



**Diseño de un sistema de bombeo
alimentado mediante paneles solares
fotovoltaicos para riego en un cultivo de
ñame en el municipio del Carmen de
Bolívar, Colombia.**

**Samuel David Munive Giraldo
Juan Carlos Pereira Barboza**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica – Ingeniería electromecánica
Cartagena, Colombia
2022

Diseño de un sistema de bombeo alimentado mediante paneles solares fotovoltaicos para riego en un cultivo de ñame en el municipio del Carmen de Bolívar, Colombia.

**Samuel David Munive Giraldo
Juan Carlos Pereira Barboza**

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

Director (a):

Daniel Enrique Yabrudy Mercado, MSc.

Línea de Investigación:

diseño mecánico y electromecánico, automatización industrial, energía

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

Agradecimientos Samuel Munive

Agradezco a Dios por permitirme llegar a esta importante etapa de mi vida con esfuerzo y sacrificio siempre iluminando mi pensamiento y acciones, direccionado para alcanzar este importante logro de ser un profesional impulsado a la vez por la pasión de aprender cosas nuevas constantemente dentro de la ingeniería, que cada día nos reta a ser mejores y a reinventar la manera de hacer las cosas en la actual nueva normalidad.

Agradezco mi esposa y mi familia en general por ser el principal apoyo moral en especial a mis padres por infundir en mi persona buenos principios de honradez, disciplina, honestidad y perseverancia los cuales son pilares fundamentales en la ética de un profesional.

Agradezco al profesor Daniel Enrique Yabrudy quien fue un apoyo fundamental con su conocimiento, experiencia y buena pedagogía para guiar de manera exitosa esta tesis de grado, de igual manera a todos los docentes de la facultad de ingeniería electromecánica de la Universidad Antonio Nariño por su paciencia y dedicación para ayudarme desarrollar mis estudios y ampliar mis conocimientos.

Agradezco a todos los compañeros de clases con quienes debatí y compartí conocimientos aprendidos.

Agradecimientos Juan Pereira

Agradezco a Dios por permitir concluir con éxito este sueño que un día vislumbre y que hoy estoy viéndolo hecho realidad, por darme la salud necesaria para poder llevar a un buen fin mis metas, y así poder ser una guía para mis hijos y mi familia.

Agradezco a mis padres; que me inculcaron el amor y los valores necesarios para tener una vida digna y responsable. A mis hijos y a mi esposa Blanca Zapateiro por comprenderme en mis tiempos de estudios, tiempo ganado que se ve reflejado en la culminación de mi carrera profesional.

Agradezco a mis profesores que me han guiado para llegar a la culminación de mi carrera. Y agradezco a mi tutor el Ing. Daniel Enrique Yabrudy por guiarme en el proyecto de Investigación.

Agradezco a mi compañero de tesis Samuel Munive por acompañarme en este proceso.

Agradezco la Universidad Antonio Nariño por poner a disposición todos los recursos necesarios para el correcto desarrollo del periodo de formación como ingenieros, gracias por dar un sentido profesional y ético a nuestra vocación.

Resumen

En el presente proyecto se presenta el diseño de un sistema de bombeo de agua (riego por goteo) el cual fue alimentado eléctricamente mediante paneles solares fotovoltaicos para un cultivo de ñame en el Carmen de Bolívar, Colombia. La metodología utilizada se dividió en 3 fases: la primera fase es el estudio agronómico, hídrico y condiciones de diseño del sistema de bombeo que va a ser alimentado mediante paneles solares. Lo anterior, se inició con el análisis de las condiciones ambientales de la extensión de tierra, la radiación solar, espaciamiento, reservas de agua y espacio para la implementación del sistema, entre otros factores. En segundo lugar, se determinó mediante un análisis técnico, los elementos del sistema de bombeo y sistema de alimentación energética que cumplan con la demanda que exige la implementación del sistema de riego. Posteriormente, se realizó el estudio de viabilidad y costos del proyecto, teniendo en cuenta las consideraciones de diseño y las consideraciones técnicas del mismo para así generar una propuesta costo-efectiva del sistema. Con los resultados se dimensionó el sistema de riego por goteo asistido, el cual cuenta con una bomba conectada a energía solar para el terreno especificado (media hectárea). Los cálculos mostraron que la bomba necesitada para este sistema es de 0.75kW o en su defecto 1HP de potencia. Posterior a obtener los valores de potencia de la bomba, se pudo dimensionar la necesidad energética que debían suministrar los paneles solares para el accionamiento de esta. Dicha necesidad fue de 2 paneles de 330W y 2 baterías de 100Ah para cumplir con la demanda energética calculada para la bomba y el sistema de riego. Finalmente, el estudio de viabilidad muestra que el sistema de paneles solares es superior al utilizado actualmente que consiste en generación con plantas a gasolina; además se observó que el sistema fotovoltaico es rentable con un retorno a la inversión en 2 años aproximadamente.

Palabras clave: Cultivo, Riego, Automatización Paneles solares, Viabilidad.

Abstract

This project presents the design of a water pumping system (drip irrigation) which was electrically powered by photovoltaic solar panels for a yam crop in Carmen de Bolívar, Colombia. The methodology used was divided into 3 phases: the first phase is the agronomic, water and design conditions study of the pumping system that will be powered by solar panels. The foregoing began with the analysis of the environmental conditions of the extension of land, solar radiation, spacing, water reserves and space for the implementation of the system, among other factors. Second, the elements of the pumping system and energy supply system that meet the demand required by the implementation of the irrigation system were determined through a technical analysis. Finally, the feasibility and cost study of the project was carried out considering the design considerations and the technical considerations of the same to generate a cost-effective proposal for the system. With the results, the assisted drip irrigation system was dimensioned, which had a pump connected to solar energy for the specified land (half a hectare). The calculations showed that the pump needed for this system is 0.75kW or alternatively 1HP of power. consequently, it was possible to measure the energy need that the solar panels had to supply to activate it. Said need was for 2 panels of 330W and 2 batteries of 100ah to meet the energy demand calculated for the pump and the irrigation system. Finally, the feasibility study shows that the solar panel system is superior to the one currently used, which consists of generation with gasoline plants; In addition, it was observed that the photovoltaic system is profitable with a return on investment in approximately 2 years.

Keywords: Cultivation, Irrigation, Automation Solar panels, Viability.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1 – Introducción, planteamiento del problema, justificación y objetivos	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Planteamiento del problema.....	15
1.3 Justificación.....	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
2. Capítulo 2 – Marco referencial.....	18
2.1 Marco teórico	18
2.1.1 Energías renovables.....	18
2.1.2 Energía solar	20
2.1.3 Sistemas fotovoltaicos	22
2.1.3.1 Paneles solares fotovoltaicos	23
2.1.3.2 Baterías o acumuladores	25
2.1.3.3 Inversores solares.....	26
2.1.3.4 Reguladores.....	27
2.1.4 Sistema de riegos.....	27
2.1.5 Datos climatológicos y topográficos del Carmen de Bolívar.....	29
2.1.5.1 Periodo de cultivo.....	29
2.1.5.2 Grados de crecimiento	30
2.1.5.3 Energía solar.....	31
2.1.5.4 Topografía del Carmen de Bolívar.....	32
2.1.6 Cultivo de Ñame	33
2.2 Estado del arte	37
3. Capítulo 3 – Metodología.....	42
3.1 Sistema de riego y condiciones hidráulicas	42
3.1.1 Parámetros agronómicos.....	42
3.2 Sistema Hidráulico	44
3.3 Sistema eléctrico – Paneles solares.....	47
3.3.1 Selección de elementos de sistema de paneles solares	50
3.4 Análisis de costos.....	51
3.5 Plan de mantenimiento.....	52

4. Capítulo 4 – Resultados y discusión	53
4.1 Fase 1 – Sistema de riego, sistema hidráulico y sistema de bombeo	53
4.1.1 Cálculos agronómicos.....	53
4.1.1.1 Cálculo de necesidad de agua	54
4.1.1.2 Sistema hidráulico.....	55
4.1.2 Cálculos de materiales para sistema de riego.....	60
4.2 Fase 2 – Sistema de paneles solares.....	61
4.2.1 Diseño final con paneles solares	64
4.3 Fase 3 – Estudio de viabilidad y costos.....	66
4.3.1 Análisis comparativo de los diferentes sistemas de suministro de energía	70
4.4 Plan de mantenimiento.....	74
4.4.1 Requerimientos para la empresa contratista	75
4.4.2 Plan de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo con actividades....	76
5. Conclusiones y recomendaciones.....	80
5.1 Conclusiones.....	80
5.2 Recomendaciones.....	81
6. Bibliografía	84

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Tipos de energías renovables	20
Figura 2-2. Energía solar al servicio de la agricultura	20
Figura 2-3. Combinación de los 2 sistemas en uno solo.....	21
Figura 2-4. Panel solar monocristalino	24
Figura 2-5. Panel solar policristalino.....	24
Figura 2-6. Panel solar amorfo	25
Figura 2-7. Batería de almacenamiento para paneles solares	25
Figura 2-8. Inversor Red FRONIUS Primo 3.0-1 3kW.....	26
Figura 2-9. Regulador para paneles solares.....	27
Figura 2-10. Periodo de cultivo año 2022	30
Figura 2-11. Grados día de crecimiento	30
Figura 2-13. Energía solar incidente en el Carmen de Bolívar.....	31
Figura 2-15. Mapa topográfico del Carmen de Bolívar.....	33
Figura 2-16. Especie de ñame.....	34
Figura 2-17. Países con mayor producción de ñame.....	35
Figura 2-19. Diseño de 2 sistemas de riego en Perú y en Colombia.....	38
Figura 2-20. Esquema del sistema de bombeo con paneles solares	39
Figura 3-1. Esquema de riego	45
Figura 3-2. Diagrama de Moody	47
Figura 3-3. Detalle de mapa de radiación solar promedio en el norte de Colombia.	48
Figura 4-1. Ubicación satelital de la Finca Santa Fé ubicada en el Carmen de Bolívar...	54
Figura 4-2. Estimación de factor de fricción para $Re=55.000$	57
Figura 4-3. Fragmento de catálogo para selección de bombas.	58
Figura 4-4. Panel sugerido para electrificación fotovoltaica.	61

Figura 4-5. Batería sugerida para almacenamiento eléctrico.....	62
Figura 4-6. Inversor sugerido para el kit solar.....	62
Figura 4-7. Regulador de voltaje	62
Figura 4-8. Esquema del sistema de riego con paneles fotovoltaicos y sistema de riego	65
Figura 4-9. Diseño CAD del sistema de riego por goteo con instalación de paneles solares	65
Figura 4-10. Esquema de monitoreo descentralizado.....	75

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Tipos de energías renovables.....	18
Tabla 2-2. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica.....	22
Tabla 2-3. Tipos de riego y sus características.....	28
Tabla 2-4. Composición nutricional del Ñame	34
Tabla 2-5. Producción de ñame por departamento	36
Tabla 2-6. Sistemas de riego para las 2 especies de ñame.....	40
Tabla 2-7. Rendimiento de las 2 especies de ñame según riego.....	40
Tabla 3-1. Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías.....	44
Tabla 3-2. Longitudes equivalentes de diferentes accesorios.....	46
Tabla 4-1. Condiciones del terreno de siembra de ñame.....	54
Tabla 4-2. Longitudes equivalentes de accesorio calculado	56
Tabla 4-3. Características de bombas preseleccionadas.....	59
Tabla 4-5. Presupuesto para sistema de riego por goteo de cultivo de ñame.....	60
Tabla 4-6. Componentes eléctricos de base.....	63
Tabla 4-7. Presupuesto para sistema de paneles solares	64
Tabla 4-8. Presupuesto para siembra de ñame	66
Tabla 4-9. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con generador eléctrico.....	67
Tabla 4-10. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con fluido eléctrico	68
Tabla 4-11. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con paneles solares	69
Tabla 4-12. Proyección a 1 año de trabajo con los diversos tipos de riego.....	70
Tabla 4-13. Retorno simple a 5 y 10 años para los diferentes sistemas	71

Tabla 4-14. Descripción de actividades de mantenimiento preventivo 76

Tabla 4-15. Descripción de actividades de mantenimiento correctivo 78

Lista de ecuaciones

Ecuación 1	43
Ecuación 2	43
Ecuación 3	43
Ecuación 4	44
Ecuación 5	44
Ecuación 6	45
Ecuación 7	48
Ecuación 8	48
Ecuación 9	49
Ecuación 10	49
Ecuación 11	49
Ecuación 12	49
Ecuación 13	50
Ecuación 14	52

1. Capítulo 1 – Introducción, planteamiento del problema, justificación y objetivos

1.1 Introducción

Los sistemas de riego con energía fotovoltaica representan en la actualidad una de las grandes apuestas agroindustriales para el desarrollo, debido al impacto socioeconómico que generan, pues pueden ser implementados en lugares donde no se tiene acceso a la red de energía eléctrica nacional. La implementación de los sistemas de energía fotovoltaica vislumbra un desarrollo a corto, mediano y largo plazo para el país en función de la producción agrícola e industrial en general.

Dentro de los atractivos presentados, estos sistemas cada vez minimizan las pérdidas energéticas, es decir, mejoran constantemente su eficiencia debido a la generación de nuevas tecnologías y equipos de mayor rendimiento como paneles, bombas, motores, entre otros (R.E, Cely, González, Granados, & Ramirez, 2018; Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019)

Sin embargo, un factor importante para tener en cuenta es que Colombia está ubicado en una región tropical, y por tal razón presenta una gran posibilidad de variación de las condiciones ambientales asociadas al cambio climático. Dicha variación hace que, tanto los sistemas hídricos como los cultivos, se vean afectados por grandes contenidos de agua o sequías extremas (Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019). Estas alteraciones en los regímenes medios de las lluvias aumentan el riesgo agroclimático de los sistemas productivos agrícolas, al inducir condiciones de déficit o exceso hídrico en el suelo, que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Belén, 2015).

El ñame es un alimento muy usado en la gastronomía regional e internacional; sin embargo, sigue teniendo un potencial de crecimiento comercial sin aprovechar (Espinosa,

Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018). En Colombia se produce alrededor de 500.000 toneladas anuales de ñame en unas 40.000 hectáreas de 18 departamentos, a saber: Bolívar (40%), Córdoba (37%) y Sucre (12%). Las variedades más comunes son el ñame diamante y el ñame espino (Aristizábal, 2021). El ñame puede ser utilizado industrialmente para la generación biopolímeros derivados con una estructura degradada por microorganismos, generando así alternativas para la fabricación del ácido poliláctico obtenido por la fermentación de almidón (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

El ñame requiere temperaturas entre 18 y 30°C para su cultivo, aunque los rebrotes de la semilla se ven favorecidos en el rango de temperaturas de 25 y 30°C. Durante los primeros 4 meses, el cultivo requiere un suministro de agua de 300m³/ha cada 9-12 días en terrenos arcillosos y hasta 15 días en suelos negros. Los siguientes 4-5 meses los periodos bajan 2 días. Se suspende el riego 30-45 días antes de la cosecha para favorecer el almacenamiento y la conservación de los rizomas. El ñame se adapta a diferentes condiciones, pero suele resultar más productivo en suelos de textura franco-arenosa, es decir, más arenoso que arcilloso, y que además sean profundos, con una altitud máxima de 800m sobre el nivel del mar, y buen drenaje (Tejeda, y otros, 2008).

La ubicación de Colombia y condiciones de cultivo determinan que la planificación de riego se supedita a las condiciones de suelo, condiciones del producto, consumo hídrico, entre otros factores, para la obtención de productos en óptimas condiciones. un sistema de bombeo es diseñado suplir los métodos naturales (lluvias), mediante métodos artificiales, y así no se vea afectado el crecimiento del producto. Por consiguiente, realizar un análisis para determinar el sistema de bombeo que cubra esas necesidades hídricas utilizando recursos renovables, como la radiación solar, se hace imperante e indispensable cada vez más en Colombia (Lara, 2007; Mendivelso, 2016).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en este trabajo se plantea acoplar un sistema de paneles solares fotovoltaicos a un sistema de riego para cultivos de ñame, que permita un uso más eficiente del agua en los cultivos y mayor rentabilidad de dicho cultivo. Se planifica la realización en fases iniciando con: el diseño de los sistemas de riego teniendo en cuenta las variables agronómicas e hidráulicas del cultivo. De manera seguida, realizar el análisis

de los requerimientos necesarios para suministrar la demanda de energía eléctrica mediante el sistema de paneles solares que serán los encargados del bombeo de agua. Finalmente, se realizará el estudio de viabilidad y costos con el fin de mostrar las ventajas y desventajas que posee la energizar sistemas de riego en cultivos mediante paneles solares.

1.2 Planteamiento del problema

Los principales problemas de la agronomía en Colombia son: ganadería extensiva, cultivos improductivos, deforestación acelerada, grandes subsidios ineficientes, dietas que no son saludables y aumento de importaciones (Lara, 2007). A lo anterior se suma que, el 90% de los agricultores no han recibido asistencia técnica para la modernización de los cultivos ni capacitación en cómo mejorar los niveles de producción de los cultivos. Algunos autores (El Espectador , 2021; Delgado, Paula, 2015) muestran que muchos los agricultores no poseen maquinaria ni infraestructura para gestionar un proyecto de cultivo tecnificado (Xercavins, Cayuela, Cervantes, & Sabater, 2005).

Por otro lado, muchas de las soluciones modernas de riego son implementaciones que van de la mano con la energía eléctrica convencional, lo que genera altos costos y bajos niveles de rentabilidad al pasar de los años. Actualmente existen diversos métodos de suministro de energía verde para el riego en cultivos, como el presentado por Belén Ceballos (El Espectador , 2021) donde diseñaron un volante inercial para acumular energía eólica usada para bombear agua y regar cultivos. Dicho sistema estaba compuesto por un sistema de captación, un sistema de acumulación y un sistema de bombeo. Los resultados fueron positivos para la población sin acceso a la energía eléctrica pues con pocos recursos generaron un sistema de riego automatizado con una vida útil mayor a 20 años.

Por otro lado, el trabajo realizado por Eduardo Zeman (Zeman, 2018) constó en un sistema automatizado y autónomo accionado por el cauce del agua. Para este usaron una bomba hidráulica que transporta el agua desde un cauce para riego localizado, mediante un sistema de reserva y distribución. Los resultados fueron satisfactorios, debido a que permitió el aprovechamiento de pequeños caudales para regar superficies acordes al volumen que obtuvieron.

