

Análisis Técnico-Económico de la Implementación de un Sistema de Bombeo Automático

Basado en Energía Solar Fotovoltaica para la Finca La Riña

Santiago Elías Romero Castilla y Angie Paola Martínez Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Programa Académico

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres, Nubia Marlen Martínez y Benedicto Martínez, quienes han sido mi mayor inspiración y fuerza durante todo este camino. A ustedes, les debo mi perseverancia y la fe en mis sueños. Su apoyo incondicional y sacrificios me impulsaron cada día a dar lo mejor de mí.

A mis hermanos, Mónica y Duván, por su amor, paciencia y por acompañarme en este viaje. A toda mi familia, quienes siempre me alentaron con palabras de ánimo y confianza, y me recordaron que, con esfuerzo, todo es posible.

A mis amigos, que estuvieron ahí en los momentos de alegría y en los de desafío, brindándome su amistad y respaldo sincero. A mis profesores, quienes, con su guía y conocimiento, dejaron una huella imborrable en mi formación y me ayudaron a descubrir y fortalecer mi vocación como ingeniera.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

Angie Paola Martínez

Agradecimientos

Gracias a Dios principalmente por permitir que todo esto fuese posible, a mí Padre, mi Madre, mi Abuela y mi hermana Danae por confiar siempre en mí y apoyarme en todo momento, a mis amigos Juan José y Carlos por acompañarme de principio a fin en esta etapa y permitirme conocer el verdadero valor de la amistad.

"Son tus huellas el retrato del camino que vas formando."

Santiago Elías Romero

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Planteamiento del problema.....	20
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo General.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Marco Teórico.....	21
3.1 Conceptos.....	22
3.1.1 Pasto Elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>).....	22
3.1.1.1 Ciclo de Crecimiento del Pasto Elefante.	22
3.1.2 Tipo de Textura de Suelo y Características	22
3.1.2.1 Densidad Aparente (Da).	23
3.1.2.2 Capacidad de Campo (CC).	23
3.1.2.3 Punto de Marchitez Permanente (PMP).....	23
3.1.2.4 Fracción de Humedad Aprovechable (F).....	23
3.1.3 Humedad Aprovechable.....	23
3.1.4 Cálculo de las Necesidades Hídricas del Cultivo	24
3.1.4.1 Valores fisiológicos.	24
3.1.4.2 Evapotranspiración de referencia (ET ₀).....	25
3.1.4.3 Evapotranspiración del Cultivo (ET _c).	26
3.1.4.4 Volumen de agua requerido del cultivo al día.	26
3.1.4.5 Caudal Requerido por Planta.	26

3.1.4.7 Lámina Neta.....	27
3.1.4.6 Frecuencia de riego.....	27
3.1.5 Diseño de la red de distribución.....	28
3.1.5.1 Tubería principal.....	28
3.1.5.2 Tuberías secundarias.....	28
3.1.5.3 Tuberías porta laterales.....	28
3.1.5.4 Tuberías laterales o porta goteros.....	29
3.1.5.5 Manómetros.....	29
3.1.5.6 Medidor o caudalímetro.....	29
3.1.5.7 Reguladores de caudal.....	29
3.1.5.8 Reguladores de presión.....	29
3.1.5.9 Emisor.....	29
3.1.6 Diseño hidráulico.....	30
3.1.6.1 Dimensionado de tuberías.....	30
3.1.6.1.1 Caudal tubería con salidas múltiples.....	30
3.1.6.1.2 Área de la sección transversal de una tubería.....	30
3.1.6.1.3 Diámetro de la sección transversal de una tubería.....	31
3.1.6.1.4 Tiempo para suministrar el volumen requerido.....	31
3.1.6.1.4 Perdida de cargas por fricción para tuberías con única salida.....	31
3.1.6.1.5 Perdida de cargas por fricción para tuberías con salida múltiple.....	32
3.1.6.1.6 Número de Reynolds.....	34
3.1.6.1.7 coeficiente de Darcy-Weisbach (f_{DW}).....	35
3.1.6.1.8 Coeficiente de Christiansen (F).....	36

