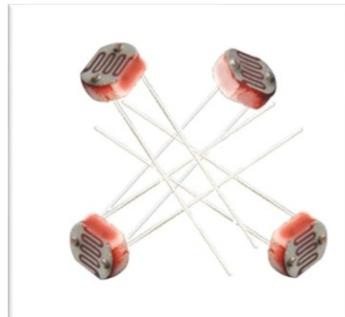
Figura 3-17. Arduino.



Fuente: Autores.

2). Fotorresistores LDR: Es una resistencia electrónica y su principio de funcionamiento es variar el valor dependiendo de la cantidad de incidencia de luz en su superficie, a mayor intensidad del LDR menor será su resistencia e inversamente, para este caso se dispuso cada una en un cuadrante, este cuadrante o división limita la intensidad lumínica que incide en cada una de ellas por ende mejora la precisión de seguimiento. Su ficha técnica se puede ver en el anexo C4.

Figura 3-18. Fotorresistencia LDR.



Fuente: Autores.

3). Servomotor MG90S: Es un pequeño actuador rotativo permite el control angular entre 0° y 180° , en este caso se emplearon dos, uno para cada eje, permitiendo el movimiento cenital y acimutal, su construcción se basa en engranajes de metal, brazos plásticos, tornillos de sujeción y una extensión de cable, por su versatilidad es usada en proyectos electrónicos y se ajusta perfectamente al prototipo definido. Su ficha técnica se observa en el anexo C5.

Figura 3-19. Servomotor MG90S.



Fuente: Autores.

4). Tarjeta reguladora LM2596: Este dispositivo actúa como convertidor o regulador de voltaje, son capaces de convertir un nivel de voltaje mayor a uno menor, en la figura 3-20 se puede observar la misma. Su ficha técnica se aprecia en el anexo C6.

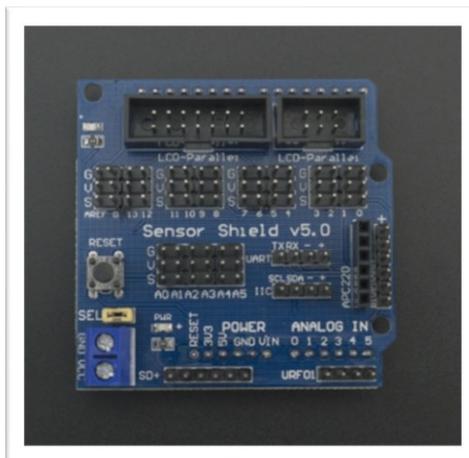
Figura 3-20. Tarjeta reguladora LM2596.



Fuente: Autores.

5). Modulo sensor shield v5: en resumidas palabras para este caso actúa como extensión del Arduino para facilitar su conexión. Su ficha técnica se puede ver en el anexo C7.

Figura 3-21. Modulo sensor shield v5.



Fuente: Autores.

3.5.4 Llevar a escala el prototipo para una comprensión didáctica de su funcionamiento.

Durante el proceso surgió la idea por parte de los autores de llevar a cabo una impresión 3D de los componentes para hacer una simulación más didáctica y real del mismo, vale la pena resaltar las propiedades de la materia prima PLA (ácido poliláctico) para dicha impresión ya que su principal característica es ser de origen vegetal y biodegradable contribuyendo a un generoso efecto en el medio ambiente, una vez impresas las piezas y teniendo los componentes electrónicos se procede a ensamblar el prototipo, a continuación podemos ver algunas imágenes de lo descrito anteriormente.

Figura 3-22. Coordenadas en impresión 3D.



Fuente: Autores.

Figura 3-23. Impresión 3D.



Fuente: Autores.

Figura 3-24. Impresión 3D con PLA.



Fuente: Autores.

Figura 3-25. Ensamble general.