Dentro de las posibilidades de agricultura moderna también existe la posibilidad de aprovechar la energía solar fotovoltaica para alimentar diferentes sistemas de apoyo al cultivo, tal como puede verse en diferentes proyectos nacionales e internacionales (Belén, 2015). Para ello, hay que balancear las variaciones de radiación solar a lo largo del día y del año con los consumos eléctricos principalmente debidos al riego, pero también de otros sistemas de agricultura de precisión como sensores y actuadores. En el caso del Carmen de Bolívar, no se conocen antecedentes de tecnificación del cultivo mediante paneles solares fotovoltaicos aplicados al cultivo del ñame (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018). Por tanto, en este proyecto se busca responder a la pregunta de investigación: ¿Cómo diseñar un sistema de bombeo costo-efectivo alimentado mediante paneles solares fotovoltaicos para el riego de un cultivo de ñame en el municipio del Carmen de Bolívar, Colombia?

1.3 Justificación

Este proyecto tiene como objeto de estudio el aprovechamiento de la energía fotovoltaica para energizar un sistema de riego en un cultivo de ñame en la región del Carmen de Bolívar, Colombia. Para lo anterior, se toma en consideración la radiación solar en esta región, la cual es un factor de gran importancia para el desarrollo ingenieril y el análisis técnico-económico del proyecto, pues permite decantarse o no por el uso de paneles solares. Dicho sistema de paneles solares permitirá mejorar las condiciones de siembra actual del municipio, capacitar a los agricultores tradicionales, además de mejorar las condiciones de cultivo de los emprendedores, agrónomos y personas en general que se encuentran asociadas al cultivo de este producto del campo (Delgado, Paula, 2015).

En este proyecto se toma cuenta el plan de desarrollo territorial de Bolívar, que busca desarrollar estrategias para el fortalecimiento, adecuación y construcción de obras para el transporte, obras de defensa y adaptación al cambio climático, infraestructuras de usos, y alteraciones en el ambiente en el Departamento de Bolívar (Bolívar, 2020). Por consiguiente, este proyecto va de la mano con el plan territorial, debido a que dentro de los ejes transversales presentados en el plan de desarrollo están las estrategias de fortalecimiento, disminución de las alteraciones de medio ambiente y construcción de obras para el desarrollo de la población. Así las cosas, este proyecto es un gran aporte para la

población del Carmen de Bolívar, pues es una zona con potencial para la tecnificación de los cultivos, ya que aparte del ñame, existe una gran variedad de productos del campo. Adicionalmente, este proyecto mejoraría no solamente los niveles de producción del municipio, sino que los vecinos de la población se verían motivados a la siembra de cultivos para la producción continua y optima.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de bombeo alimentado mediante paneles solares fotovoltaicos para riego de un cultivo de ñame en el municipio del Carmen de Bolívar, Colombia.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Establecer los requerimientos técnicos y operacionales del cultivo teniendo en cuenta el área del cultivo, condiciones agronómicas, condiciones hídricas y los componentes tales como la fuente de energía
2. Realizar una evaluación del costo energético y el análisis del sistema completo para la alimentación paneles solares fotovoltaicos y los demás componentes del sistema para aminorar costos.
3. Plantear el diseño del sistema de riego y del sistema de generador fotovoltaico.
4. Evaluar la viabilidad del proyecto teniendo en cuenta las necesidades del cultivo para presentar una propuesta de diseño costo-efectivo.

2. Capítulo 2 – Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Energías renovables

Con el pasar de los años, el hombre ha buscado transformar procesos naturales del planeta tierra en energía, dando como resultado las energías renovables. (Acciona, 2022). Las energías renovables, son aquellas que pueden ser producidas de manera sostenible, teniendo como base fuentes que se reabastecen mediante procesos naturales y que son cuantificables mediante las escalas de tiempo humano (Gonzales, 2009). Las energías renovables son diversas tal como se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Tipos de energías renovables.

Tipo de energía renovable	Definición	Ventajas	Desventajas
Energía eólica	Esta energía se encuentra presente entre la capa de la atmosfera más cercana a la superficie terrestre, y la superficie misma. Esta energía se transforma mediante un aerogenerador y es aprovechable en medida que exista una buena cantidad de viento.	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • No genera residuos • Tecnología sencilla • Espacios permiten la actividad agrícola 	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta en pequeña medida la fauna y la flora • Contamina visual y auditivamente • Interferencias en medios de comunicación
Energía Hidráulica	Se obtiene a partir de la caída del agua, un ejemplo son las centrales hidroeléctricas las cuales transforman la energía mediante turbinas que son accionadas mediante este fenómeno.	<ul style="list-style-type: none"> • No contamina • Abundancia en el recurso natural 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso en la instalación • Afectación por cambios climáticos

Tabla 2-1 (Continuación).

Tipo de energía renovable	Definición	Ventajas	Desventajas
Energía geotérmica	Se obtienen a partir de la energía interior de la superficie terrestre mediante la erupción de volcanes, aguas termales y aberturas que generan vapores y gases.	<ul style="list-style-type: none"> • Se encuentran a Temperaturas cte. • No generan impacto ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases sulfhídricos • Canales de distribución limitados
Energía solar fotovoltaica	Se obtiene a partir del aprovechamiento de los rayos del sol. Se obtiene instalando paneles solares que acumulan energía en baterías para su uso posterior.	<ul style="list-style-type: none"> • El impacto ambiental es mínimo • La mas aplicada del mundo (tecnologías modernas) • Mantenimientos sencillos 	<ul style="list-style-type: none"> • Afectan mínimamente el ecosistema • Impacto visual negativo • Las baterías contienen químicos peligrosos
Energía a través de la biomasa	Se obtienen a partir de recursos naturales y produce biocombustibles para accionar flotas vehiculares.		

Fuente: (Gonzales, 2009)

En Colombia, la generación de energía eléctrica es abastecida en un 70% por las centrales hidroeléctricas (Portafolio, 2021) .Lo anterior genera una inmensa dependencia hacia este tipo de generación, la cual se ve afectada constantemente por los cambios climáticos que sufre el país. Por su parte, el porcentaje de energía renovable generada a 2020 en Colombia fue de 6.5% lo cual es muy bajo para un país con una posición privilegiada para el aprovechamiento de las energías antes mencionadas (Portafolio, 2021). En la Figura 2-1 se observan los diversos tipos de energía renovables presentes en el mundo.

Figura 2-1. Tipos de energías renovables



Fuente: (Economipedia , 2019)

2.1.2 Energía solar

La energía solar es la que se genera a partir del sol, el cual es fuente de luz y calor para el planeta. Esta energía es aprovechada directamente mediante el calor, colectores solares para la energía térmica o para convertirla en electricidad por medio de procesos fotoeléctricos (Alusinsolar, 2021).

Figura 2-2. Energía solar al servicio de la agricultura



Fuente: (Seguí, 2018)

2.1.3 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico aislado o autónomo, es un sistema que se autoabastece debido a que usa la energía de la irradiación solar para generar energía eléctrica aprovechable para una determinada aplicación (vivienda, sistema de riego, sistema de comunicación, etc.). Este sistema se compone de 4 elementos fundamentales como son: Paneles solares, controlador o regulador, inversor y batería. Adicional a lo anterior, también se necesitan otros componentes de gran importancia como las estructuras, las acometidas eléctricas, sistemas de protección, entre otros, según la necesidad (Enriquez, 2014). Este tipo de energía, al igual que la mayor parte de los medios de generación energética, poseen ventajas y desventajas que son resumidas en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica

Ventajas	Desventajas
Limpia, renovable, infinita, silenciosa	Gran inversión inicial
Retribuida económicamente la producción para venta a red	Difícil almacenamiento
Subvenciones	Proceso de fabricación de módulos complejo y caro
Corto pay-back de la energía	No competitiva con otras energías en la actualidad
Sin partes móviles modular	Producción variable según climatología

Fuente: (Enriquez, 2014)

La energía solar fotovoltaica posee múltiples beneficios, lo cual ha impulsado su uso en los últimos años. Algunos de estos beneficios se listan a continuación:

- **Fuente de energía renovable, no contaminante e inagotable:** Estos no precisan métodos químicos que contaminen, en otras palabras, este tipo de energía mitiga la generación de elementos perjudiciales o residuos que de otra manera son liberados a la atmósfera. Este tipo de energía se convierte en un sistema renovable generando autoconsumo y la no generación de emisiones de CO₂ (Seguí, 2018).
- **Instalación sencilla y ahorro considerable:** Son de fácil instalación y se realiza de manera rápida, siendo ideales para el autoconsumo. Las variables de salida de los paneles (potencia y voltaje) están determinados por las características del sistema implantado y la ubicación deseada. Este tipo contiene un ahorro de dinero,

al obtener, se libera de la dependencia de las fuentes energéticas privadas (Seguí, 2018).

- **Instalación en zonas rurales y con muchas horas de sol al año:** En las zonas aisladas es difícil que las redes eléctricas privadas lleguen, sin embargo, para dichas zonas este tipo (difícil acceso) estos sistemas son ideales (Seguí, 2018).
- **Aumenta el rendimiento tradicional de los sistemas de cultivo:** Los rendimientos de tres de cuatro cultivos son superiores al rendimiento tradicional. La eficiencia del uso de la tierra aumenta un 186% por hectárea con el sistema solar fotovoltaico combinado (Seguí, 2018)

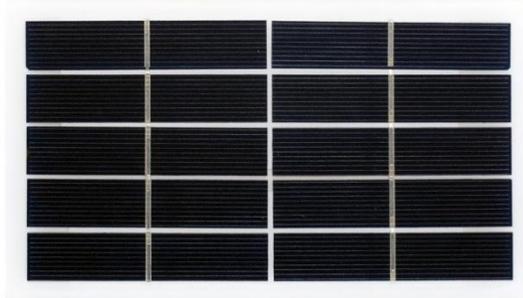
2.1.3.1 Paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos son el componente básico y de mayor importancia en los sistemas de energía solar fotovoltaicos. Estos son los encargados de transformar la energía captada del sol en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. Estos elementos están fabricados principalmente por materiales semiconductores. Los paneles están constituidos por células fotovoltaicas, pequeños módulos interconectados eléctricamente y montados sobre un marco de aluminio para soportarlos (Fernandez, 2021). Los paneles se dividen en 3 tipos: Los monocristalinos, los policristalinos y los amorfos. La descripción de dichos paneles se presenta a continuación.

1. Monocristalinos

- Células de un único cristal de silicio. La célula posee una forma circular u octogonal, además de tener un característico color azul oscuro uniforme.
- Rendimiento: 15% – 18%.
- Fabricación: Se realiza mediante la fundición de silicio puro con boro.

Figura 2-4. Panel solar monocristalino



Fuente: (Canadian Solar, s.f.)

2. Policristalinos

- Formadas por un conjunto de cristales de silicio. Poseen un rendimiento algo inferior a las células monocristalinas. La forma suele ser más rectangular y el color más intenso.
- Rendimiento: 12% – 14%.
- Fabricación: Igual al anterior, pero con menos fases de cristalización.

Figura 2-5. Panel solar policristalino



Fuente: (Canadian Solar, s.f.)

3. Amorfos

- Están compuestas por silicio sin cristalizar y son más baratas y menos eficientes que las anteriores. Este tipo de células se suele utilizar en calculadoras y relojes.
- Rendimiento: < 10%.
- Se deposita en forma de lámina sobre una superficie de plástico o vidrio.

Figura 2-6. Panel solar amorfo



Fuente: (Canadian Solar, s.f.)

2.1.3.2 Baterías o acumuladores

Los acumuladores o baterías tienen la función de almacenar la energía proveniente de los paneles solares en forma de energía química. Estas están compuestas de celdas electroquímicas conectadas en serie y sumergidas en un electrolito conductor. El parámetro más importante para seleccionar las baterías es la capacidad de almacenamiento. Generalmente se mide en amperios hora (Ah) (INELDEC, 2022).

Este tipo de baterías (solares) tienen un mayor número de ciclos de carga y descarga que las baterías convencionales. Adicionalmente, estas baterías tienen diversas ventajas como el libre mantenimiento y su posición es variable según se necesite (INELDEC, 2022).

Figura 2-7. Batería de almacenamiento para paneles solares



Fuente: (INELDEC, 2022)

2.1.3.3 Inversores solares

Este elemento permite convertir la energía producida por los paneles solares de corriente continua a corriente alterna, y así consumir la energía directamente o almacenarla en baterías solares según nuestras necesidades (Autosolar, 2022). Las características de dichos inversores son las siguientes:

- **Potencia máxima:** La potencia máxima entregable por un inversor suele ser el doble de la nominal.
- **Temperatura:** A medida que aumenta la temperatura la disipación del calor generado gracias al efecto Joule en el propio inversor es más difícil y como resultado la potencia entregable por el inversor disminuye.
- **Tensión:** Los inversores de 12V suelen tener potencias bajas, hasta unos 2.000W, los inversores de 24V potencias intermedias de 2.000W a 3.000W y los de 48V de 4.000W a 10.000W. Esto se debe a la conversión de energía de corriente continua a alterna y a la intensidad que pase por la línea de batería a inversor.
- **Consumo en Standby:** El consumo en standby es el consumo que tiene un inversor aun cuando no haya consumos a su salida. Cuanto mayor sea la potencia del inversor mayor será el consumo en standby.

Figura 2-8. Inversor Red FRONIUS Primo 3.0-1 3kW



(Autosolar, 2022)

2.1.3.4 Reguladores

El controlador de carga sirve para regular la entrada de corriente proveniente del panel solar a la batería y evita que se produzcan sobrecargas y sobre descargas profundas en la misma. Además, limita la velocidad a la que la corriente eléctrica se suma o se extrae de las baterías eléctricas (OSAKA Electronics, 2019).

Figura 2-9. Regulador para paneles solares



Fuente: (OSAKA Electronics, 2019)

2.1.4 Sistema de riegos

Los sistemas de riego son desarrollados para aumentar diversas características tales como la rentabilidad, ecología, crecimiento uniforme y desarrollo total y adecuado de los cultivos en proceso. Sin embargo, no solamente se tiene como foco la rentabilidad y manera fundamental, sino la innovación en sistemas que sean autosostenibles con otras tecnologías adicionales, tales como los sistemas de autogeneración o los sistemas de generación energética limpia (AquaFundación, 2018).

Existen diversas soluciones para la distribución del agua a los cultivos según las especificaciones de las plantas, lugar, humedad, clima, entre otras variables (Mendivelso, 2016). Dentro estos tipos de riego encontramos las siguientes, presentados en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Tipos de riego y sus características

Tipo de riego	Descripción	Ventajas	Desventajas
Aspersión	Lanzar agua de un lugar a otro logrando humedecer la zona.	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de parámetros • Ajuste de orientación • Las bajas presiones minimizan el daño • Ahorro en el consumo de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de humedad en la extensión de la zona regada • Evaluación técnica de la colocación de los aspersores
Goteo	Esto sirve para optimizar el riego donde la escasez de agua es imperante. La idea original es distribuir, humedecer y regar la mayor cantidad de plantas.	<ul style="list-style-type: none"> • Automatización del sistema • Menor consumo de agua • Reducción de plagas y plantas no deseadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran inversión inicial • Se pueden generar obstrucciones en los canales • Mayor preparación técnica
Exudación	Esta sirve para optimizar el humidificado de la tierra generando una penetración de unos 10cm aproximadamente. Menor uso de agua debido a la humidificación de la zona necesaria.	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia • Bajas presiones de agua • Mayor duración de los equipos 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de equipos adicionales como reguladores de presión • Tubos de exudación costosos • Alta inversión
Suplementario	Sirve para estudiar con anticipación los recursos hídricos que necesita el cultivo y posteriormente genera un rendimiento respecto a un sistema de riego seleccionado anteriormente el cual es aproximado y promediado a las necesidades del cultivo.	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia • Mayor duración de los equipos 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios agronómicos previos de alta complejidad • Inversión electrónica y sistemas de control

Fuente: (Aqua Fundación, 2018)

Con respecto al sistema de riego adecuado para el estudio en cuestión se asocian 2 sistemas, siempre de la mano con el sistema suplementario pues este permite suministrar agua a los cultivos durante periodos de déficit de recursos hídricos en zonas áridas o semiáridas, la cuales son propensas a sequias. Estos 2 sistemas se asumen que son el riego por goteo y riego por exudación. Para el caso del ñame, el índice de humedad debe ser constante a lo largo de todo su ciclo de vida, el cual consta de 10-12 meses. Sin

embargo, se debe tener cuidado de que el suelo donde se vaya a sembrar sea de carácter drenante, para evitar el exceso de humedad, ya que el exceso de humedad genera asfixia radicular, podredumbre y ciertas enfermedades provocadas por hongos en la planta en las etapas de crecimiento, desarrollo y final. Teniendo en cuenta lo anterior, para efectos de mayores producciones, se precisa un control sistémico de la cantidad de agua y humedad que necesita el tubérculo (Gómez, 2018).

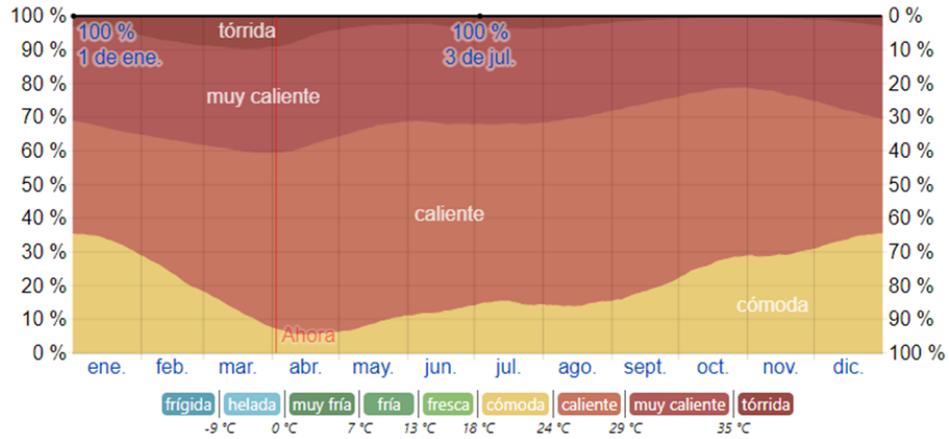
Así mismo, según estudios, la humedad relativa óptima para el ñame es de entre 60 y 70%, durante las horas del día, y entre 70 y 90% durante las horas de la noche (Gómez, 2018). Cabe resaltar que este tubérculo no tolera las sequías, por lo que hay que mantener un esquema de riego constante y efectivo para garantizar una buena producción. Durante las épocas más calurosas puede requerir de riegos diarios (Gómez, 2018).

2.1.5 Datos climatológicos y topográficos del Carmen de Bolívar

2.1.5.1 Periodo de cultivo

El periodo de cultivo varía generalmente, no obstante, se tiene en cuenta el periodo continuo más largo de temperaturas sin heladas (≥ 0 °C) del año (1 de julio al 30 de junio en el hemisferio sur). En el caso del Carmen de Bolívar, las temperaturas son cálidas durante el año, como se puede observar en la Figura 2-10, lo que obliga a no tener un periodo de cultivo particular, sino adaptarse a los tiempos de lluvia (Weather Spark, 2022).