3.1.6.7 Pérdidas de carga localizadas.....	36
3.1.6.8 Cálculo del cabezal de presión.....	37
3.1.6.9 Cálculo del NPSH.....	39
3.1.6.9.1 Presión atmosférica.....	40
3.1.6.9.2 Presión de vapor.....	40
3.1.6.9.3 Altura Estática de Succión de una Bomba.....	40
3.1.6.10 Altura Dinámica de la Bomba.....	40
3.1.6.11 Potencia de la Bomba.....	41
3.1.7 Sistema fotovoltaico.....	41
3.1.7.1 Cálculo de la Demanda Diaria Máxima.....	42
3.1.7.2 Horas de sol pico (HSP).....	42
3.1.7.3 Potencia requerida.....	43
3.1.7.4 Número de Paneles.....	43
3.1.7.4 Sistema de Baterías.....	44
3.1.7.5 Controlador.....	44
4. Desarrollo.....	45
4.1 Ubicación y topografía de la finca.....	45
4.1.1 Ubicación geográfica.....	45
4.1.2 Topografía de la parte de la finca seleccionada para el sistema de bombeo.....	46
4.2 Análisis del Cultivo y Necesidades Hídricas.....	47
4.2.1 Tipo de Cultivo.....	47
4.2.2 Dimensiones del Cultivo.....	47
4.2.3 Distancia de Siembra.....	48

4.2.4 Cálculo de la humedad Aprovechable	49
4.2.5 Cálculo de las Necesidades Hídricas del Cultivo	49
4.2.5.1 Cálculo de la evapotranspiración del Cultivo (ETc).....	50
4.2.5.2 Volumen de agua requerido del cultivo al día.	51
4.2.5.3 Cálculo del caudal Requerido por Planta.....	52
4.2.5.6 Cálculo de la Lámina Neta.....	52
4.2.5.4 Cálculo de la frecuencia de riego.....	52
4.2.6 Hora del riego y temperatura del agua.....	53
4.3 Diseño hidráulico del sistema de riego	53
4.3.1 Topografía de la zona del cultivo.....	53
4.3.2 Diseño de la red de distribución.....	54
4.3.2.1 Emisor.....	54
4.3.2.1.1 Caudal del emisor.	54
4.3.2.1.2 Selección del Emisor.....	55
4.3.1.2 Distribución y sectorización.	55
4.3.1.2.1 Dimensionado de las tuberías laterales.	57
4.3.1.2.2 Dimensionado de la tubería porta laterales.....	59
4.3.1.2.3 Dimensionado de la tubería secundaria.	61
4.3.1.2.4 Dimensionado de la tubería primaria.	63
4.3.3 Cálculo de las pérdidas de carga localizadas en el sistema de riego	65
4.3.4 Cálculo del cabezal de presión en el sistema de riego del cultivo	65
4.4 Diseño Hidráulico del Sistema de Almacenamiento de Agua	70
4.4.1 Perdida de cargas por fricción de la tubería que dirige al tanque	72

4.4.2 Pérdida de carga producida en puntos localizados en la tubería dirigida al tanque de almacenamiento	73
4.4.3 Cálculo del cabezal de presión en la tubería dirigida al tanque de almacenamiento	74
4.5 Diseño hidráulico del Reservorio de Agua	74
4.5.1 Dimensionamiento del reservorio de agua.....	75
4.6 Selección de la Bomba.....	76
4.6.1 Caudal total	76
4.6.2 Cálculo de pérdidas de carga localizadas totales en el sistema	77
4.6.3 Cálculo de la presión a la salida de la bomba.	79
4.6.4 Cálculo del NPSH requerido y disponible	80
4.6.5 Cálculo de la altura dinámica de la bomba	82
4.6.6 Cálculo de la potencia de la Bomba.....	82
4.6.7 Selección de la bomba	82
4.7 Sistemas de Control y Automatización.....	84
4.7.1 Sistema de Control del Cultivo	84
4.7.1.1 Modelo Predictivo del Cultivo.....	84
4.7.1.1.1 Ecuación del Modelo de Regresión.	85
4.7.1.2 Descomposición funcional del sistema de riego.....	88
4.7.1.3 Diagrama de Flujo para Control Automático del Riego para el Cultivo	89
4.7.2 Sistema de Control del Tanque	91
4.7.2.1 Descomposición funcional del sistema de llenado del tanque.....	92
4.7.2.2 Diagrama de Flujo para el control automático del sistema de llenado del tanque.....	93
4.7.3 Sistema de Control del Reservorio	94