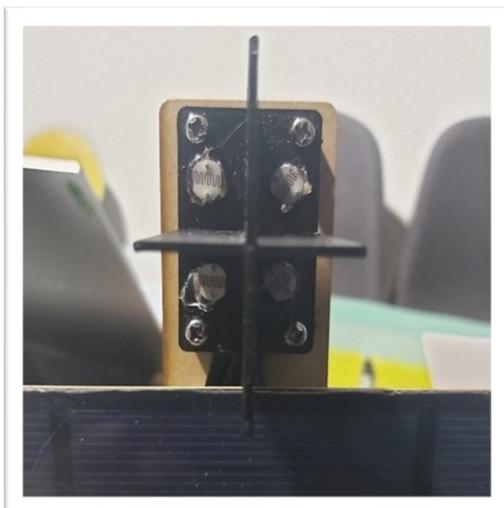
Fuente: Autores

Figura 3-26. Ensamble electrónico.



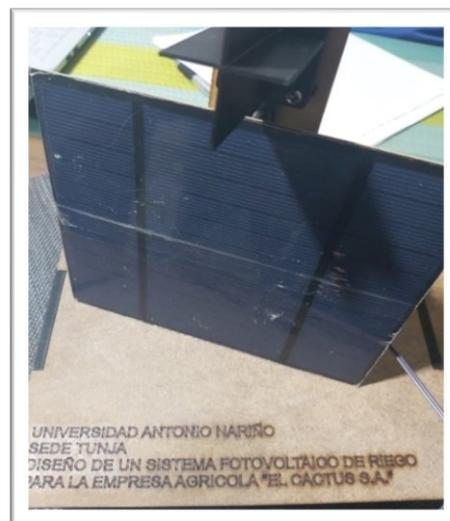
Fuente: Autores

Figura 3-27. Cuadrantes Fotorresistores.



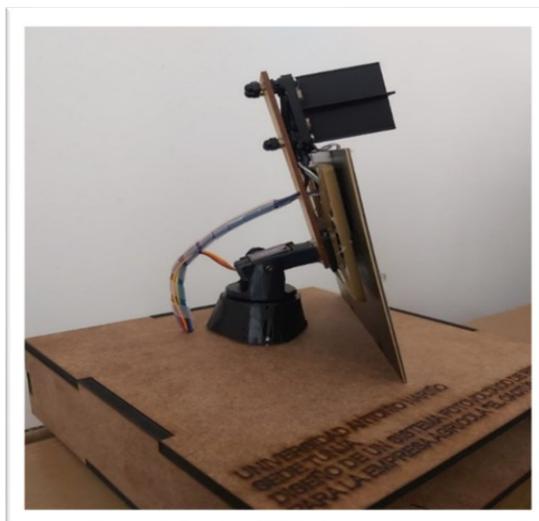
Fuente: Autores

Figura 3-28. Prototipo ensamblado.



Fuente: Autores

Figura 3-29. Prototipo seguidor terminado.



Fuente: Autores.

Por otra parte, para dar funcionamiento al seguidor es fundamental impartir una serie de instrucciones teniendo en cuenta un orden en la plataforma integrada que posee el Arduino, para este caso se utiliza el software Visual Estudio Code, donde se emplea un lenguaje C, descrito en la siguiente tabla (Tabla 3-16).

Tabla 3-16. Programación electrónica.

Código	ESTRUCTURA	DESCRIPCION
<code>#include <Servo.h></code>	Definición de librerías	Librería de manejo de servomotor <Servo.h>, esta se encarga de controlar los datos que comandan los servomotores.
<code>#define ldrtopl 2 //top left LDR #define ldrtopr 1 //top right LDR #define ldrbotl 3 // bottom left LDR #define ldrbotr 0 // bottom right LDR</code>	Declaración de pines en el escudo del Arduino.	Estos pines (0,1,2,3) esta dispuestos para recibir datos de las fotorresistencias, ubicadas en el mecanismo previamente.
<code>Servo servohori; byte servoh = 0; byte servohLimitHigh = 160; byte servohLimitLow = 20; Servo servoverti; byte servov = 0; byte servovLimitHigh = 160; byte servovLimitLow = 20;</code>	Definición del estado inicial o de reposo de los servomotores	Se condicionan los servomotores vertical y horizontal con limites inferior y superior como constantes. (esto para facilitar romper la estática al momento de cambiar de posición y prevenir posibles colisiones entre mecanismos)
<code>void setup () servohori.attach(10); servohori.write(0); servoverti.attach(9); servoverti.write(0); delay(500);</code>	Configuración de estado inicial para el mecanismo	Se envía el sistema cuando inicia la programación a una posición de reposo con la intención que se realice el proceso a partir de allí, está basada en las condicionales de limites superior e inferior dada