Figura 2-10. Periodo de cultivo año 2022

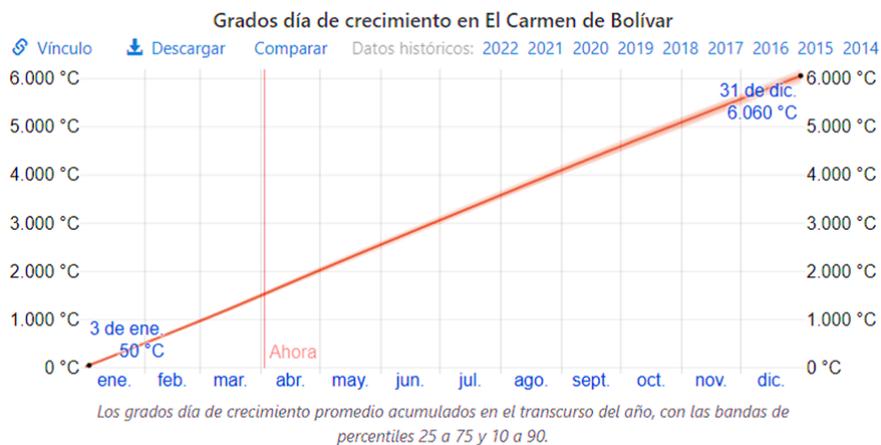


Fuente: (Weather Spark, 2022)

2.1.5.2 Grados de crecimiento

Esta es una medida de acumulación del calor anual, que se utiliza para predecir y estimar el desarrollo de la fauna y la flora de un lugar. Sin embargo, el concepto más cercano a grado de crecimiento se asocia a la cuantificación y predicción de eventos fenológicos, porque es más preciso que usar el tiempo cronológico o las predicciones de eventos según la estación del año (Caicedo, Cotes, & Cure, 2012). Para el caso en estudio, ver Figura 2-11.

Figura 2-11. Grados día de crecimiento



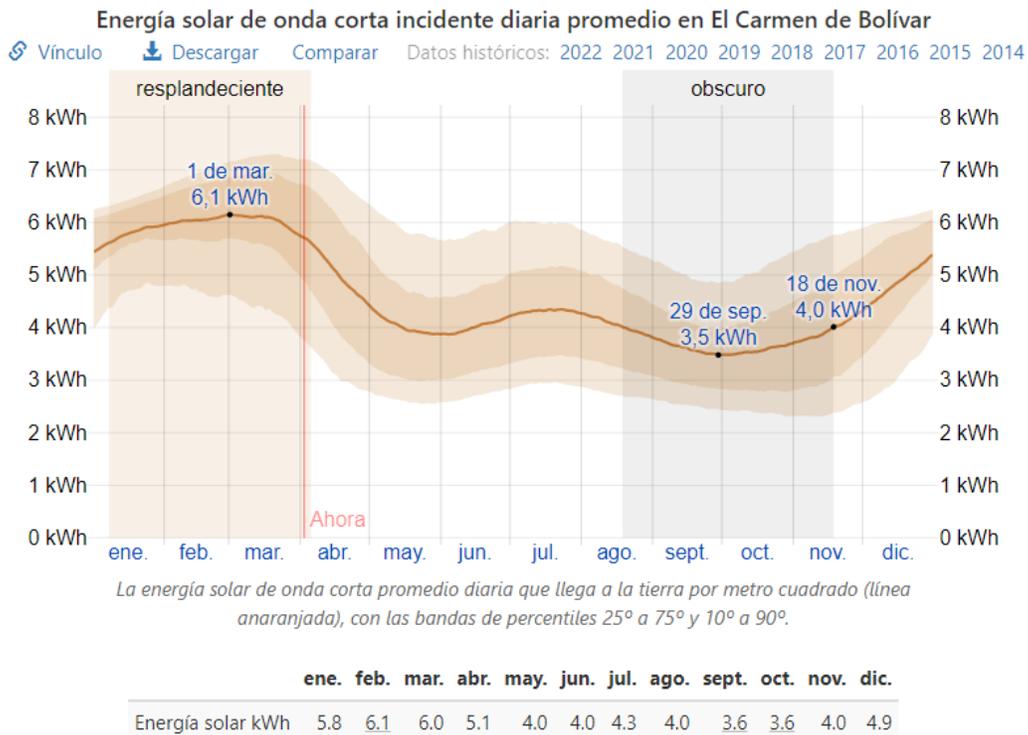
Fuente: (Weather Spark, 2022)

Los índices de grados día de crecimiento (GDD) se aplican en numerosos sistemas de producción de hortalizas, tubérculos y otras siembras para predecir la madurez fisiológica, la fecha de cosecha y el momento de siembras sucesivas. Cabe resaltar que la acumulación GDD para las diferentes etapas de desarrollo es relativamente constante e independiente de la fecha de siembra, cada híbrido, variedad o cultivar de la especie, puede tener valores específicos para estos parámetros (Caicedo, Cotes, & Cure, 2012)

2.1.5.3 Energía solar

Este concepto se basa en la energía solar de onda corta que incide diariamente y total que llega a la superficie de la tierra en un área amplia, tomando en cuenta las variaciones estacionales de la duración del día, la elevación del sol sobre el horizonte y la absorción de las nubes y otros elementos atmosféricos. La radiación de onda corta incluye luz visible y radiación ultravioleta (Weather Spark, 2022).

Figura 2-12. Energía solar incidente en el Carmen de Bolívar



Fuente: (Weather Spark, 2022)

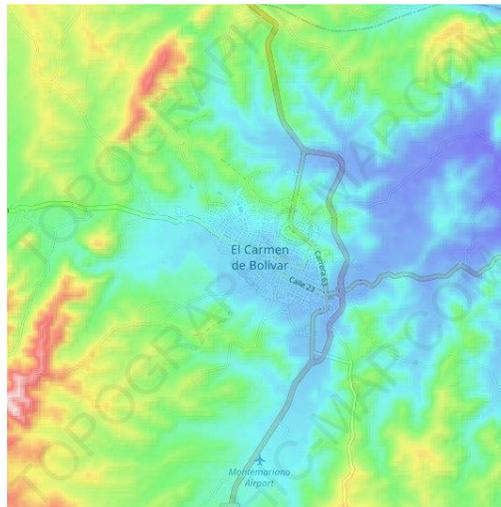
Como se muestra en la Figura 2-12 el período más resplandeciente que presenta el municipio del Carmen de Bolívar durante el año dura 2,9 meses, iniciando desde el mes de enero a los primeros días de abril, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado superior a 5,6 kWh. El mes más resplandeciente del año en El Carmen de Bolívar es febrero, con un promedio de 6,1 kWh. Para efectos del cultivo de ñame, se debe sembrar en el periodo de abril a junio donde los valores de radiación empiezan a disminuir, esto se debe a que el proceso de cosecha dura de 10 a 12 meses. Los valores de alta radiación (enero-marzo) son amortiguados con el sistema de riego y también se hace para aprovechar los 2 periodos invernales del país.

Como se mencionó anteriormente, el periodo más oscuro del año dura entre 3 y 4 meses, del mes agosto al mes de noviembre, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado de menos de 4,0 kWh. El mes más oscuro del año en El Carmen de Bolívar es octubre, con un promedio de 3,6 kWh y coincide con una de las épocas de invierno del país.

2.1.5.4 Topografía del Carmen de Bolívar

La topografía del Carmen de Bolívar es una extensión aproximada de 3km² que contiene variaciones sutiles de altitud, con un cambio mínimo de altitud de 117 metros aproximada, una altitud promedio sobre el nivel del mar de 204 metros y una máxima altitud de 402 metros (ver Figura 2-13). Ampliando el área a un radio de 16km², las variaciones de altitud serán de 619 metros, por su cercanía a los Montes de María y otras montañas, con variaciones de altitud de aproximadamente 844 metros.

Figura 2-13. Mapa topográfico del Carmen de Bolívar



- Coordenadas: 9.67788 -75.16414 9.75788 -75.08414
- Altitud mínima: 117m
- Altitud máxima: 402
- Altitud media: 204

El área en un radio de 3 kilómetros de El Carmen de Bolívar está compuesta de pradera (58 %), árboles (20 %), tierra de cultivo (11 %) y arbustos (11 %), en un radio de 16 kilómetros de árboles (45 %) y pradera (36 %) y en un radio de 80 kilómetros de pradera (38 %) y árboles (23 %).

2.1.6 Cultivo de Ñame

El Ñame es una de las especies de plantas del género *Dioscorea* (de la familia Dioscoreaceae), nativo de regiones cálidas de ambos hemisferios. Este tubérculo tropical cuya parte expuesta es en forma de enredadera, es muy popular en centro y sur América, al igual que en el Caribe, África y partes del Asia. Diversas variedades de ñame se cultivan a través de los trópicos y en parte de las regiones sub-tropicales y templadas. En el África occidental y en Nueva Guinea el ñame es uno de los principales cultivos (Procaribe, 2009).

Figura 2-14. Especie de ñame



Fuente: (Procaribe, 2009)

El suelo ideal para el sembrado del ñame debe ser franco y arenoso (condiciones similares a las del Carmen de Bolívar), alto nivel de drenado, ventilación constante y suficiente materia orgánica para un crecimiento uniforme. Otras de las condiciones del suelo es que debe ser suelto y de fácil penetración, suficientemente profundo y amplio para su desarrollo (MinAgricultura, 2020).

Por su parte, el ñame en la mayoría de sus variaciones posee composiciones nutricionales entre las que se destacan el bajo contenido de grasa y elementos importantes como el agua, carbohidratos, fósforo, potasio y las vitaminas A y C, tal como se muestra en Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Composición nutricional del Ñame

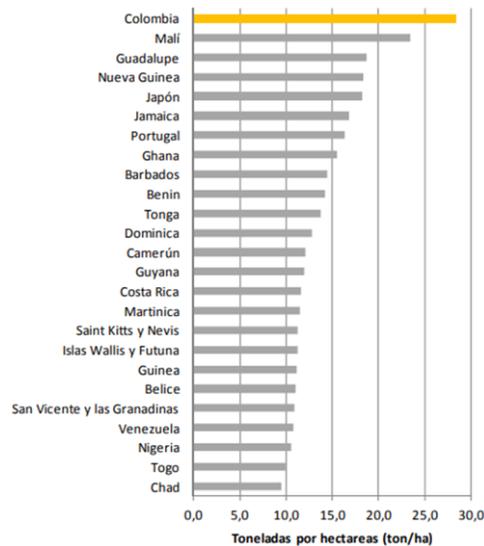
Compuesto	Cantidad	Medida (porción 100gr)
Agua	69.60	Gramos
Calorías	118	Kilocalorías
proteínas	1.53	Gramos
Grasas	0.17	Gramos
Carbohidratos	27.88	Gramos
Fibra	4.1	Gramos
Azúcar	0.50	Gramos

Tabla 2-4 (Continuación)

Compuesto	Cantidad	Medida (porción 100gr)
Calcio	17	Miligramos
Hierro	0.54	Miligramos
Magnesio	21	Miligramos
Fosforo	55	Miligramos
Potasio	816	Miligramos
Sodio	9	Miligramos
Zinc	0.24	Miligramos
Vitamina C	17.1	Miligramos
Tiamina	0.112	Miligramos
Riboflavina	0.032	Miligramos
Niacina	0.552	Miligramos
Vitamina B-6	0.293	Miligramos
Vitamina A	7	Microgramos
Vitamina E	0.35	Miligramos
Colesterol	0	Miligramos

Fuente: (Reina, 2012)

Figura 2-15. Países con mayor producción de ñame



En la Figura 2-15, se puede observar que Colombia posee la mayor tasa de rendimiento en el cultivo de ñame a nivel mundial debido a que: las características del proceso productivo, la calidad de la semilla, el tipo de siembra, el terreno y la variedad de semilla o existencia de clones, son determinantes para lograr un buen nivel de rendimiento (Reina, 2012).

Tabla 2-5. Producción de ñame por departamento

Departamento	Producción			Participación porcentual en total nacional año 2000-2010	Participación porcentual en total nacional año 2010-2020	Tasa de crecimiento anual promedio (2000-2010)
	2000	2010	2020			
Atlántico	2142	2841	5730	0.7%	1.36%	2.9
Bolívar	100012	183572	163394	46.6%	38.8%	6.3
Cesar	10960	4200	4381	1.1%	1.04%	-9.1
Córdoba	102510	11947	150829	30.4%	35.8%	1.6
La guajira	1093	886	8018	0.2%	1.90%	-2.1
Magdalena	560	2010	1915	0.5%	0.45%	13.6
San Andrés y Providencia	7	0	4	0.0%	0.0%	n.d
Sucre	31505	50128	61367	12.7%	14.5%	4.8
Región Caribe/Otras regiones*	284789	363584	25136	92.3%	6%	3.9
Nacional	254849	393996	420773	100%	100%	4.5

Fuente: (Reina, 2012)

En Colombia, tal como se muestra en la Tabla 2-5, los departamentos con mayor producción y crecimiento son el Bolívar y Córdoba. Sin embargo, en el departamento de bolívar particularmente los municipios con mayor producción de ñame son San Juan Nepomuceno (80.000) toneladas en 2010, seguido de Carmen de Bolívar (70.750 toneladas) y San Jacinto (18.000) (MinAgricultura, 2020). Este factor indica que el terreno para el crecimiento de la semilla y el conocimiento de como cultivarla es superior respecto a otras regiones.

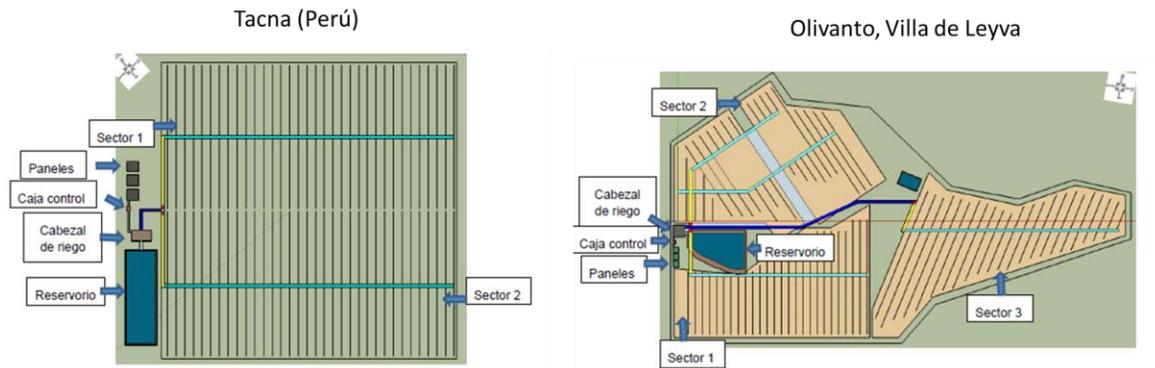
2.2 Estado del arte

En el trabajo realizado por (Mendivelso, 2016) “Sistema de riego por goteo con paneles solares en cultivo de árboles de olivo en la finca Olivanto en Boyacá, Colombia y una parcela en Tacna, Perú” el objetivo fue estudiar y analizar un sistema de riego por goteo para cultivos de olivo, que estaría alimentado por paneles solares en 2 lugares diferentes, Villa de Leyva (Colombia) y Tacna (Perú). Los autores se plantearon una metodología la cual se describió de la siguiente manera:

- Determinación de áreas donde de plantará el sistema
- Determinar los requerimientos de radiación solar necesaria para el funcionamiento.
- Estudio y determinación de la extensión del terreno para calcular la cantidad de árboles posibles, lugar de reservas de agua y espacio idóneo para la ubicación de los paneles solares.
- Análisis del sistema de riego por goteo (previamente seleccionado)
- Determinación del volumen de agua necesario para el sistema
- Selección de elementos necesarios para el riego del cultivo.
- Análisis del sistema fotovoltaico teniendo en cuenta los requerimientos técnicos del sistema y las condiciones climatológicas.
- Estudio de viabilidad

De la metodología planteada obtuvieron como resultado el diseño completo de la distribución de los árboles, elementos, equipos y sistema de paneles solares en las 2 áreas a trabajar, tal como se muestra en la Figura 2-16. cabe resaltar que para ambos diseños tuvieron en cuenta las partes más altas para ubicar el sistema de riego y poder alcanzar mayores distancias en las redes de las tuberías.

Figura 2-16. Diseño de 2 sistemas de riego en Perú y en Colombia



Fuente: (Mendivelso, 2016)

Como segundo resultado, el estudio de viabilidad mostró que es viable la implementación de dicho proyecto, teniendo en cuenta que la inversión inicial se recupera en menos de 5 años en comparación con un sistema de gasolina, considerando además que el sistema de paneles solares no genera altos costos de mantenimiento, y que la vía útil presentada por este sistema es cercana a los 20 años.

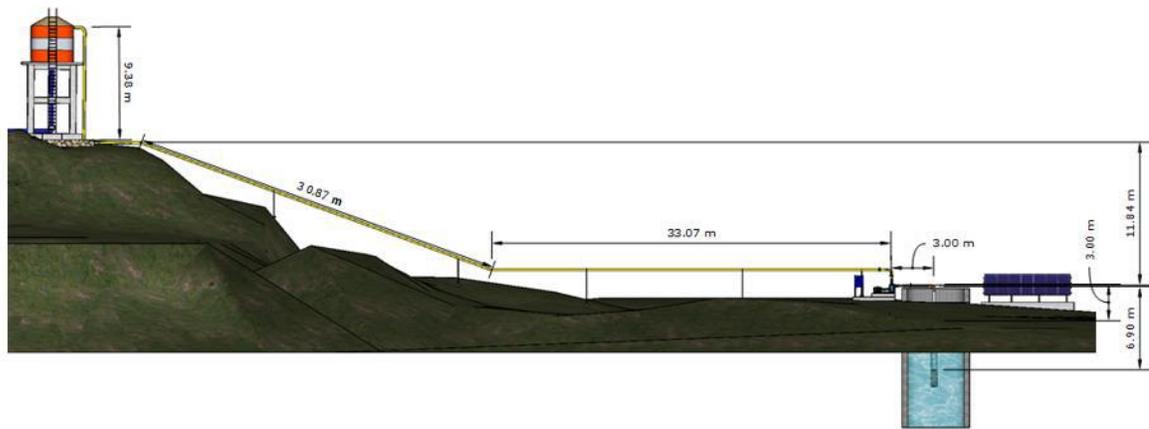
En la investigación realizada por (Vargas & Rojas, 2019) “Diseño de un sistema de bombeo de agua con paneles solares para mejorar el riego por goteo del cultivo de cacao en el fundo La Esperanza, Lamas, San Martín” los autores diseñaron un sistema de bombeo para mejorar el riego por goteo de cultivo de cacao. Tuvieron como muestra la parcela la Esperanza, y plantearon la siguiente ruta metodológica:

- Selección del sistema fotovoltaico
- Selección de la bomba de agua
- Presupuesto del sistema de bombeo
- Consumo de agua con riego por hectárea

Para su diseño de riego por bombeo, los autores evidenciaron que la ubicación idónea para los tanques elevados acoplados es en la parte más alta. Teniendo en cuenta, lo anterior los autores realizaron el diseño mostrado en la

Figura 2-17.