4.7.3.1 Diagrama de Flujo para el control automático del sistema del reservorio.....	94
4.8 Diseño del Sistema Fotovoltaico	95
4.8.1 Estudio de Orientación de los Paneles y HSP.....	95
4.8.2 Cálculo de la Demanda Diaria Máxima.....	97
4.8.3 Cálculo del Número de Paneles	98
4.8.4 Cálculo de la capacidad de las Baterías	100
4.8.5 Cálculo de la corriente del controlador	100
4.8.6 Selección del inversor	102
4.9 Selección de Componentes	102
4.9.1 Sensor de nivel para el reservorio	102
4.9.2 Sensor de nivel para el tanque	103
4.9.3 Sensor de temperatura.....	103
4.9.4 Sensor de humedad relativa	103
4.9.5 Sensor de radiación solar	104
4.9.6 Sensor de velocidad del viento	104
4.9.7 Sensor de humedad	104
4.9.8 Módulo de relé electromagnético.....	105
4.9.9 Temporizador	105
4.9.10 Microcontrolador	105
4.9.11 Pantalla de visualización.....	106
4.9.12 Electroválvulas.....	106
4.9.13 Cableado de sensores y electroválvulas	107
4.9.14 Medidor de flujo	107

4.9.15 Geomembrana	107
4.9.16 Selección de tubería	108
4.9.17 Válvula reguladora de presión	108
4.9.18 Caudalímetro.....	109
4.9.19 Válvula de pie	109
4.9.20 Manómetro.....	109
4.10 Rentabilidad económica.....	109
4.10.1 Inversión	111
4.10.2 Información de entrada	111
4.10.3 Estados financieros	112
4.10.3.1 Egresos.....	112
4.10.3.2 Ingresos	112
4.10.4 Flujos de caja	113
4.10.5 Análisis de la inversión.....	114
4.10.5.1 Conclusión general.....	116
6. Conclusiones.....	117
7. Trabajos futuros	118
Referencias Bibliográficas	119
Apéndices.....	122

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores fisiológicos generales para gramíneas (pastos)	25
Tabla 2. Datos del día con mayor evapotranspiración del cultivo (2 de marzo).....	51
Tabla 3. Pérdida de carga localizada en accesorios de la tubería con mayor requerimiento de presión del sistema de riego por goteo.....	66
Tabla 4. Ruta crítica con mayor presión requerida	68
Tabla 5. Ruta crítica con menor presión requerida	69
Tabla 6. Presión máxima alcanzada en el sistema	70
Tabla 7. Consumo promedio de agua en diferentes ciudades del país.....	71
Tabla 8. Pérdida de carga localizada en accesorios de la tubería hacia el tanque de almacenamiento	74
Tabla 9. Pérdidas de carga localizadas en accesorios de todo el sistema	79
Tabla 10. Consumo energético diario de dispositivos en la finca.....	98
Tabla 11. Especificaciones técnicas del panel solar	99
Tabla 12. Especificaciones de la batería seleccionada.....	101
Tabla 13. Especificaciones técnicas del controlador seleccionado.....	102
Tabla 14. Especificaciones Técnicas del inversor seleccionado.....	103
Tabla 15. Parámetros de entrada para el análisis económico del proyecto.....	112
Tabla 16. Degradación anual y proyección tarifa de energía.....	113
Tabla 17. Indicadores y criterios financieros	115

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Tubería con salidas múltiples. Primera salida al mismo espaciamiento que los emisores	33
Figura 2. Distribución de presiones a lo largo de la tubería lateral y porta lateral	39
Figura 3. Ubicación de la finca La Riña	46
Figura 4. Topografía de la parte de la finca seleccionada para el sistema de bombeo	47
Figura 5. Ensilaje para alimentos de bovinos	48
Figura 6. Ubicación del cultivo por medio del Google Earth Pro	49
Figura 7. Curvas de nivel del cultivo en AutoCAD.....	54
Figura 8. Sistema de riego en EPANET 2.0	55
Figura 9. Esquema del Sistema fotovoltaico de bombeo automático	56
Figura 10. Esquema del Sistema de Riego con Distribución de Tuberías	57
Figura 11. Rutas críticas del sistema de riego.....	67
Figura 12. Dimensiones de Tanque de Agua Seleccionado.....	72
Figura 13. Esquema del reservorio de agua	75
Figura 14. Curvas de Pérdida de Carga del Filtro Azud Helix System	78
Figura 15. Curvas de Rendimiento Hidráulico de la Bomba Centrífuga Monorrodete KE 36/200	84
Figura 16. Volumen Requerido vs Días (Comparación de métodos de cálculo).....	87
Figura 17. Diagrama de Descomposición Funcional del Sistema de Riego.....	89
Figura 18. Diagrama de flujo para el sistema de riego para el cultivo (parte 1 y 2).....	90