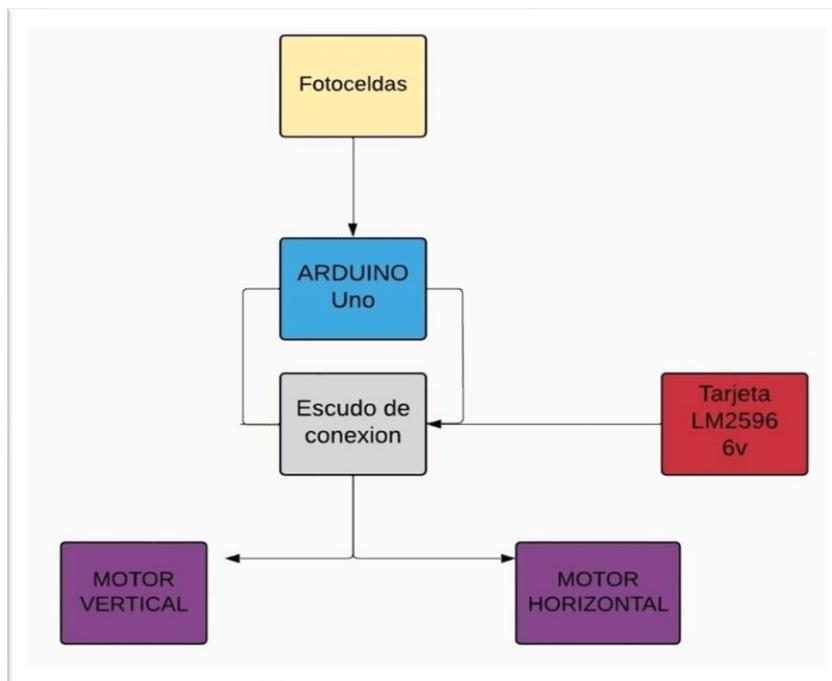
		<p>anteriormente, es decir el home de maquina realmente inicia en 20 grados.</p>
<pre> void loop() { servoh = servohori.read(); servov = servoverti.read(); //capturando valores analogicos de cada LDR unsigned int topl = analogRead(ldrtopl); unsigned int topr = analogRead(ldrtopr); unsigned int botl = analogRead(ldrbotl); unsigned int botr = analogRead(ldrbotr); // calculando el Promedio unsigned int avgtop = (topl + topr) / 2; //Promedio del top LDRs unsigned int avgbot = (botl + botr) / 2; //Promedio del bottom LDRs unsigned int avgleft = (topl + botl) / 2; //Promedio del left LDRs unsigned int avgright = (topr + botr) / 2; //Promedio del right LDRs if (avgtop < avgbot) { servoverti.write(servov +1); if (servov > servovLimitHigh) { servov = servovLimitHigh; } delay(10); </pre>	<p>Ejecución de instrucciones cíclicas que buscan hacer cumplir una condición o evento y realizar una acción.</p>	<p>Se establecen las acciones a realizar cuando se cumpla la condición.</p> <p>Las condiciones están determinadas de acuerdo al resultado de la operación básica matemática. (Promedio).</p> <p>Luego de hacer los promedios se establece una comparación y la acción a realizar.</p> <p>Las fotorresistencias están ubicadas de forma equidistante geométricamente en el plano cartesiano una por cada cuadrante con una posición perpendicular entre ellas inclinadas en el plano a 45° aproximadamente.</p> <p>Para que el sistema cambie de posición se usa la siguiente lógica</p> <p>Si el promedio de las resistencias derecha superior e izquierda superior es mayor que el promedio de la resistencia derecha inferior e izquierda inferior, entonces el servo vertical se desplazara hacia arriba.</p> <pre> if (avgtop < avgbot) { servoverti.write(servov +1); if (servov > servovLimitHigh) { servov = servovLimitHigh; } delay(10); </pre>