Figura 2-17. Esquema del sistema de bombeo con paneles solares



En segundo lugar, notaron que a mayor altura la eficiencia del riego es mayor, en su caso aumento entre un 90 y un 95% con respecto al estado del arte. La eficiencia del riego por goteo estuvo directamente relacionada con la selección correcta del sistema de paneles solares y con la correcta selección de materiales para el sistema de bombeo.

En el trabajo realizado por (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018) "Desarrollo y productividad de ñame (*Dioscorea trifida* y *Dioscorea esculenta*) en diferentes condiciones hídricas" los autores se plantearon como objetivo estudiar el efecto de riego sobre los rendimientos de la producción de D. Trifida y D. Esculenta en los montes de María, departamento de Sucre, Colombia. En la propuesta metodológica para el cumplimiento de dicho objetivo los autores seleccionaron un diseño de experimento que le permitiera obtener un sistema de riego adecuado para los cultivos de ñame. Los sistemas de riegos estudiados se muestran en la

Tabla 2-6.

Tabla 2-6. Sistemas de riego para las 2 especies de ñame

Tratamiento	Descripción	Agua total
REDCt	Dioscorea trifida con riego en etapa crítica del cultivo.	888 mm
RTCDt	Dioscorea trifida con riego durante todo el ciclo del cultivo.	944 mm
SRDt	Dioscorea trifida sin riego.	750 mm
REDCe	Dioscorea esculenta con riego en etapa crítica del cultivo.	888 mm
RTCDe	Dioscorea esculenta con riego durante todo el ciclo del cultivo.	944 mm
SRDe	Dioscorea esculenta sin riego.	750 mm

Fuente: (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018)

Como resultados, y partiendo desde un punto de vista estadístico, los autores demostraron que con un 95% de confiabilidad (valor-P) los riegos en la etapa crítica del cultivo (RECD) fueron los que obtuvieron los mejores rendimientos para las 2 variantes de ñame analizadas como se muestra en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7. Rendimiento de las 2 especies de ñame según riego

Tratamientos de riego	Rendimiento (t/ha)	Contenido de almidón (%)	Producción almidón (t/ha)
REDCt	24.0	22.0	5.28
RTCDt	30.6	21.3	6.52
SRDt	17.1	20.6	3.64
REDCe	23.8	21.6	5.07
RTCDe	27.0	18.6	5.75
SRDe	14.0	20.6	2.88

Fuente: (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018)

Adicional a lo anterior, la especie D. Esculenta aumentó un 92.9% en la producción de tubérculos con aplicación de riego suplementario. Lo cual da un indicio de que tipos de especies son las que se deben sembrar para obtener una mayor producción.

3. Capítulo 3 – Metodología

En esta investigación se realizó una revisión del estado del arte con el objeto de correlacionar todas las variables técnico-económicas para la implementación de la energía solar en equipos de bombeo para riego. Con esto se realizó un diseño básico teniendo en cuenta las dimensiones del lugar a sembrar, para dar a conocer los gastos de instalación, materiales, tipo de riego, consumo en KWh, periodo de retorno de la instalación y otros valores para tener en cuenta.

3.1 Sistema de riego y condiciones hidráulicas

3.1.1 Parámetros agronómicos

Para el análisis del diseño agronómico se revisó la información de la textura del suelo, el área de trabajo del lugar donde se va a realizar el estudio. La zona de estudio corresponde al departamento de Bolívar, municipio Carmen de Bolívar que se encuentra ubicado en las coordenadas latitud 9,71 Norte y longitud 75,12 Este, y una altitud de 117m sobre el nivel del mar. La finca cuenta con 92 hectáreas. Para efectos de prueba piloto, el alcance de este proyecto se limitará a media hectárea. La necesidad hídrica para las necesidades de la planta se determinó de acuerdo con los estudios realizados por (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018) y los datos proporcionados por (MinAgricultura, 2020)

que a su vez están basados en la metodología propuesta la por la Organización de naciones unidas para la agricultura y alimentación (FAO) (Mendivelso, 2016).

La planta solo utiliza el agua que no se evapora en el suelo o la que no se pierde por transpiración vegetal. Por lo que la cantidad de agua a aportar (Etc), se calcula con la Ecuación 1 (FAO, 2006).

$$E_{tc} = E_{to} \cdot K_c \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Eto hace referencia a la evotranspiración de referencia, para nuestro caso estos datos se obtuvieron de mediciones hechas por las estaciones meteorológicas (Unidad de Planeación Minero Energética - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2005.). Kc es una constante propia del cultivo determinada experimentalmente por la FAO (FAO, 2006).

Luego de tener el dato de la evotranspiración, se procede a determinar el aporte de cada planta, usando la Ecuación 2 (FAO, 2006).

$$N_n = E_{tc} - P_e \quad \text{Ecuación 2}$$

donde Nn es la necesidad de riego por planta en L/día, Etc es la evaporación calculada anteriormente y Pe la precipitación útil que suele ser del 75% de la lluvia como lo mencionó (Mendivelso, 2016).

Los datos de precipitación fueron tomados del IDEAM (Unidad de Planeación Minero Energética - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2005.).

Por último, teniendo en cuenta el estado del arte (Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019; Mendivelso, 2016) se incluye una eficiencia del sistema de riego, que en este caso es por goteo y corresponde al 90%, obteniendo así la Ecuación 3 (FAO, 2006).

$$N_b = \frac{N_n}{E_{f_r}} = \frac{N_n}{0,9} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para pasar de la necesidad hídrica calculada a un resultante de caudal en el área estudiada se hace la conversión de la Ecuación 4 (FAO, 2006).

$$Q = N_b \cdot \frac{A_{\tilde{n}}}{t_R} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde Q es el caudal, $A_{\tilde{n}}$ es el área sembrada de ñame, y t_R son las horas que se estará regando durante el día.

3.2 Sistema Hidráulico

Se distribuyó la tubería tal como lo muestra la Figura 3-1. La red de distribución se ó diseño teniendo en cuenta tubería de PVC principalmente y en segundo lugar PE. El criterio de preferencia del PVC fue por resistencia mecánica y el del PE por estabilidad a la luz solar, pues el PVC debe estar enterrado. El criterio para las ramificaciones es un máximo de 140m en plano y 100m en pendiente ascendente. En el caso de estudio se tiene una pendiente del terreno del 3%, por lo que se cumple con ambos criterios dentro de la media hectárea. La separación entre brazos será proporcional al espaciado entre las calles del cultivo, a unos 2.5m.

Del inciso anterior se obtiene el caudal de agua en el periodo más desfavorable y ese será el mismo para el diseño de la red hídrica. Con el caudal se dimensiona el diámetro de la tubería, teniendo en cuenta la velocidad recomendada en la Tabla 3-1 (Mc Cabe, Smith, & Harriot, 1991), y aplicándolo en la Ecuación 5, que corresponde a la ecuación de flujo, donde v es la velocidad del fluido, A es el área transversal del tubo y d es el diámetro del tubo.

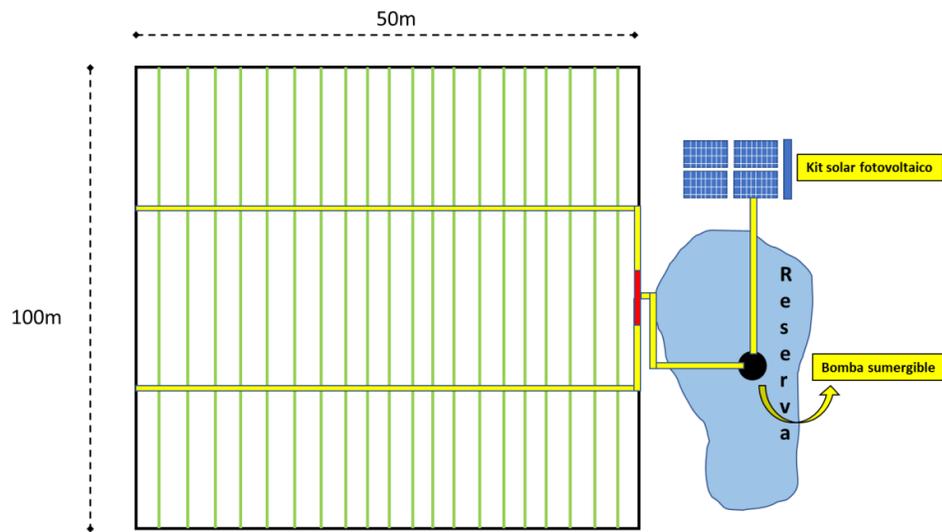
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \frac{d^2}{4}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Tabla 3-1. Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías.

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		pies/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5-1	0,15-0,30
	Entrada de bomba	1-3	0,3-0,9
	Salida de bomba	4-10	1,2-3
	Línea de conducción	4-8	1,2-2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2-0,5	0,06-0,15
	Salida de bomba	0,5-2	0,15-0,6
Vapor de agua		30-50	9-15
Aire o gas		30-100	9-30

Fuente: (Mc Cabe, Smith, & Harriot, 1991)

Figura 3-1. Esquema de riego



La curva equivalente de las pérdidas por fricción en tubería se modela acorde con la Ecuación 6 (Mc Cabe, Smith, & Harriot, 1991).

$$H_t = f \frac{L \cdot v^2}{d \cdot 2g} = f \frac{L \cdot 16Q^2}{d^5 \cdot 2g}$$

Ecuación 6

Donde L es la longitud efectiva de la tubería, Q es el caudal calculado anteriormente, d es el diámetro nominal de la tubería, g es la aceleración de la gravedad, v es la velocidad del agua en el tubo, y f es un factor de fricción estimado del Diagrama de Moody que se presenta en la Figura 3-2. El efecto de las ramificaciones se modela con factores de equivalencia de tubería como lo muestra la Tabla 3-2.

La longitud efectiva L se modela como la suma de las longitudes efectivas de cada etapa de tubería, donde se tiene en cuenta la longitud de la tubería troncal, la longitud de una rama (por ser simétrica), la longitud por accesorios de reducción.

Tabla 3-2. Longitudes equivalentes de diferentes accesorios

Nominal Pipe size in.	Globe valve or ball check valve	Angle valve	Swing check valve	Plug cock	Gate or ball valve	45° ell	Short rad. ell	Long rad. ell	Hard T.	Soft T.	90° miter bends			Enlargement				Contraction								
											Weld thrd	Weld thrd	Weld thrd	Weld thrd	Weld thrd	2 miter	3 miter	4 miter	Sudden		Std. red.		Sudden		Std. red.	
																			d/D = 1/2	d/D = 1/3						
1 1/2	55	26	13	7	1	1	2	3	5	9	23				5	3	1	4	1	3	2	1	1	—	—	
2	70	33	17	14	2	2	3	4	5	10	11				7	4	1	5	1	3	3	1	1	—	—	
2 1/2	80	40	20	11	2	2	3	4	5	12	13				8	5	2	6	2	4	3	2	2	—	—	
3	100	50	25	17	2	2	3	4	5	14	15				10	6	2	8	2	5	4	2	2	—	—	
4	130	65	32	23	3	3	4	5	6	19	20				12	8	3	10	3	6	5	3	3	—	—	
6	200	100	48	30	4	4	5	6	7	28	29				18	12	4	14	4	9	7	4	4	1	—	
8	260	125	64	40	6	6	7	8	9	37	38				25	16	5	19	5	12	9	5	5	2	—	
10	330	160	80	50	7	7	8	9	10	47	48				31	20	7	24	7	15	12	6	6	2	—	
12	400	190	95	60	9	9	10	11	12	58	59	28	21	20	37	24	8	28	8	18	14	7	7	2	—	
14	450	210	105	70	10	10	11	12	13	69	70				42	26	9	—	—	20	16	8	—	—	—	
16	500	240	120	80	11	11	12	13	14	80	81	38	27	24	47	30	10	—	—	24	18	9	—	—	—	
18	550	280	140	90	12	12	13	14	15	92	93	42	30	28	53	35	11	—	—	26	20	10	—	—	—	
20	650	300	155	100	14	14	15	16	17	104	105	46	33	32	60	38	13	—	—	30	23	11	—	—	—	
22	688	335	170	110	15	15	16	17	18	116	117	52	36	34	65	42	14	—	—	32	25	12	—	—	—	
24	750	370	185	120	16	16	17	18	19	128	129	56	39	36	70	46	15	—	—	35	27	13	—	—	—	
30	—	—	—	—	21	21	22	23	24	140	141	70	51	44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Fuente: (Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019)

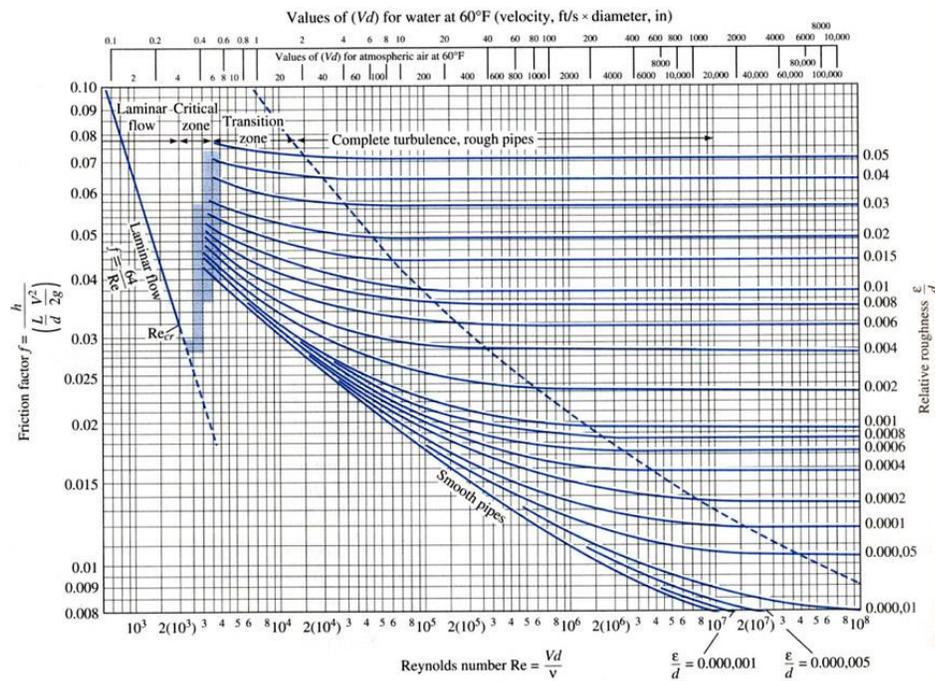
A la presión (o altura) de la tubería se le suma la presión (o altura) para salvar la subida de agua desde el reservorio hasta el nivel de la siembra. Lo anterior representa la presión que se le requiere a la bomba que, junto con el caudal y los criterios ambientales, constituyen los criterios de selección de la bomba en catálogo.

Teniendo en cuenta lo anterior, la selección de la bomba se realizó revisando en catálogo al menos 2 tipos de bombas que cumplan el rango de potencia, flujo y altura hidráulica,

para luego seleccionar una que se ajuste criterios como conveniencia logística, inversión inicial, mantenimiento y garantías.

La fuente principal de agua es una represa que tiene aproximadamente 50m de diámetro con 3m de profundidad, que tiene unos reservorios desde donde se bombeará a la red hídrica.

Figura 3-2. Diagrama de Moody



Fuente: (Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019)

3.3 Sistema eléctrico – Paneles solares

Una vez seleccionada la bomba, se puede conocer el requerimiento de potencia de estado estable a las condiciones de diseño por lo que de ahí se consigue la energía necesaria para accionar la bomba durante 1 día, según la Ecuación 7 (Cengel & Boles, 2019) .

$$E_b = Pot_b \cdot t_R$$

Ecuación 7

donde E_b es la energía hidráulica de la bomba en un día, Pot_b es la potencia nominal de la bomba y t_R es el tiempo estipulado para el riego en un día. La energía de alimentación a la bomba se relaciona con la energía hidráulica por medio de la eficiencia tal como se muestra la Ecuación 8 (Cengel & Boles, 2019).

$$E_e = \frac{E_h}{EF_{mb}}$$

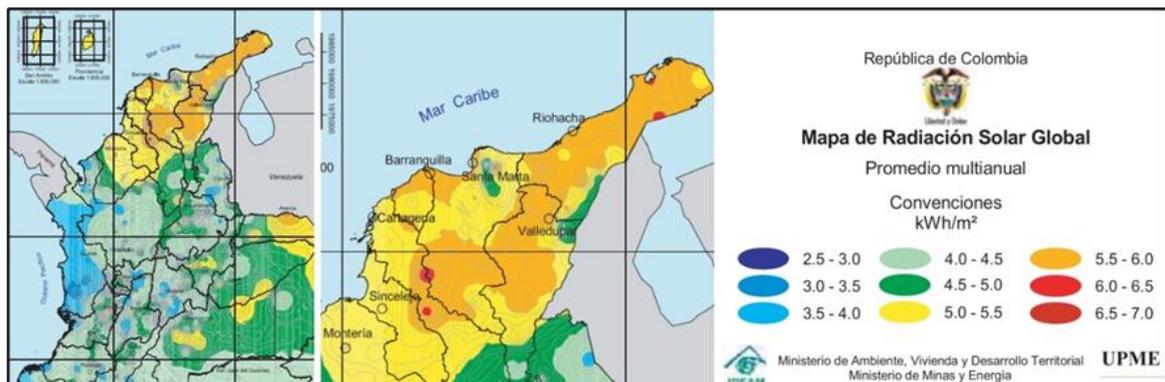
Ecuación 8

Donde E_e es la energía eléctrica, E_h es la hidráulica y EF_{mb} es la eficiencia de la bomba. En este caso particular, la potencia nominal de la bomba se refiere a la potencia de alimentación, que está relacionada por catálogo con las condiciones hidráulicas, por lo que se entiende que la eficiencia ya está incluida para los cálculos eléctricos.

A continuación, se dimensionan los elementos solares fotovoltaicos que tendrán como tarea alimentar a la bomba.

El potencial de generación fotovoltaica a lo largo del día y del año se toma del atlas de irradiación del IDEAM (Unidad de Planeación Minero Energética - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2005.) y como puede verse en la Figura 3-3, en la zona del Carmen de Bolívar tiene un rango interanual de 5 a 6 kWh/m². Por lo que se tomará el promedio (5,5 kWh/m²) para estimar la incidencia de potencia solar al sistema.