Figura 19. Diagrama de flujo para el sistema de riego para el cultivo (parte 3).....	91
Figura 20. Esquema de Automatización de Llenado de Tanque	92
Figura 21. Diagrama de Descomposición Funcional del Sistema Llenado del Tanque	93
Figura 22. Diagrama de flujo para el sistema de llenado de tanque	94
Figura 23. Diagrama de flujo para el sistema del reservorio	95
Figura 24. Mapa de radiación solar promedio en Colombia.....	96

Lista de Ecuaciones

	pág.
Ecuación 1. Ecuación de la humedad aprovechable	24
Ecuación 2. Ecuación de la evapotranspiración del Cultivo.....	27
Ecuación 3. Ecuación de volumen de agua requerido del cultivo al día.....	27
Ecuación 4. Ecuación de caudal requerido por planta	27
Ecuación 5. Ecuación de la lámina neta.....	28
Ecuación 6. Ecuación de frecuencia de riego	28
Ecuación 7. Ecuación del caudal tubería con salidas múltiples.....	31
Ecuación 8. Ecuación del área de la sección transversal de una tubería.....	31
Ecuación 9. Diámetro de la sección transversal de una tubería.....	32
Ecuación 10. Tiempo para suministrar el volumen requerido	32
Ecuación 11. Pérdidas de carga por fricción en una tubería con única salida	33
Ecuación 12. Ecuación de la pérdida de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples.....	34
Ecuación 13. Ecuación del número de Reynolds.....	35
Ecuación 14. Ecuación del coeficiente de Darcy-Weisbach cuando $Re < 4000$	36
Ecuación 15. Ecuación de Colebrook-White	37
Ecuación 16. Ecuación del Coeficiente de Christiansen.....	37
Ecuación 17. Ecuación de pérdidas de carga localizadas	38
Ecuación 18. Ecuación de conservación de energía de Bernoulli	38
Ecuación 19. Ecuación del cabezal de presión en una tubería.....	38
Ecuación 20. Cálculo NPSH requerido.....	40
Ecuación 21. Cálculo del NPSH disponible	40

Ecuación 22. Altura dinámica de la bomba	41
Ecuación 23. Potencia de la bomba	42
Ecuación 24. Ecuación de la demanda diaria de energía.	43
Ecuación 25. Ecuación de la demanda diaria máxima de energía.	43
Ecuación 26. Ecuación de horas de sol pico	44
Ecuación 27. Ecuación de la potencia requerida.	44
Ecuación 28. Ecuación del número de paneles requeridos.	44
Ecuación 29. Ecuación de la capacidad de la batería.....	45
Ecuación 30. Ecuación de la corriente que debe manejar controlador	45
Ecuación 31. Ecuación de números de plantas	52
Ecuación 32. Cálculo del caudal total del sistema.....	77
Ecuación 33. Cabezal de presión a la salida de la bomba.....	80
Ecuación 34. Cálculo de pérdidas de carga en el tramo de succión	81
Ecuación 35. Modelo de Regresión	86

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Relación entre altura y presión atmosférica.....	123
Apéndice A. Presión de vapor del agua en función de la temperatura	122
Apéndice C. Fórmulas para calcular la pérdida de carga por fricción.....	124
Apéndice A. Relación entre altura y presión atmosférica.....	122
Apéndice E. Radiación solar y ángulo óptimo de inclinación por mes	125
Apéndice A. Relación entre altura y presión atmosférica.....	122

Resumen

Título: Análisis técnico-económico de la implementación de un sistema de bombeo automático basado en energía solar fotovoltaica para la finca La Riña*

Autor: Santiago Elías Romero Castilla y Angie Paola Martínez Martínez**

Palabras Clave: Energía solar, Automatización, Sostenibilidad, Zonas no interconectadas