<pre> } else if (avgbot < avgtop) { servoverti.write(servov -1); if (servov < servovLimitLow) { servov = servovLimitLow; } delay(10); } else { servoverti.write(servov); } if (avgleft > avgright) { servohori.write(servoh +1); if (servoh > servohLimitHigh) { servoh = servohLimitHigh; } delay(10); } else if (avgright > avgleft) { servohori.write(servoh -1); if (servoh < servohLimitLow) { servoh = servohLimitLow; } delay(10); } else </pre>		<p>Si esta lógica es la inversa entonces el servo se desplazará hacia abajo.</p> <pre> else if (avgbot < avgtop) { servoverti.write(servov - 1); if (servov < servovLimitLow) { servov = servovLimitLow; } delay(10); } </pre> <p>Si los valores de promedio de las resistencias superior e inferior izquierdas son mayores que sus opuestas entonces el sistema se moverá de forma horizontal hasta el máximo de su posición.</p> <pre> if (avgleft > avgright) { servohori.write(servoh +1); if (servoh > servohLimitHigh) { servoh = servohLimitHigh; } delay(10); } </pre> <p>Si ocurre lo opuesto entonces el sistema se moverá de forma horizontal hasta su posición mínima buscando la mejor intensidad lumínica.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> { servohori.write(servoh); } delay(50); } </pre>		<pre> else if (avgright > avgleft) { servohori.write(servoh - 1); if (servoh < servohLimitLow) { servoh = servohLimitLow; } delay(10); } else { servohori.write(servoh); } delay(50); } </pre> <p>Esto se estará repitiendo de forma continua, las lecturas y cambios de posición se hacen cada medio segundo, esto con la intención de mantener la estabilidad del sistema, y basado en el sol no cambia de posición tan rápido.</p>
--------------------------------------------------------	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Para finalizar esta sección en la figura 3-30 se puede visualizar un diagrama de flujo del proceso que se llevó a cabo teniendo en cuenta cada uno de los elementos electrónicos.

Figura 3-30. Diagrama de flujo programación seguidor.



Fuente: Autores.

Conclusiones

Según el estudio técnico financiero, el sistema fotovoltaico on grid es una opción viable económicamente ya que se obtiene una buena relación costo-beneficio, la cual logra recuperar la inversión parcialmente a partir del primer año y la inversión total en el octavo para luego generar utilidades en los 17 años restantes, de vida útil estimada para el sistema general.

En el dimensionamiento solar fotovoltaico se definió que, para dar cumplimiento a las necesidades energéticas, el diseño del sistema está compuesto por 108 paneles con una potencia cada uno de 445Wp y un inversor de 50 kW que en su potencia máxima genera 48.060 kWp.

La radiación incidente puede verse afectada por el clima de acuerdo a la época del año, por ello es de vital importancia la conexión a un sistema de respaldo, en este caso el operador de red que supla estas necesidades energéticas del sistema, debe garantizar el normal funcionamiento del mismo.

Mantener los paneles en buen estado es vital para el funcionamiento del sistema, por ello se hace necesario la planeación de un mantenimiento programado de los mismos, teniendo en cuenta sus características.

Por lo anteriormente expuesto, una vez implementado el sistema, la empresa asegura desde el punto de vista económico y energético sostenibilidad y se posiciona como ejemplo para la región.

Para concluir, el diseño y construcción del prototipo a escala del seguidor solar permite deducir que es didácticamente funcional, considerándolo aprovechable para la formación

académica en la Universidad Antonio Nariño, ya que cumple con los movimientos cenital y acimuts propios de un seguidor.