Figura 3-3. Detalle de mapa de radiación solar promedio en el norte de Colombia.



Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2005.)

La energía eléctrica para almacenar (E_C) se calcula de acuerdo con la Ecuación 9 (Enriquez, 2014), donde E_i es igual a la energía que se recibe por insolación, η_p es la eficiencia del panel, A_p es el área del panel, n_p es el número de paneles, y n_d es el número de días de autonomía. Los paneles declaran una pérdida de eficiencia con el tiempo, representado con un factor de confiabilidad (f_p) que es la capacidad garantizada tras 10 años de trabajo continuo.

$$E_C = f_p \cdot \eta_p \cdot E_i \cdot A_p \cdot n_p \cdot n_d \quad \text{Ecuación 9}$$

En el caso del presente trabajo, se tomó como supuesto que no existirán 2 días seguidos con baja radiación solar, por lo que la autonomía del almacenamiento debe ser justamente para alimentar la bomba durante 1 día de riego.

La cantidad de paneles se calcula balanceando la Ecuación 10 (Cengel & Boles, 2019).

$$E_b \leq n_p \cdot E_{cu} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde E_{cu} es la energía almacenada por un solo panel y n_p es el mínimo entero que cumple la desigualdad.

El almacenamiento, en términos de corriente se calcula con la Ecuación 11 (Enriquez, 2014) donde I_C es la corriente total acumulada medida en Ah en un día, y V_p es la tensión del panel.

$$I_C = E_C / V_p \quad \text{Ecuación 11}$$

La cantidad mínima de baterías se calcula con la Ecuación 12 (Enriquez, 2014) donde n_{BMin} es el número de baterías, I_{BMin} es la capacidad de la batería en Ah.

$$n_{BMin} \geq I_C / I_{BMin} \quad \text{Ecuación 12}$$

Otra condición que deben cumplir las baterías es tener una tensión siempre inferior a la del panel, pero suficientemente alta para evitar que la corriente aumente y sobrecaliente el sistema, por lo que se estima un arreglo mínimo de acuerdo a la Ecuación 13 (Enriquez, 2014), donde V_p es la tensión de los paneles, V_B es la tensión de batería individual, V_{BA} es la tensión del arreglo mínimo, y n_{BA} es la cantidad de baterías individuales conectadas en serie para conseguir la tensión del arreglo. Entonces la cantidad de baterías a comprar es el entero mayor entre n_{BA} y n_{BMin}/n_{BA} .

$$0,7 \approx \frac{V_{BA}}{V_p} = \frac{n_{BA} \cdot V_B}{V_p} \quad \text{Ecuación 13}$$

El sistema adicionalmente debe controlar la entrada y la salida de corriente de los paneles a las baterías, y de estas a la bomba, por lo que es necesario interconectarlo con una fase contactor-inversor. La eficiencia de estos suele ser alta por lo que el único criterio de selección es que coincida con las condiciones de potencia, tensión y corriente de diseño.

3.3.1 Selección de elementos de sistema de paneles solares

La selección de los elementos del sistema de paneles solares se realiza teniendo en cuenta los cálculos de la necesidad de agua, sistema hidráulico, la capacidad requerida por el sistema y la energía que puede suministrar el panel solar seleccionado. En dicho caso, se deben tener las condiciones técnico-económicas. Las de tipo técnicas presentan la capacidad necesitada por el sistema a seleccionar. Partiendo de esa base se seleccionó el sistema que consta de:

- Paneles solares
- Baterías o almacenadores
- Inversor
- Regulador
- Estructura para soporte de kit solar

Posterior a la selección, se plantea un presupuesto que tiene en cuenta los costos asociados a los elementos seleccionados, y con base en dicho valor se realizan los cálculos de retorno a la inversión simple o en su defecto el análisis de viabilidad.

3.4 Análisis de costos

El análisis de costos se llevará a cabo comparando los siguientes ítems:

1. Los costos de equipos principales (bomba sumergible, sistema de riego en general, acometida eléctrica, estructuras y regulador), Alimentados eléctricamente a través del sistema interconectado nacional de Colombia.
2. Los costos de equipos principales (bomba sumergible, sistema de riego en general, planta eléctrica, estructuras y regulador), teniendo en cuenta que los sistemas instalados para suministrar energía no vienen del fluido eléctrico público, sino de plantas a Diesel o gasolina por lo cual se asumirán variables como la selección de la planta, costo de la planta, los costos de mantenimientos de la planta y los costos por el acceso al combustible en determinado lugar de instalación.
3. Los costos principales para el sistema de paneles solares se tendrán la bomba sumergible, sistema de riego en general, paneles solares, las baterías, el inversor, estructuras y regulador.

Como ahorro se toma el cálculo de la energía generada por el sistema fotovoltaico multiplicado por el precio de kWh que suele aparecer en el recibo de la electricidad. En el caso de este trabajo el valor es tomado de la empresa prestadora del servicio Afinia EPM – CaribeMar S.A.S el cual es de \$400.5kW/h.

Adicionalmente, una medida de evaluar el proyecto en función del tiempo es el de retorno simple, este indicará cuántos periodos constantes de ahorro e ingresos son equivalentes a una inversión total dada tal como se muestra en la Ecuación 14 (Fernandez, 2021)

$$\text{Periodo simple de recuperación (años)} = \frac{\text{Inversión (COP)}}{\text{Ahorros anuales } \left(\frac{\text{COP}}{\text{Año}}\right)} \quad \text{Ecuación 14}$$

El retorno simple de inversión no tiene en cuenta fluctuaciones del flujo de caja en el tiempo como intereses, inflación, inversiones parciales, gastos no constantes, etc.

3.5 Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento se desarrollará en el contexto que la instalación de paneles solares genere suficientes ahorros sobre la inversión. Como consecuencia, esta gestión va direccionada al correcto uso de los recursos invertidos en el sistema de riego por goteo para el cultivo de ñame. Por lo tanto, se planificaron actividades de mantenimiento consecuentes a la inversión y de los ahorros esperados en el proyecto.

Como principales componentes tenemos:

1. Plan de mantenimiento preventivo
2. Plan de mantenimiento correctivo
3. Plan de mantenimiento predictivo

El plan preventivo evidenciará actividades tales como:

- inspección
- Limpieza
- Servicio
- Prueba
- Respuesta en caso de emergencia

El plan correctivo evidenciará actividades tales como:

- Reparación
- Respuesta en caso de emergencia

El plan predictivo se basará en conceptos entorno a las posibles causas de fallas y como prevenirlas.

4. Capítulo 4 – Resultados y discusión

4.1 Fase 1 – Sistema de riego, sistema hidráulico y sistema de bombeo

La primera fase de resultados inicia con la selección del sistema de riego, donde se evidencia y se comparan los modelos que nos permitan cumplir con la capacidad de agua requerida por el cultivo en el tiempo estimado con una mejor eficiencia. Dicha comparación se realizó utilizando el estado de arte, los modelos de riego para esta planta y documentos suministrados por el ministerio de agricultura (MinAgricultura, 2020). El modelo seleccionado es el de sistema por goteo, el cual resultó ser el más conveniente debido a las condiciones de crecimiento del ñame, ya que los excesos de agua generan deterioro en el cultivo (podredumbre en la siembra). Lo anterior fue corroborado y presentado en el estado del arte por (Espinosa, Carvajal, Rojas, & Bolaños-Benavides, 2018) mostrando una solución a los diversos tipos de ñame en tierras cercanas a la estudiada en este trabajo. Finalmente, y teniendo en cuenta lo anterior, se selecciona el sistema por goteo con una configuración de bomba directa que suministre el agua al sistema de riego, manteniendo un uso intermitente de dicha bomba, teniendo en cuenta que la energía que se va utilizar es totalmente renovable.

4.1.1 Cálculos agronómicos

En la Figura 4-1 se muestra la ubicación de la finca santa fe, ubicada a 1.5km de la población del Carmen de Bolívar, la cual cuenta con 92 hectáreas de las cuales se dispondrá media hectárea para la realización del diseño con las características mostradas en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Condiciones del terreno de siembra de ñame

Ubicación para el sistema de bombeo	Carmen de Bolívar, Colombia
Cantidad aprox. de plantas	2000 semillas de ñame
Área general	92ha
Área de plantación	0.5ha
Textura del suelo	Franco-Arenoso

Figura 4-1. Ubicación satelital de la Finca Santa Fé ubicada en el Carmen de Bolívar



En la Tabla 4-1 se especificaron las condiciones del suelo del lugar que se muestra en la Figura 4-1 como el seleccionado para realizar la siembra. En esa zona se tiene un valor de evotranspiración de referencia (Eto) de 109mm/mes, equivalente a 3,63mm/día dividiendo por 30 días tal como se muestra en la carta de evotranspiración (FAO, 2006) y el trabajo realizado por (Mendivelso, 2016). El coeficiente de cultivo (Kc) está entre 0,45 y 0,75, por lo que se toma un valor promedio de 0,60. Esto se reemplaza en la Ecuación 1.

4.1.1.1 Cálculo de necesidad de agua

La necesidad de agua de la planta es la perdida por evotranspiración menos la que recibe por precipitación. El sistema debe ser capaz de funcionar incluso en época de poca lluvia, por lo que se calcula con una precipitación (P) de cero. Luego se toma una eficiencia del riego del 90% típico en el riego por goteo como muestra (Mendivelso, 2016) y otros trabajos de sistemas de riego (Caicedo, Cotes, & Cure, 2012). Estos valores se reemplazan en la Ecuación 2 y la Ecuación 3.

$$E_{tc} = 3,63 \frac{mm}{día} \cdot 0,60 = 2,18 \frac{mm}{día} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$N_n = 2,18 \frac{mm}{día} - 75\% * 0 \frac{mm}{día} = 2,18 \frac{mm}{día} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$N_b = 90\% * 2,18 \frac{mm}{día} = 2,4 \frac{mm}{día} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para pasar de la necesidad hídrica calculada a un resultante de caudal en el área estudiada, se realiza la conversión de la Ecuación 4, multiplicando por media hectárea y dividiendo por el tiempo de riego, que es 3 horas.

$$Q = \frac{(100 * 50)m^2}{3h} * 2,4 \frac{mm}{día} = 4 \frac{m^3}{h} \quad \text{Ecuación 4}$$

4.1.1.2 Sistema hidráulico

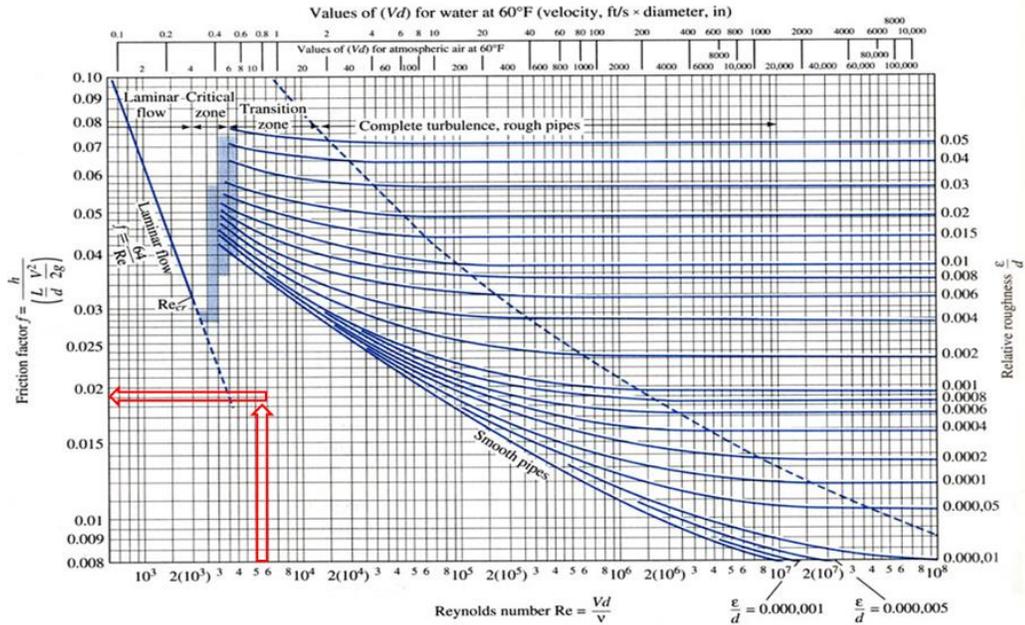
Con el caudal de agua calculado, se estima un diámetro de tubería adecuado para conseguir una velocidad recomendada en la Tabla 3-1. valores de 1 y 2 pulgadas se reemplaza en la Ecuación 5 para verificar cuál es más adecuado. Se toma entonces como adecuado el diámetro de 1 pulgada.

$$v = \frac{4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{h}{3600s}}{\pi \frac{(1in \cdot \frac{0,0254m}{in})^2}{4}} = 2,2 \frac{m}{s}$$

Ecuación 5

$$v = \frac{4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{h}{3600s}}{\pi \frac{(2plg \cdot \frac{0,0254m}{in})^2}{4}} = 0,55 \frac{m}{s}$$

Figura 4-2. Estimación de factor de fricción para Re=55.000



Finalmente, se obtiene la presión por fricción en la tubería reemplazando los resultados obtenidos en la Ecuación 6

$$H_t = 0,02 \frac{142m \cdot 64 \left(4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{h}{3600s}\right)^2}{\left(1in \cdot \frac{0,0254m}{in}\right)^5 \cdot 2 \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}} = 27,4 m \quad \text{Ecuación 6}$$

La cabeza de la bomba se consigue sumando la pérdida de la tubería más la altura de almacenamiento que es 4m, en total 31,4m.

A continuación, se muestra en la Figura 4-3 al menos 5 bombas que podrían cumplir con las condiciones de presión y caudal requerido del catálogo de bombas HASA (Hidraulica Alsina SA, 2015). Resaltado en rojo, se indica el cruce de los valores tabulados orientativos que se acercan al caudal de 4m³/h y al menos 30m de cabeza. La quinta bomba, que muestra un máximo de 28m, se incluye por ser recomendada en el mismo catálogo para riego por goteo.

Figura 4-3. Fragmento de catálogo para selección de bombas.

Modelo Model Modèle	P2		I (A)				Ø		Altura manométrica							
	kW	CV	1~ 230V	3~ 230V	3~ 400V	Asp	Imp	10	15	20	25	30	35	40		
NIZA 4.2 M (NIZA 35/2M)	0,26	0,35	2,4	-	-	1"	1"	4000	3300	1200						
NIZA 4.3 M (NIZA 60/3M)	0,37	0,5	3,3	-	-	1"	1"	4500	3800	3400	2500	1600				
NIZA 4.4 M (NIZA 80/4M)	0,55	0,75	3,9	-	-	1"	1"	4800	4200	4000	3500	2800	2100	3000		
NIZA 4.5 M	0,75	1	5,0	-	-	1"	1"	5000	4500	4200	3800	3300	2800	2200		
NIZA 4.5 T	0,75	1	-	3,3	1,9	1"	1"	5000	4500	4200	3800	3300	2800	2200		
NIZA 6.3 M	0,6	0,8	4,0	-	-	1"	1"	5500	5100	4600	3900	2800	1000			
NIZA 6.3 T	0,6	0,8	-	2,8	1,6	1"	1"	5500	5100	4600	3900	2800	1000			
NIZA 6.4 M (NIZA 100/4M)	0,75	1	5,2	-	-	1"	1"	5700	5400	5000	4600	4200	3800	3000		
NIZA 6.4 T (NIZA 100/4T)	0,75	1	-	3,6	2,1	1"	1"	5700	5400	5000	4600	4200	3800	3000		
NIZA 6.5 M (NIZA 130/5M)	0,96	1,3	6,2	-	-	1"	1"	6000	5700	5400	5100	4800	4400	4100		

Flow / Débit (l/h)

Modelo Model Modèle	P2		I (A)				Ø		Altura manométrica / Height /									
	kW	CV	1~ 230V	3~ 230V	3~ 400V	3~ 690V	Asp	Imp	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
HT-80	0,6	0,8	-	2,6	1,5	-	1 1/2"	1"	3500	2900	2000	1500	700					
HM-80	0,6	0,8	4,5	-	-	-	1 1/2"	1"	3500	2900	2000	1500	700					
HT-100	0,75	1	-	3,2	1,8	-	1 1/2"	1"	4500	4000	3300	2400	1500	1000				
HM-100	0,75	1	5,2	-	-	-	1 1/2"	1"	4500	4000	3300	2400	1500	1000				
HT-150	1,1	1,5	-	4,8	3	-	1 1/2"	1"		6000	5200	4800	3600	2400	900			
HM-150	1,1	1,5	8	-	-	-	1 1/2"	1"		6000	5200	4800	3600	2400	900			
HT-200	1,5	2	-	6,4	3,8	-	1 1/2"	1"		7500	6900	6400	6000	5200	4600	3600	2400	900

Flow / Débit (l/h)

Modelo Model Modèle	P2		I (A)				Ø		Altura manométrica / Height / Hateur (m)													
	kW	CV	1~ 230V	3~ 230V	3~ 400V	Asp	Imp	6	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
RGT-8	0,6	0,8	-	2,6	1,5	1 1/2"	1 1/2"	14700	12700	11900	10500	9100	8000	4800	1500							
RGM-8	0,6	0,8	4,5	-	-	1 1/2"	1 1/2"	14700	12700	11900	10500	9100	8000	4800	1500							
RGT-10	0,75	1	-	3	1,8	1 1/2"	1 1/2"	19200	17100	16100	15000	14400	13300	9200	4800	1800						
RGM-10	0,75	1	5	-	-	1 1/2"	1 1/2"	19200	17100	16100	15000	14400	13300	9200	4800	1800						
RGT-15	1,1	1,5	-	5,9	3,4	2"	2"	27000	26400	25600	24300	23500	22600	21700	20700	18600	16100	13000	8000			
RGM-15	1,1	1,5	9,2	-	-	2"	2"	27000	26400	25600	24300	23500	22600	21700	20700	18600	16100	13000	8000			
RGT-20	1,5	2	-	7,2	4,2	2"	2"	29200	28600	27900	25800	25200	24400	23600	22800	21000	19000	17000	14300	11000	6000	
RGM-20	1,5	2	11,5	-	-	2"	2"	29200	28600	27900	25800	25200	24400	23600	22800	21000	19000	17000	14300	11000	6000	

Caudal / Flow / Débit (l/h)

Fuente: catálogo de bombas HASA

En la Figura 4-3 se muestran las características de las bombas preseleccionadas. Debido a que los cálculos presentados en este trabajo son para condiciones extremas en las que posiblemente no llueva, no será necesario que la bomba tenga capacidad adicional por lo que elegir la más pequeña es suficiente. Aparte, no parece haber diferencias significativas de material de fabricación. Así las cosas, será suficiente con la electrobomba NIZA 6,4M que, por tener menos consumo y ser de una fase, simplifica la instalación eléctrica.

Adicionalmente de aquí se desprende que será necesario que el inversor tenga salida de mínimo 230V y 0,75kW.

Tabla 4-3. Características de bombas preseleccionadas

Modelo	NIZA 6,4M	NIZA 6,4M	HT-150	HM-150	RGT-20
Imagen					
Aplicaciones	Electrobombas muy silenciosas ideales para pequeños grupos de presión domésticos, viviendas unifamiliares y riegos por aspersión.		Electrobombas biturbinas ideales para grupos de presión, instalaciones industriales y agrícolas.		Electrobombas robustas de gran caudal y baja presión ideales para riegos de goteo y canales abiertos.
Materiales	Eje en acero inoxidable AISI 316. Tapa aspiración y cuerpo unión en fundición gris. Turbinas y camisa en acero inoxidable AISI 304. Difusores en policarbonato con fibra de vidrio. Cierre mecánico de alta calidad.		Eje en acero inoxidable. Tapa de aspiración, cuerpo de bomba y cuerpo de unión en fundición gris G-20. Turbinas estampadas en latón. Cierre mecánico de alta calidad.		Eje en acero inoxidable. Cuerpo de bomba y cuerpo de unión en fundición gris G-20. Turbinas en latón. Cierre mecánico de alta calidad.
Características	Bombas monobloc. Motor cerrado con ventilación externa. Protector térmico incorporado. Protección IP-44. Aislamiento clase F. Temperatura máxima del agua 40 °C.		Bombas monobloc. Motor cerrado con ventilación externa. Protección IP-44. Aislamiento clase F. Temperatura máxima del agua 80 °C.		Bombas monobloc. Motor cerrado con ventilación externa. Protección IP-44. Aislamiento clase F. Temperatura máxima del agua 80 °C.
Potencia	0,75kW		1,1kW		1,5kW
Condición eléctrica	1Fase Alterna 230V 5,2A	3Fase Alterna 230V 3,6A	3Fase Alterna 230V 4,8A	1Fase Alterna 230V 8A	3Fase Alterna 230V 7,3A

Fuente: catálogo de bombas HASA

4.1.2 Cálculos de materiales para sistema de riego

Este cálculo se realizó teniendo en cuenta la distribución de la siembra de ñame. En la Tabla 4-4 se muestran los materiales necesarios para el sistema de riego por goteo, suministrado en horas del día.

Tabla 4-4. Presupuesto para sistema de riego por goteo de cultivo de ñame

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Tubería PVC 2"-6m	c/u	20	\$ 54.900,00	\$ 1.098.000,00
Tubería PVC 1"-6m	c/u	167	\$ 30.000,00	\$ 5.010.000,00
Tubería PE 1" - Rollo de 100m	c/u	10	\$ 175.000,00	\$ 1.750.000,00
Accesorios	c/u	250	\$ 4.000,00	\$ 1.000.000,00
Válvula cierre rápido (Principal)	c/u	1	\$ 12.000,00	\$ 12.000,00
Válvulas de sector	c/u	4	\$ 6.000,00	\$ 24.000,00
Válvulas reguladoras de presión	c/u	1	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00
Filtros	c/u	1	\$ 250.000,00	\$ 250.000,00
Goteros	c/u	800	\$ 750,00	\$ 600.000,00
Electrobomba 1HP	c/u	1	\$ 250.000,00	\$ 250.000,00
				\$ 10.174.000,00

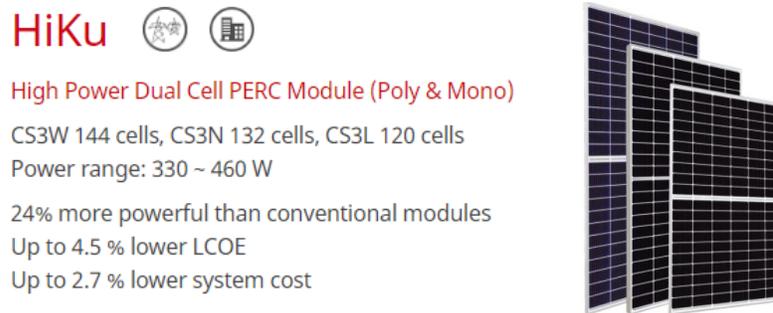
En la Tabla 4-4, se indica la cantidad en unidad y en metros de los elementos correspondientes y necesarios para un sistema de riego por goteo adaptado para el caso de estudio. Estas cantidades se calcularon de manera aproximada teniendo en cuenta las dimensiones de sistema de riego (Ver anexo A) y los equipos seleccionados mediante los cálculos basados en un TRM de 3.749 COP. Este valor final se tendrá en cuenta para fines comparativos de las siembras mediante 3 métodos:

1. Método convencional con acceso a suministro eléctrico del sistema interconectado nacional.
2. Método con suministro de energía mediante plantas a gasolina o Diesel
3. Método de estudio con suministro mediante paneles solares.

4.2 Fase 2 – Sistema de paneles solares

Teniendo en cuenta los cálculos anteriormente realizados, y la bomba seleccionada de 1HP, se realizó una búsqueda de las tecnologías más completas para el sistema de energía fotovoltaica, es decir, paneles, inversor, baterías y otros equipos necesarios para obtener energía eléctrica de la radiación solar. Mediante la búsqueda encontramos las tecnologías mostradas en las siguientes imágenes:

Figura 4-4. Panel sugerido para electrificación fotovoltaica.



Fuente: canadiansolar.com (Canadian Solar, s.f.)

Las necesidades mostradas por los cálculos evidencian que se necesitan 2 paneles de 330W para cumplir con la capacidad necesitada por la bomba. En la Figura 4-4 se evidencia una marca sugerida para la implementación del sistema de alimentación eléctrica mediante paneles solares. Así mismo, en la Figura 4-5 se muestran las baterías que en este caso serían 2. Estas baterías se utilizan en caso de que el día se encuentre con poca incidencia solar y el panel no pueda captar la energía necesaria (respaldo energético).

Figura 4-5. Batería sugerida para almacenamiento eléctrico.



Fuente: mtek-sa.com (MTEK, s.f.)

Figura 4-6. Inversor sugerido para el kit solar



Fuente: (Mercadolibre, 2022)

Figura 4-7. Regulador de voltaje



Fuente: (Mercadolibre, 2022)

Teniendo en cuenta las condiciones de potencia de la bomba se selecciona el sistema fotovoltaico y de baterías con base en los elementos mostrados en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Componentes eléctricos de base.

Elemento eléctrico			Fuente
Panel solar $Pot_p = 330W$ $\eta_p = 19,6\%$ $V_p = 36V$	$I_p = 9,18A$ $A_p = 1,69m^2$ $M_p = 19,2kg$	$f_p = 95\%$	(Canadian Solar, s.f.)
Batería eléctrica $V_B = 12V$ $I_B = 120Ah$	$A_p = 1,69m^2$	$M_p = 19,2kg$	(MTEK, s.f.)
Motobomba $Pot_B = 750W$	$V_B = 230V$		(Hidraulica Alsina SA, 2015)

A partir de la Tabla 4-5 se remplazan los parámetros de paneles y baterías en las siguientes ecuaciones.

$$E_b = 0,75kW \cdot 3h = 2,3kWh \quad \text{Ecuación 7}$$

$$E_{CU} = 95\% \cdot 19,6\% \cdot 5,5 \frac{kWh}{m^2} \cdot 1,68m^2 \cdot 1 = 1,73kWh \quad \text{Ecuación 9}$$

$$n_p = \frac{2,3 kWh}{1,73kWh} = 1,3 \approx 2 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$E_C = 95\% \cdot 19,6\% \cdot 5,5 \frac{kWh}{m^2} \cdot 1,68m^2 \cdot 2 = 3,45kWh \quad \text{Ecuación 9}$$

$$I_C = \frac{3450Wh}{36V} = 96Ah \quad \text{Ecuación 11}$$

$$n_{BMin} = \frac{96Ah}{120Ah} = 0,79 \approx 1 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$0,7 \cdot 36V = 25,7V \approx V_{BA} = 24V; n_{BA} = \frac{24V}{12V} = 2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Por lo anterior, resulta que, en la práctica, para alimentar la bomba de 750W durante 3 horas diarias, son suficientes 2 paneles de 330W y 2 baterías de 120Ah. En la Tabla 4-6 se evidencia la inversión inicial para la instalación y funcionamiento de los paneles acoplados a la bomba con valores extraídos de HomeCenter (Homecenter, 2022), MercadoLibre (Mercadolibre, 2022), MTEK (MTEK, s.f.) y Canadian (Canadian Solar, s.f.).

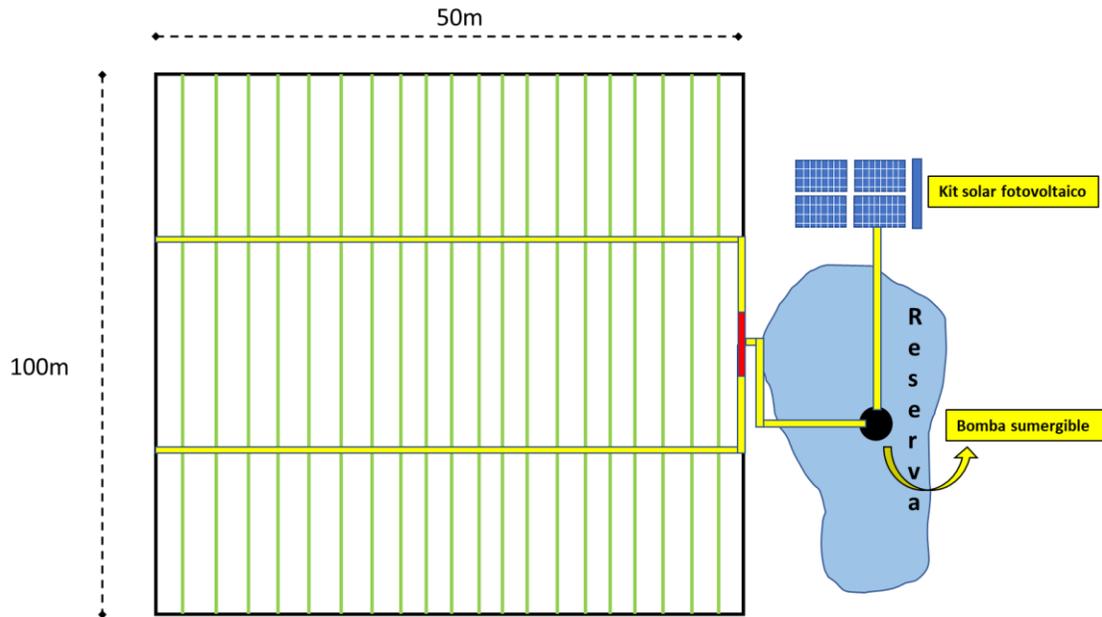
Tabla 4-6. Presupuesto para sistema de paneles solares

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Paneles solares	c/u	2	\$ 650.000,00	\$ 1.300.000,00
Estructura en aluminio	c/u	1	\$ 800.000,00	\$ 800.000,00
Inversor	c/u	1	\$ 355.000,00	\$ 355.000,00
Baterías	c/u	2	\$ 1.400.000,00	\$ 2.800.000,00
Acometida eléctrica	c/u	1	\$ 500.000,00	\$ 500.000,00
Regulador de voltaje	c/u	1	\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
				\$ 5.805.000,00

4.2.1 Diseño final con paneles solares

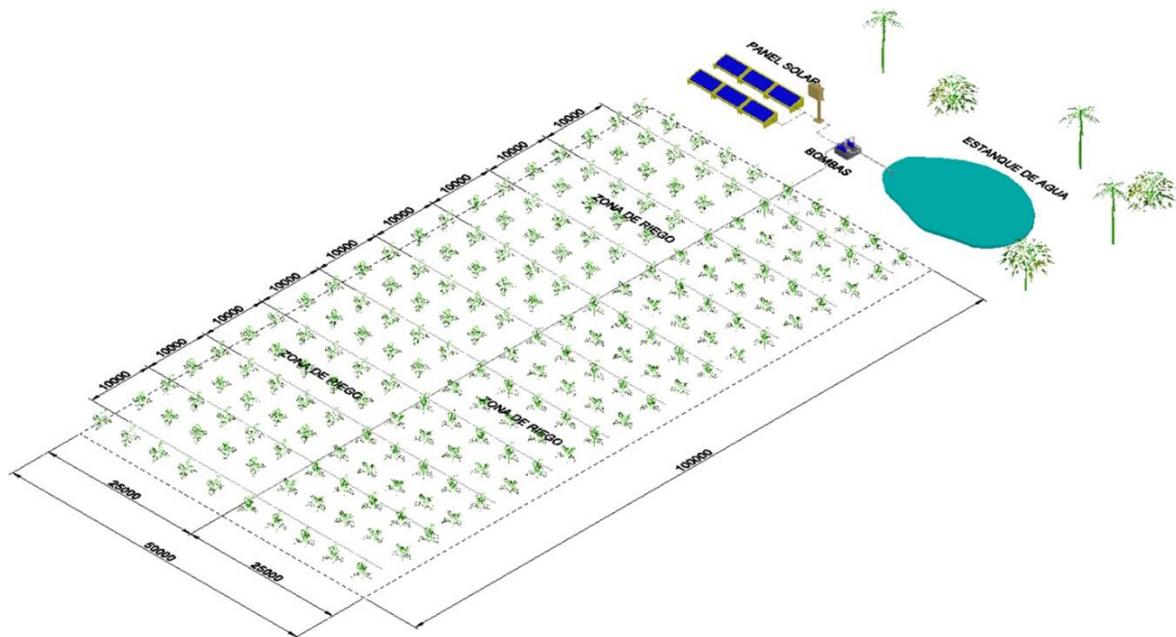
En la Figura 4-8 se muestra el sistema de paneles solares con el sistema de riego para el cultivo de ñame. Dicho sistema muestra el reservorio de agua que en este caso es una presa profunda (3-4m) de la cual se puede extraer la cantidad de agua necesaria para realizar el riego del cultivo sin que se agote, teniendo en cuenta que la extensión de dicha presa es amplia. Adicionalmente, se selecciona esta área de siembra para evitar de manera directa el agotamiento de agua y se sugiere tomar dicha agua de un pozo profundo el cual está ubicado a una mayor distancia del terreno dispuesto para el cultivo.

Figura 4-8. Esquema del sistema de riego con paneles fotovoltaicos y sistema de riego



Fuente: Autores

Figura 4-9. Diseño CAD del sistema de riego por goteo con instalación de paneles solares



Fuente: Autores.

4.3 Fase 3 – Estudio de viabilidad y costos

Los costos de producción del ñame se estimaron teniendo en cuenta al documento generado anualmente por el ministerio de agricultura titulado “Organización de Cadena Nacional del Ñame (MinAgricultura, 2020)” el cual sirvió como base fundamental para el cálculo de los valores, realizando una correlación con la inversión inicial.

La Tabla 4-7 muestra la inversión inicial que se realiza para media hectárea con un sistema convencional para siembra de ñame. Esta tabla muestra los costos básicos que se necesitan para la siembra de un sistema convencional.

Tabla 4-7. Presupuesto para siembra de ñame

SISTEMA CONVENCIONAL PARA RIEGO DE ÑAME SEGÚN MINISTERIO DE AGRICULTURA PARA MEDIA HECTAREA			
Item	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Semilla	800	\$ 800,00	\$ 640.000,00
Enmiendas, abonos y fertilizantes	1	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00
Herbicidas	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Insecticidas y control de plagas	3	\$ 4.000,00	\$ 12.000,00
Coadyuvantes y madurantes	1,5	\$ 30.000,00	\$ 45.000,00
Empaques	1	\$ 80.000,00	\$ 80.000,00
Subtotal de insumos			\$ 972.000,00
Mano de obra (incluye riego) - Tarifa medio día durante un mes	150	\$ 25.000,00	\$ 3.750.000,00
Subtotal de costos directos			\$ 3.750.000,00
Arrendamiento de tierras	0,5	\$ 600.000,00	\$ 300.000,00
Subtotal de costos indirectos			\$ 300.000,00
Total costos de producción			\$ 5.022.000,00

Fuente: (MinAgricultura, 2020)

El presupuesto mostrado en la Tabla 4-8 se estimó teniendo en cuenta el mostrado anteriormente (ver Tabla 4-7). Dicho presupuesto es el estimado por el ministerio de agricultura, pero este se realizó teniendo en cuenta otros factores tales como inversión

inicial, sistema de riego (incluye bomba y planta), consumo de combustible y mantenimientos tal como se muestra en la Tabla 4-8. Teniendo en cuenta los valores observados en la Tabla 4-8, la implementación del sistema por goteo utilizando generador eléctrico es de \$17.351.000 COP lo que nos indica que tecnificar el riego con respecto a lo utilizado hoy día (ver Tabla 4-7), mostraría una inversión adicional de \$12.329.000 COP. Cabe resaltar que esta sería la inversión para un año de siembra.

Tabla 4-8. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con generador eléctrico

SISTEMA PARA RIEGO DE ÑAME SEGÚN MINISTERIO DE AGRICULTURA CON GENERADOR ELECTRICO PARA MEDIA HECTAREA			
Ítem	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Semilla	800	\$ 800,00	\$ 640.000,00
Enmiendas, abonos y fertilizantes	1	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00
Herbicidas	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Insecticidas y control de plagas	3	\$ 4.000,00	\$ 12.000,00
Coadyuvantes y madurantes	1,5	\$ 30.000,00	\$ 45.000,00
Empaques	1	\$ 80.000,00	\$ 80.000,00
Electrobomba centrifuga	1	\$ 1.729.900,00	\$ 1.729.900,00
Plante eléctrico de 1200W	1	\$ 1.100.000,00	\$ 1.100.000,00
Sistema de riego	1	\$ 10.174.000,00	\$ 10.174.000,00
Subtotal de insumos			\$ 13.975.900,00
Mano de obra	60	\$ 25.000,00	\$ 1.500.000,00
Mano de obra de sistema de riego	5	\$ 40.000,00	\$ 200.000,00
Combustible en gasolina	300	\$ 3.585,00	\$ 1.075.500,00
Mantenimiento de planta y bomba	3	\$ 100.000,00	\$ 300.000,00
Subtotal de costos directos			\$ 3.075.500,00
Arrendamiento de tierras	0,5	\$ 600.000,00	\$ 300.000,00
Subtotal de costos indirectos			\$ 300.000,00
Total costos de producción			\$ 17.351.400,00

En la Tabla 4-9 se muestra el mismo sistema de riego, bajo las mismas condiciones, con el cambio del suministro de energía. En este caso se supuso el suministro de energía del fluido eléctrico para dicha zona con valores de 400.5kW/h los cuales son los aproximados para los municipios del departamento de Bolívar (Fernandez, 2021). Al igual que en los

resultados anteriores, se evidencia que en este sistema también se necesita una inversión adicional para el costo de sistema de bombeo de \$11.734.500 COP para un año de siembra. Posterior a eso solamente se realizará el pago de los consumibles y de mantenimientos.