Se elige la energía solar fotovoltaica por tratarse de una de las energías renovables menos contaminantes de fácil operación y mantenimiento, no compromete ningún riesgo para los humanos y el entorno

Referencias Bibliograficas

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA (21 de julio de 2021). <https://power.larc.nasa.gov/data-acces-viewer>

Agencia de sostenibilidad Energética. (mayo de 2019). *La importancia de la eficiencia energética para una agricultura más competitiva*.
<https://www.agenciase.org/2019/05/27/la-importancia-de-la-eficiencia-energetica-para-una-agricultura-mas-competitiva>

Asistencia Técnica Agrícola. (14 de Julio de 2021) *El Riego por goteo en flores y hortalizas en invernadero y a campo abierto*. https://www.agro-tecnologia-tropical.com/riego_goteo_hortalizas.html

Benito, G. y Ruiz, K. (2018) *Análisis beneficio-costo de la implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica en el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomas Sede Villavicencio, Meta*. [Tesis de Pregrado. Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio].

Cantos Serrano, J. (2016). *Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas*.

Espitia, C. (2017). *Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia* [Tesis de Maestría. Universidad de Santander].

<http://repositorio.udes.edu.co>

García, A. y Peñuela L. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de paneles solares como prueba piloto para suministro energético de dispositivos móviles, en la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio campus Loma Linda*. [Tesis de Pregrado. Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio].

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Distribucion-global-de-la-Irradiacion-Global-Horizontal.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Promedios mensuales de brillo solar para todas las estaciones del país*.
http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/6.Anexo_Promedios-mensuales-de-brillo-solar.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (15 de Julio de 2021) *Tiempo y clima / radiación solar ultravioleta*.
<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>

Juárez, E. y Vera, A. (2017). *Estudio de sistema automatizado de riego por goteo por medio de energía solar*. [Tesis de Maestría. Centro de investigación en materiales avanzados] <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/>

Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. 13 de mayo de 2014. D.O. No. 49150.

Liza, J. y Valencia, J. (2015). *Diseño de un sistema de riego automatizado con energía solar para cuatro hectáreas en el sector campana B-Distrito Batangrande*. [Tesis de Pregrado. Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/>

Machado, N., Lussón, A., Oro, L., Henríquez, J. y Escalona O. (2015) *Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar*. Ingeniería energética versión on-line. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000200008

MecatrónicaLATAM. (23 de abril de 2021) *LDR o fotoresistor o fotoresistencia*. <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/sensores/sensor-de-luz/ldr/>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019) *Cadena de flores*. [Diapositivas PowerPoint]. [https://sioc.minagricultura.gov.co/Flores/Documentos/2019-02-30 Cifras Sectoriales.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Flores/Documentos/2019-02-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf)

Pedraza, C. (2020). *Proyecto de riego utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca contador del municipio de Viani*. [Tesis de Pregrado. Universidad Militar Nueva Granada] <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/36184>

Perpiñán, O. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. <http://github.com/oscarperpinan/esf>

Schumann, R. (2005). *¿Qué es la Energía Fotovoltaica?* [Archivo PDF]. https://www.agenergia.org/wp-content/uploads/2018/05/1234263746_Qu__es_la_energ_a_fv_ITER.pdf

Servotronik. *Módulo LM2596 regulador de voltaje DC-DC Buck 1.25-35V*.

<http://www.servotronik.com.co/index.php/producto/modulo-lm2596-regulador-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-35v/>

Trespalacios, J. (2015). *ETO Historia Fotovoltaica V.02* [Archivo PDF]

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. *Plan Energético Nacional*

Colombia 2020-2050. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN>.

Unit electronics. *Mg90s Servomotor Tower Pro Engranés Metálicos*.

<https://uelectronics.com/producto/mg90s-servomotor-tower-pro-engranés-metálicos/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20Servomotor%20MG90S%3F,los%204.8%20a%206%20VDC>.

Universo fórmulas (2020) *Área de un polígono irregular*.

<https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/area-poligono/>

Velasco, A. y Salazar, O. (2019) *Evolución de la generación de energía solar fotovoltaica en Colombia*. [Tesis de Pregrado. Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio].

Vistrónica Tienda virtual de electrónica. *Módulo sensor shield v5 para arduino*.

<https://www.vistronica.com/board-de-desarrollo/arduino/shield/modulo-sensor-shield-v5-para-arduino-detail.html>

Xataka Basics. *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno*.

<https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-functiona-que-puedes-hacer-uno>