Tabla 4-9. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con fluido eléctrico

SISTEMA PARA RIEGO DE ÑAME SEGÚN MINISTERIO DE AGRICULTURA UTILIZANDO EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL PARA MEDIA HECTAREA			
Ítem	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Semilla	800	\$ 800,00	\$ 640.000,00
Enmiendas, abonos y fertilizantes	1	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00
Herbicidas	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Insecticidas y control de plagas	3	\$ 4.000,00	\$ 12.000,00
Coadyuvantes y madurantes	1,5	\$ 30.000,00	\$ 45.000,00
Empaques	1	\$ 80.000,00	\$ 80.000,00
Electrobomba centrifuga	1	\$ 1.729.900,00	\$ 1.729.900,00
Sistema de riego	1	\$ 10.174.000,00	\$ 10.174.000,00
Generador de respaldo	1	\$ 1.100.000,00	\$ 1.100.000,00
Subtotal de insumos			\$ 13.975.900,00
Mano de obra	60	\$ 25.000,00	\$ 1.500.000,00
Mano de obra de sistema de riego	5	\$ 40.000,00	\$ 200.000,00
Costo de kW/h para el cultivo	900	\$ 534,00	\$ 480.600,00
Mantenimiento de planta y bomba	3	\$ 100.000,00	\$ 300.000,00
Subtotal de costos directos			\$ 2.480.600,00
Arrendamiento de tierras	0,5	\$ 600.000,00	\$ 300.000,00
Subtotal de costos indirectos			\$ 300.000,00
Total costos de producción			\$ 16.756.500,00

Con base en los sistemas anteriores, se realizó un análisis con el sistema de paneles solares para poder validar el costo inicial de ambos y así obtener la proyección que permitiese escoger el mejor sistema. En la Tabla 4-10 se muestra la inversión del sistema con paneles solares donde se puede apreciar cómo se adaptaron los valores convencionales al kit solar y los elementos de este nuevo sistema de bombeo. Se evidencia que los paneles solares generan una mayor inversión respecto a los otros sistemas de

alimentación energética. Esta diferencia reside en diversos factores, siendo el más importante que es una tecnología en crecimiento a nivel nacional y los costos de implementación son relativamente altos. Sin embargo, se puede apreciar en la tabla que los valores con respecto a los otros sistemas no se encuentran excesivamente alejados por lo que la recuperación, nivelación y generación de ganancias de los paneles solares son rápidas respecto a los otros sistemas.

Tabla 4-10. Presupuesto para la siembra de ñame con sistema por goteo alimentado con paneles solares

SISTEMA PARA RIEGO DE ÑAME SEGÚN MINISTERIO DE AGRICULTURA CON SISTEMA DE PANELES SOLARES PARA MEDIA HECTAREA			
Ítem	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Semilla	800	\$ 800,00	\$ 640.000,00
Enmiendas, abonos y fertilizantes	1	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00
Herbicidas	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Insecticidas y control de plagas	3	\$ 4.000,00	\$ 12.000,00
Coadyuvantes y madurantes	1,5	\$ 30.000,00	\$ 45.000,00
Empaques	1	\$ 80.000,00	\$ 80.000,00
Sistema de riego	1	\$ 10.174.000,00	\$ 10.174.000,00
Sistema de paneles solares	1	\$ 5.805.000,00	\$ 5.805.000,00
Subtotal de insumos			\$ 16.951.000,00
Mano de obra	40	\$ 25.000,00	\$ 1.000.000,00
Mantenimiento de bomba	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
Mano de obra de sistema de riego	5	\$ 40.000,00	\$ 200.000,00
Mano de obra de paneles solares	10	\$ 80.000,00	\$ 800.000,00
Subtotal de costos directos			\$ 2.100.000,00
Arrendamiento de tierras	0,5	\$ 600.000,00	\$ 500.000,00
Capacitación de personal para nuevo sistema	1	\$ 500.000,00	\$ 500.000,00
Subtotal de costos indirectos			\$ 1.000.000,00
Total costos de producción			\$ 20.051.000,00

4.3.1 Análisis comparativo de los diferentes sistemas de suministro de energía

Finalmente, se realizó un análisis comparativo de todas las configuraciones en estudio: Generador eléctrico con gasolina, suministro eléctrico a través del sistema interconectado nacional (no existente en la zona) y paneles solares. Teniendo en cuenta la comparación, la Tabla 4-11 evidencia de manera explícita los costos totales de combustibles o fluido eléctrico de los sistemas en estudio. Para mayor claridad, en dicha tabla se incluyen las eficiencias de cada sistema: en el caso del generador térmico, el poder calorífico de la gasolina se convierte en energía mecánica en el motor y ésta en electricidad en el generador cuyo valor típico es alrededor del 30%; los paneles tienen una eficiencia declarada por catálogo del 19,6%, que corresponde a la conversión de radiación solar en energía eléctrica; en el caso de la conexión a red se supone un valor estimativo de 90% teniendo en cuenta pérdidas en acometida que suelen ser de mala calidad (cables muy largos, empalmes deficientes, etc.) en entorno rural. Con esto se puede ver que los costos de implementación respecto de los sistemas eléctricos y con generador son superiores al de paneles solares. Sin embargo, teniendo en cuenta las tablas anteriores (Tabla 4-8, Tabla 4-9, Tabla 4-10) se muestra que el sistema de paneles solares necesita una inversión superior a las demás, pero un costo \$0 COP en los siguientes años respecto a los costos de combustible o fluido eléctrico lo que es conveniente para el retorno a la inversión en poco tiempo.

Tabla 4-11. Proyección a 1 año de trabajo con los diversos tipos de riego

Fuente de energía	Gasolina (COP)	Gasolina (USD)	Paneles solares (COP)	Paneles solares (USD)	Fluido eléctrico (COP)	Fluido eléctrico (USD)
Eficiencia	30%	30%	20%	20%	90%	90%
Energía requerida por hora (kWh)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Horas de riego (h)	3	3	3	3	3	3
Combustible consumido por hora (L/h)	1,50	1,50	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Costo unitario del energético	2.390 COP	0,64 USD	0 COP	0 COP	400 COP	0,11 USD
Unidad del energético	litro	litro	kWh solar	kWh solar	kWh red	kWh red
Costo del energético diario	10.755 COP	2,88 USD	0 COP	0 USD	1.000 COP	0,28 USD
Costo del energético mensual	322.650 COP	86,40 USD	0 COP	0 COP	30.000 COP	8,25 USD

Costo del energético total (10 meses)	3.226.500 COP	864,00 USD	0 COP	0 USD	300.000 COP	82,50 USD
--	------------------	---------------	-------	-------	-------------	-----------

Posterior a la proyección anual simple, se calcula una proyección aproximada simple a 5 y 10 años de los sistemas en estudio, dando prioridad al sistema de paneles solares. Se tuvieron en cuenta los costos de combustible, los costos de mantenimiento y la inversión inicial (Subtotal de insumos). Todos los valores del análisis se tomaron a precios constantes del 2022. Lo siguiente muestra que la rentabilidad de los sistemas depende mucho de la fuente de energía utilizada. Adicionalmente, la tabla evidencia que el sistema hipotético de suministro por el sistema interconectado nacional - no asequible para muchas regiones del país como la del estudio - presenta excesivas irregularidades como el racionamiento, la inoperancia en recorridos largos, la falta de mantenimiento preventivo y correctivo, por lo que los costos pueden ser variables según estipule la empresa contratista, además de otros factores que muestran a este sistema como el menos confiable de los propuestos, pues depende de un tercero.

Tabla 4-12. Retorno simple a 5 y 10 años para los diferentes sistemas

Costo a 5 años				
Item	Generador	Paneles	Sistema interconectado	Artesanal
Costo de combustible/Mano de obra	\$ 16.132.500,00	\$0,00	\$ 1.500.000,00	\$18.750.000,00
Mantenimiento de motor	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00	\$ 0,00
Costo inicial	\$ 13.975.900,00	\$16.951.000,00	\$ 13.975.900,00	\$972.000,00
total	\$ 32.108.400,00	\$ 18.951.000,00	\$ 17.475.900,00	\$19.722.000,00
Costo a 10 años				
Costo de combustible	\$ 32.265.000,00	\$0,00	\$ 3.000.000,00	\$37.500.000,00
Mantenimiento de motor	\$ 4.000.000,00	\$ 4.000.000,00	\$ 4.000.000,00	\$0,00
Costo inicial	\$ 11.975.000,00	\$17.751.000,00	\$ 13.975.000,00	\$972.000,00
total	\$ 48.240.000,00	\$ 21.751.000,00	\$ 20.975.000,00	\$38.472.000,00

Por tal razón, el sistema de paneles solares es el más eficiente en todos los términos para la implementación del sistema de riego. Es una energía limpia (acorde a la condición medioambiental), el mantenimiento es bajo, sus componentes pueden automatizarse y por consiguiente mejorar las condiciones de uso. Los valores del suministro de energía por el sistema interconectado nacional se hacen imposibles, pues muchos de estos cultivos se hacen en lugares donde este tipo de suministro de energía no está disponible. Cabe

resaltar que, los valores de riego artesanal son altos debido a que se tiene en cuenta la extensión de tierra sembrada, la cantidad de agua a regar, el promedio de horas trabajadas y otros valores adicionales en el valor del día de trabajo como se evidencia en la Tabla 4-7. (Portafolio, 2021)

Adicionalmente, se evidencia mediante el siguiente calculo, usando la ecuación 14, los valores de retorno simple de la inversión de todos los sistemas respecto al sistema de paneles solares.

$$\text{Retorno simple paneles vs generador} = \frac{\text{Inversión paneles solares}}{\text{Costo anual de generador a gasolina}}$$

$$\text{Retorno simple paneles vs generador} = \frac{\$5.805.000 \text{ COP}}{\$3.226.500 \text{ COP/AÑO}}$$

$$\text{Retorno simple de paneles vs generador} = 1.8 \text{ años} \approx 2 \text{ años}$$

Lo anterior nos evidencia la superioridad del sistema de paneles solares frente al sistema de generación a gasolina, tanto así que la recuperación de dicho sistema frente al otro es de aproximadamente es de 2 años, lo cual es positivo para las personas involucradas en dicho proyecto.

$$\text{Retorno simple paneles vs sis interconectado} = \frac{\text{Inversión paneles solares}}{\text{Costo anual de sistema interconectado}}$$

$$\text{Retorno simple paneles vs sistema interconectado} = \frac{\$5.805.000 \text{ COP}}{\$360.000 \text{ COP/AÑO}}$$

$$\text{Retorno simple de paneles vs sistema interconectado} = 16 \text{ años}$$

Respecto al análisis de riego de manera convencional o artesanal, se incluyen en la inversión los factores diferenciadores de cada inversión que en este caso son la instalación de paneles solares y la instalación del sistema riego. Adicional a eso se compara única y exclusivamente con el costo de mano de obra que sería el costo energético que asumen los sistemas instalados.

$$\text{Retorno simple paneles vs artesanal} = \frac{\text{Inversión paneles solares} + \text{Sistema de riego}}{\text{Costo de riego artesanal}}$$

$$\text{Retorno simple paneles vs artesanal} = \frac{\$15.979.000 \text{ COP}}{\$3.750.000 \text{ COP/AÑO}}$$

$$\text{Retorno simple de paneles vs artesanal} = 4.26 \text{ años}$$

Teniendo lo anterior como referencia, los valores de retorno simple de sistema de paneles solares vs sistema convencional artesanal muestran que en 4.26 años se recupera la inversión de los paneles solares con los gastos de mano de obra de riego. Por lo cual, se muestra la evidencia que tecnificar es mucho más beneficioso económicamente que continuar con el método artesanal. Cabe resaltar que estos métodos de riego son recomendados para siembras de gran extensión donde el costo de mano de obra se aumenta significativamente.

Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, los resultados de retorno simple de la inversión de sistema interconectado nacional vs paneles solares son muy altos y es apenas normal teniendo cuenta el estado del arte (Fernandez, 2021; Jamis, Vazquez, & Dávalos, 2019; Mendivelso, 2016). Sin embargo, los sistemas de suministro por el sistema interconectado nacional cuentan con bastantes adversidades en torno al tema de adquisición y la estabilidad de la red (Portafolio, 2021; Vence & Melkis, 2016).

Finalmente, se resalta que en este proyecto se destacan las condiciones iniciales, agronómicas, hídricas, solares y técnico-económicas que conllevan la implementación de un sistema de riego por goteo en una siembra de ñame en el municipio del Carmen de Bolívar de manera exitosa. Destacando la innovación del sistema de suministro energético y la motivación de aumentar la producción de uno de los productos de mayor trascendencia en la región Caribe y puntualmente en el departamento de Bolívar.

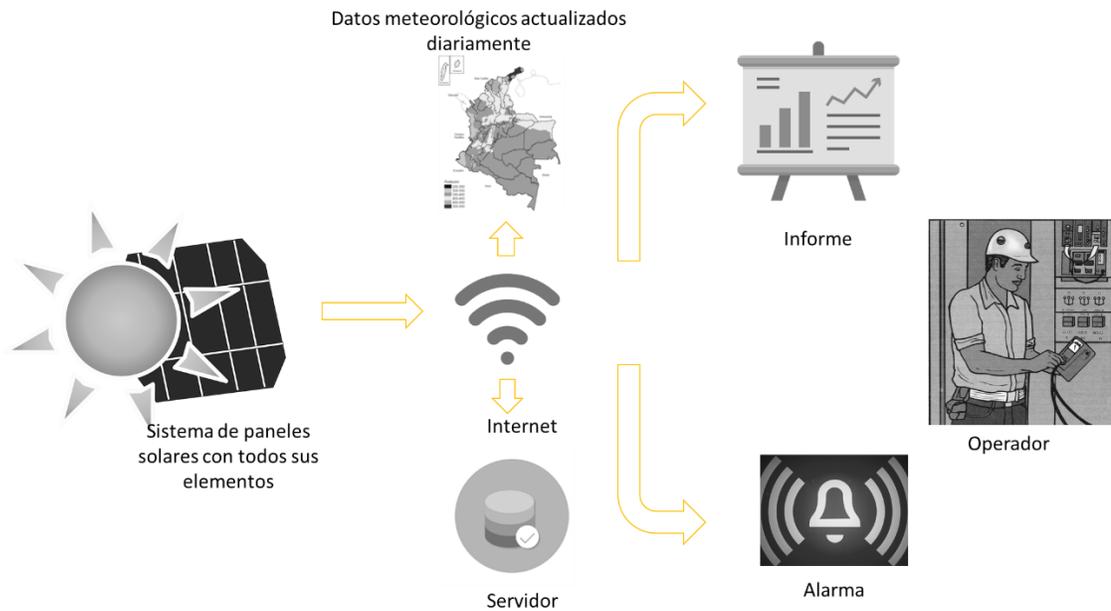
4.4 Plan de mantenimiento

Este plan de mantenimiento fue direccionado para el sistema de paneles solares para el cultivo de ñame e incluye los siguientes tópicos:

- Información de contacto de los responsables del mantenimiento y del propietario del predio de siembra. Deben incluir los números de emergencia de los instaladores y administración.
- Información general, descripción y documentación del sistema de riego instalado con paneles solares, registros fotográficos, consideraciones de seguridad, entre otras variables teniendo en cuenta la ubicación geográfica del sistema de riego con paneles solares.
- Estudios constantes y estimaciones de rendimientos de irradiación/sombra/lluvias para mejorar el funcionamiento e identificar las condiciones idóneas.
- Documentar y almacenar los manuales de los equipos utilizados donde se señalen las descripciones operacionales y de mantenimiento de estos.
- Lista de actividades de los mantenimientos preventivos, correctivos y predictivos.
- Valorización de actividades para estimar un presupuesto adicional referente al mantenimiento de los equipos. El presupuesto debe incluir costos operáticos de monitoreo y diagnóstico, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y destinación de gastos para imprevistos.
- Capacitación de personal a cargo de la siembra para limitar los llamados de emergencia por mantenimientos de menor relevancia.
- Procedimientos y ejecución de pruebas después de intervención o reparación.
- Listado de equipos con marca y modelos
- Líneas de emergencia en caso de mantenimientos externos cercanos a la población del Carmen de Bolívar. Se deberá contar con un contrato de mantenimiento, el servicio y otros documentos operacionales. Establecer o estimar los tiempos de respuesta de los diferentes entes de mantenimiento.

Para el desarrollo de los siguientes objetivos se diseñó un esquema de monitoreo descentralizado adaptado al sistema de riego y los paneles solares que permita evidenciar las fallas que presenta el sistema sin tener que realizar instalación de sensores y otros dispositivos electrónicos. El esquema se evidencia en la siguiente Figura 4-10.

Figura 4-10. Esquema de monitoreo descentralizado



El plan de mantenimiento con respecto a paneles solares evidencia una necesidad menor respecto a los otros sistemas de generación eléctrica. Por otro lado, el sistema de riego planteado presentó menor complejidad respecto al plan de paneles solares evidenciando bajos costos operativos y de instalación, por lo cual se determinó que no era necesario un plan de mantenimiento a excepción de la bomba.

4.4.1 Requerimientos para la empresa contratista

La empresa seleccionada deberá ser capaz de tengan capacidades certificadas en sistemas de paneles fotovoltaicos y además contar con experiencia comprobada en mantenimiento. Se sugieren recomendaciones para la contratación basados en el sistema de paneles solares y riego.

- Experiencia comprobable de mantenimiento en sistemas fotovoltaicos mayores a 5kW.
- Instalador eléctrico que certificados bajo las normas colombianas o internacionales
- Equipos apropiados y calibrados para diagnosticar fallas
- Cumplimiento de las recomendaciones de seguridad y salud en el trabajo
- Conocimiento del plan de mantenimiento del sistema de riego y paneles solares

4.4.2 Plan de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo con actividades

En la Tabla 4-13 y Tabla 4-14 se evidencian las actividades de los mantenimientos preventivos y correctivos. Se muestran las frecuencias y los proveedores de servicios para los diversos planes. Cabe resaltar que en los planes se incluye el sistema de riego y la bomba.

Tabla 4-13. Descripción de actividades de mantenimiento preventivo

Componente	Área de actividad	Descripción	Frecuencia	Proveedor de servicios
Sistema fotovoltaico	Inspección	Inspección visual para identificar conexiones.	Mensual	Electricista o persona capacitada
		Infestación o plagas.	Trimestral	Experto en control de plagas
		Revisión de corrosión y pintura.	Cada 4 años	Experto en corrosión y pintura
	Limpieza	Limpieza del sistema según las instrucciones del fabricante		
	Servicios	Calibración de equipos	Según fabricante	Electricista o especialista
	Pruebas	Reemplazo de módulos dañados o quebrados	Según necesidad	Especialista en sistema FV
	Respuesta en caso de emergencia	Contratista disponible por llamada o por correo	Permanente	Especialista en sistema FV
Modulo FV	Inspección	Inspección mediante Cámara termográfica puntos calientes	Cada 2 años	Especialista en sistema FV
	Limpieza	Limpieza de módulos según las instrucciones del fabricante	Semanal/Mensual	Encargado del sistema

Continuación de la Tabla 4-13.

	Servicios/Pruebas	Reemplazar los módulos con quebraduras, falla en diodos, fallas por delaminación u otros daños	Según necesidad	Especialista en sistema FV
	Respuesta en caso de emergencia	Contratista disponible por llamada o por correo	Según necesidad	Especialista en sistema FV
Sistema de riego	Inspección	Inspección visual y pruebas de presión para evaluar el estado de las piezas	Semestral	Encargado del sistema
	Limpieza	Limpieza de sistema de riego y adecuación del terreno. Aumentos de presión para liberar taponamientos.	Trimestral	Encargado del sistema
	Servicios	Reemplazar los elementos en mal estado, con fugas o por fallas de cristalización.	Según necesidad	Especialista en sistemas de riego
	Pruebas	Pruebas de presión para elementos reparados	Permanente	Encargado del sistema
	Respuesta en caso de emergencia	Repuestos para cada pieza	Permanente	Encargado del sistema
Bomba	Inspección	Revisión succión, flujo de bomba, fugas, sellos y temperatura de cojinetes.	Semanal	Encargado del sistema
	Limpieza	Limpieza de zona circundante, verificación de estructura de bomba y localización de fallas.	Mensual	Encargado del sistema
	Servicios	Reemplazo de empaques, reparación de sellos mecánicos, reparación de fugas y disminución de consumo excesivo.	Según necesidad	Especialista en mantenimiento de bombas
	Pruebas	Pruebas de presión y de capacidad de consumo idóneo	Según necesidad	Especialista en mantenimiento de bombas
	Respuesta en caso de emergencia	Contratista disponible por llamada o por correo	Permanente	Especialista en mantenimiento de bombas
Estructura	Inspección	Inspección por movimientos o por fallos en el montaje.	Cada 4 años	Encargado del sistema
	Limpieza	Limpieza por corrosión o desgaste.	Cada 4 años	Especialista en metalmecánica
	Servicios	Reemplazo de estructura o reparación	Según necesidad	Especialista en metalmecánica
	Pruebas	Verificación de cargas, cordones de soldadura o lugares de unión.	Según necesidad	Ingeniero mecánico o metalúrgico
	Respuesta en caso de emergencia	Contratista disponible por llamada o por correo.	Permanente	Especialista en metalmecánica
Batería	Inspección	Inspección mediante análisis de cargas eléctricas e inspección visual el estado de las baterías.	Anualmente	Especialista en sistema FV
	Limpieza	Remoción de óxidos o sulfatos creados en bornes de baterías.	Semestral	Especialista en metalmecánica

- 7 Diseño de un sistema de bombeo automatizado y alimentado mediante paneles solares
 8 fotovoltaicos para riego en un cultivo de ñame en el municipio del Carmen de Bolívar, Colombia.
-

Continuación de la Tabla 4-13.

	Servicios	Cambiar niveles de líquido o mantenimiento anual.	Anualmente	Especialista en sistema FV
	Pruebas	Probar carga y soportes.	Según necesidad	Especialista en sistema FV
	Respuesta en caso de emergencia	Distribuidor disponible por llamada o por correo.	Permanente	Distribuidor del producto

Tabla 4-14. Descripción de actividades de mantenimiento correctivo

Componente	Área de actividad	Descripción	Proveedor de servicios
Modulo FV	Reparación	Reparar o sustituir módulos	Especialista en sistemas FV
	Respuesta de emergencia	Envío de contratistas en mantenimiento de sistemas fotovoltaicos	
Sistema de riego	Reparación	Reparar o sustituir elementos del sistema	Encargado del sistema
	Respuesta de emergencia		
Bomba	Reparación		
	Respuesta de emergencia		
Estructura	Reparación	Reparar o sustituir piezas	Especialista en metalmecánica
	Respuesta de emergencia	Envío de contratista en mantenimiento metalmecánico	
Baterías	Reparación	Sustituir por batería de imprevistos o de respaldo	Distribuidor del producto
	Respuesta de emergencia	Envío de distribuidor de baterías	

Las tablas presentadas evidencian el plan de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de paneles solares acoplado con el sistema de riego. Dichas actividades pueden extenderse en subactividades, pero se abarcaron las más significativas respecto a las prevenciones y correcciones que necesitan estos sistemas paneles solares y sistemas de riego.

Los parámetros que típicamente manejará el plan de Mantenimiento predictivo y supervisión serán los siguientes:

Datos de corriente directa

- Voltaje
- Corriente
- Potencia

Datos en corriente alterna a la salida de los inversores

- Potencia
- Voltaje
- Corriente
- Rendimiento

Registro horario de arranque y parada de inversores

- Radiación solar
- Temperatura ambiente
- Temperatura de célula
- Posicionamiento de los seguidores
- Datos de energía inyectada al sistema
- Registro de eventos y alarmas de los sistemas de seguridad integral del sistema de paneles solares
- Monitoreo programado

5. Conclusiones y recomendaciones

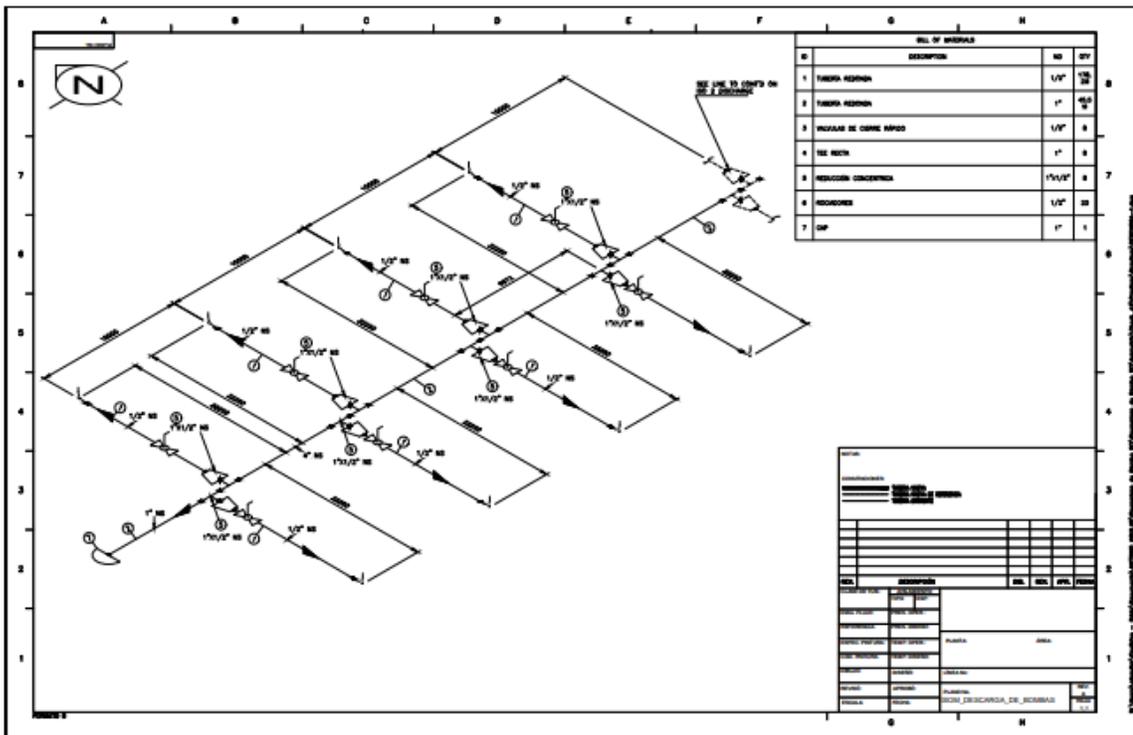
5.1 Conclusiones

1. En el presente proyecto se dimensionó un sistema de riego asistido con bomba alimentada con energía solar fotovoltaica para media hectárea de terreno en el Carmen de Bolívar. El sistema de riego podría suplir las necesidades del cultivo en épocas sin lluvia.
2. En el escenario estudiado son suficientes una bomba de 0,75kW, 2 paneles solares de 330W, 2 baterías de 100ah y un inversor de 3kW, con un costo global estimado de casi 16 millones de pesos.
3. Dicho proyecto resulta en un retorno simple de 16 años respecto conexión a red eléctrica nacional, y de 1.8 años respecto a uso de planta eléctrica. En el escenario rural real, la conexión eléctrica es deficiente y lo que prima es el uso de planta eléctrica por lo que el proyecto es interesante en zonas donde el sistema interconectado nacional no está presente.
4. Este tipo de proyectos puede contribuir a la tecnificación de cultivos de impacto social en zonas rurales similares al Carmen de Bolívar. Así mismo, puede impactar en la reducción del consumo de combustibles en las zonas no interconectadas.

5.2 Recomendaciones

1. Implementar un sistema de control que automatice el riego de las plantas, que sea modificable por las diversas épocas y que adicionalmente se adapte a las necesidades de accesibilidad del usuario. Respecto a lo último se recomienda que el sistema de control sea didáctico, teniendo en cuenta los usuarios finales, que pueden ser agricultores tradicionales, agricultores modernos o empresas agricultoras.
2. Implementar el sistema de bombeo mediante bombas de accionamiento solar para mitigar la gran inversión inicial que se da mediante paneles solares, adicionalmente, evaluar la eficiencia de dicho sistema comparado con los sistemas tradicionales y sistemas de paneles solares, teniendo en cuenta las inversiones necesarias, las tasas internas de retorno, los beneficios y las desventajas de dichos sistemas.
3. Desarrollar un cálculo económico que sea capaz de diferenciar y correlacionar las fluctuaciones de valores y producción en función del tiempo. Dicho sistema debe ir asociado a las fluctuaciones futuras de la TRM, manejo de importaciones y exportaciones y proyecciones a largo plazo del desarrollo agricultor del país.

Anexo A: Planos de la tubería



6. Bibliografía

- Acciona. (2 de Febrero de 2022). *La importancia de las energías renovables*. Obtenido de Business as unusual: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894
- Alusinsolar. (15 de 12 de 2021). *Alusin Solar S.L.U.* Obtenido de <https://alusinsolar.com/instalaciones-fotovoltaicas/#placas>
- Aquae Fundación. (14 de Agosto de 2018). *Tipos de sistema de riego y sus características*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/tipos-de-riego/>
- Aristizábal, R. (17 de abril de 2021). *Ñame, la raíz de la esperanza*. (U. d. Andes, Editor) Obtenido de <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2021/04/17/name-la-raiz-de-la-esperanza/>
- Autosolar. (24 de Marzo de 2022). *Inversor Red FRONIUS Primo 3.0-1 3kW*. Obtenido de <https://autosolar.es/inversores-de-red-monofasicos/inversor-red-fronius-primo-30-1-3kw>
- Belén, C. (27 de Julio de 2015). Diseño de un volante inercial que permitiera acumular energía eólica, para bombear agua y regar los cultivos. *Octubre 73*, pág. 1.
- Bolívar, G. d. (2020). *Bases del plan de desarrollo- Bolívar Primero 2020 al 2023*. Cartagena: Gobernación de Bolívar.
- Caicedo, D., Cotes, J., & Cure, J. (2012). Comparison of eight degree-days estimation methods in four agroecological regions in Colombia. *Agrometeorology*, 299-307.
- Canadian Solar. (s.f.). *High Density Mono Perc Module 320 - 335W*. Recuperado el 10 de 2019, de <https://www.canadiansolar.com/upload/ccbc38e6e9323f6d/9f467b5897c00121.pdf>

- Castelo, G., Garrido, J., & Vázquez, F. (2013). *Ajuste, configuración y control de cuatro tanques acoplados*. España: Universidad de Córdoba.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. (2019). *Termodinámica*. México DF: McGraw Hill.
- Delgado, Paula. (5 de Septiembre de 2015). *Los 10 problemas que le restan capacidad al agro*. Recuperado el 15 de Febrero de 2022, de <https://www.larepublica.co/economia/los-10-problemas-que-le-restan-capacidad-al-agro-2297396>
- Economipedia . (09 de Noviembre de 2019). *Energía renovable*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/energia-renovable.html>
- El Espectador . (13 de Mayo de 2021). *¿Por qué ha fracasado la agricultura en Colombia?* Recuperado el 15 de Febrero de 2022, de <https://www.elespectador.com/ambiente/por-que-ha-fracasado-la-agricultura-en-colombia/>
- Enriquez, G. (2014). Instalación y sistemas fotovoltaicos. En G. E. Harper, *Instalación y sistemas fotovoltaicos* (págs. 4-334). Mexico DF: Limusa.
- Espinosa, R., Carvajal, L., Rojas, J., & Bolaños-Benavides, M. (2018). Labranza y fertilización, estrategias para enfrentar condiciones restrictivas de humedad del suelo cultivado con ñame. *Sociedad colombiana de la ciencia del suelo, II(48)*, 23-31.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: Organización de las naciones unidad para la agricultura y la alimentación.
- Fernandez, J. (2021). *Evaluación técnico-económica de la implementación de equipos de refrigeración domésticos alimentados con energía solar en la ciudad de Barranquilla*. Barranquilla: Universidad Antonio Nariño.

-
- Gómez, R. (1 de Septiembre de 2018). *Sembrar100*. Obtenido de Cómo Sembrar Ñame: Guía Completa + [Imágenes y Paso a Paso]: <https://www.sembrar100.com/tuberculos/name/>
- Gonzales, J. (2009). *Energías renovables*. Barcelona : Editorial Reverté.
- Hidraulica Alsina SA. (2015). *Catálogo general 2015-2016*. Barcelona.
- Homecenter. (2022). *Elementos para riego y kit de paneles solares*. Bogotá: Homecenter.
- INELDEC. (21 de Febrero de 2022). *Baterías solares de gel 200ah para paneles solares AGM*. Obtenido de <https://ineldec.com/producto/baterias-solares-para-paneles-de-gel-200ah-agm/>
- Jamis, E., Vazquez, M., & Dávalos, J. (2019). *Diseño de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico para Riego Agrícola en el Caserío La Guayaba, Distrito de Bellavista, Jaén – Cajamarca*. Jaen-Perú: Universidad Nacional de Jaen.
- Lara, F. (2007). *Diseño de un sistema de riego por medio de energía solar, através de paneles FV*. Valdivia: Escuela Austral de Chile.
- Mc Cabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Cuarta ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Mendivelso, C. (2016). *Sistema de riego por goteo con paneles solares en cultivo de arboles de olivo en la finca olivanto en Boyaca, Colombia y una parcela en Tacna, Perú*. Boyacá: Universidad de Santo Tomás .
- Mercadolibre. (20 de Marzo de 2022). *Panel solar policristalino* . Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-528872721-planta-solar-basica-de-facil-armado-_JM?matt_tool=14704563&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14633851827&matt_ad_group_id=122277566090&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creat

- MinAgricultura. (2020). *Organización de Cadena Nacional del Ñame*. Bolívar: Ministerio de Agricultura.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (24 de 10 de 2019). *MinAgricultura lanzó la cadena de ñame en Bolívar para lograr rentabilidad en las 30.000 familias que dependen del sector*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/MinAgricultura-lanz%C3%B3-la-cadena-de-%C3%B1ame-en-Bol%C3%ADvar-para-lograr-rentabilidad-en-las-30-000-familias-que-dependen-del-sector.aspx>
- MTEK. (s.f.). *MT122000G*. Recuperado el 10 de 2019, de <http://mteksa.com/mtek/Catalogo/tabid/64/ProdID/8/CatID/11/Default.aspx>
- OSAKA Electronics. (15 de Julio de 2019). *Controlador Regulador Solar PWM 12V 24V 10A*. Obtenido de <https://osakaelectronicsltda.com/energia-solar/controladores-de-carga/controlador-regulador-solar-pwm-12v-24v-10a.html>
- Portafolio. (30 de Septiembre de 2021). El servicio de energía en la costa Caribe ha mejorado más del 20%. *Empresas*, pág. 1.
- Portafolio. (23 de Septiembre de 2021). *Gas y electricidad dominarán matriz de generación energética en 2050*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/plan-energetico-nacional-planteamientos-para-modificar-matriz-de-generacion-energetica-556607>
- Procaribe. (2009). *Guía práctica para el manejo orgánico de cultivo de ñame tipo exportación*. Cartagena: Swissaid.
- R.E, R., Cely, L., González, A., Granados, A., & Ramirez, R. (2018). Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá. *Revista ambiental: Agua, aire y suelo*, II(1), 2-11.
- Reina, Y. (2012). *El cultivo de ñame en el caribe colombiano*. Cartagena: Banco de la república - CEER Cartagena.

Seguí, P. (14 de Agosto de 2018). *Ovacen*. Obtenido de *Ovacen* : <https://ovacen.com/paneles-solares-cultivos/#:~:text=Aunque%20parezca%20una%20locura%20el,de%20una%20manera%20m%C3%A1s%20eficiente>.

Tejeda, L., Tovar, C., Villabona, Á., Tarón, A., Barrios, R., & Tejeda, L. (2008). Aprovechamiento del ñame espino (*dioscorea rotundata*) en la producción de bioplásticos. (U. A. Caribe, Ed.) *Prospectiva*, 68-74. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250973012>

Unidad de Planeación Minero Energética - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005.). *Altas de Radiación Solar de Colombia*. UPME-IDEAM.

Vargas, A., & Rojas, E. (2019). *Diseño de un sistema de bombeo de agua con paneles solares para mejorar el riego por goteo del cultivo de cacao en el Fundo La Esperanza, Lamas, San Martín*. Perú: Universidad Cersar Vallejo.

Vence, J., & Melkis, K. (2016). *CRISIS EN LA COSTA CERIBE DEL SERVICIO DE ENERGIA ELECTRICA PRESTANDO POR LA EMPRESA ELECTRICARIBE*. Valledupar: Universidad Santo Tomas.

Weather Spark. (15 de Marzo de 2022). *El clima y el tiempo en todo el año en el Carmen de Bolívar* . Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/22602/Clima-promedio-en-El-Carmen-de-Bol%C3%ADvar-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>

Xercavins, J., Cayuela, D., Cervantes, G., & Sabater, A. (2005). *Desarrollo sostenible*. Barcelona : Edicions UPC.

Zeman, E. (2018). Sistema de riego localizado automático y autónomo, accionado por energía renovable desde un cauce de agua. *LEISA*, 34(3), 1-3.