Descripción: El proyecto "Análisis Técnico-Económico de la Implementación de un Sistema de Bombeo Automático Basado en Energía Solar Fotovoltaica para la Finca La Riña" tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y energéticos en una finca rural en el departamento del Cesar, Colombia, donde el acceso a la electricidad es limitado. La solución consiste en implementar un sistema automatizado de bombeo de agua alimentado por energía solar, que garantizará un suministro eficiente tanto para el cultivo de pasto elefante como para el consumo humano. Los principales aportes de este proyecto son la sostenibilidad, al utilizar energía renovable para disminuir la dependencia de fuentes convencionales, y la automatización del sistema, que mediante sensores permite optimizar el uso del agua. Además, el proyecto es replicable en otras fincas rurales del país, promoviendo tecnologías limpias y sostenibles en zonas no interconectadas. Por último, se concluye que el sistema es económicamente viable, ya que ofrece ahorros en costos operativos a largo plazo, mejorando la productividad agrícola y contribuyendo al desarrollo rural sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Technical and economic analysis of the implementation of an automatic pumping system based on solar photovoltaic energy for the La Riña farm *

Author(s): Santiago Elías Romero Castilla and Angie Paola Martínez Martínez**

Key Words: Solar energy, Automation, Sustainability, Non-interconnected areas

Description: The project "Technical-Economic Analysis of the Implementation of an Automatic Pumping System based on Photovoltaic Solar Energy for the La Riña Farm" aims to improve the efficiency of water and energy resources use on a rural farm in Cesar, Colombia, where access to electricity is limited. The solution is to implement an automated solar-powered water pump system, which will ensure an efficient supply for both elephant grass cultivation and human consumption. The main contributions of this project are sustainability, by using renewable energy to reduce dependence on conventional sources, and system automation, which through sensors allows to optimize water use. The project is also replicable in other rural farms in the country, promoting clean and sustainable technologies in non-interconnected areas. Finally, the system is found to be economically viable as it offers long-term operational cost savings, improves agricultural productivity and contributes to sustainable rural development.

* Degree Work

** Faculty of Physical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Doctor in Chemical Engineering.

Introducción

El presente proyecto se centra en el desarrollo e implementación de un sistema de bombeo automatizado alimentado por energía solar fotovoltaica en la finca "La Riña", ubicada en el departamento del Cesar. Esta solución tecnológica tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y energéticos, abordando la problemática de falta de acceso a electricidad y la necesidad de optimizar el riego en áreas rurales no interconectadas.

El diseño del sistema incluyó un análisis exhaustivo de las condiciones topográficas, hidrológicas y climáticas de la región, con el fin de seleccionar los componentes más adecuados. Se integraron paneles solares, un sistema de control automatizado y sensores que monitorean variables críticas como la humedad del suelo, el nivel de agua en los reservorios y la radiación solar. Estos elementos permiten un funcionamiento autónomo del sistema, asegurando un suministro de agua eficiente para el cultivo de pasto elefante y el consumo humano.

Además, se evaluó la viabilidad económica del proyecto, considerando los ahorros en costos operativos y beneficios fiscales disponibles, concluyendo que la implementación del sistema es financieramente viable y ofrece una solución sostenible a largo plazo. Este proyecto no solo mejora la productividad agrícola, sino que también establece un modelo replicable para otras fincas en Colombia, promoviendo el uso de tecnologías limpias y sostenibles en el sector rural.

1. Planteamiento del problema

En las fincas rurales colombianas, la falta de acceso a un suministro eléctrico confiable es un desafío común que limita la productividad y la calidad de vida de sus habitantes. La finca La Riña, ubicada en las cercanías de Valledupar, enfrenta estas dificultades, especialmente en lo relacionado con la gestión eficiente del agua para el riego y el consumo. Actualmente, la ausencia de un sistema eléctrico adecuado impide el uso óptimo de tecnología moderna, resultando en esfuerzos manuales y un uso ineficiente de los recursos disponibles.

Este proyecto busca analizar la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de bombeo automático utilizando energía solar fotovoltaica en la finca La Riña. La adopción de este tipo de tecnología permitirá disminuir el uso del agua mediante un bombeo automatizado que responde a las necesidades específicas de la finca, utilizando una fuente de energía renovable y sostenible. Además, la implementación de este sistema contribuirá a reducir los costos operativos a largo plazo, mejorando tanto la productividad agrícola como la sostenibilidad del entorno rural.

Al enfocarse en la implementación de un sistema de bombeo automático basado en energía solar, el proyecto no solo aborda directamente las necesidades actuales de la finca La Riña, sino que también proporciona un modelo replicable para otras fincas rurales con problemas similares de acceso a la energía. De esta forma, se contribuirá al desarrollo rural sostenible y a la adopción de tecnologías limpias y eficientes en el manejo de los recursos naturales.

Por tanto, este proyecto se propone abordar esta problemática focalizando el análisis en el bombeo de agua en la Finca La Riña. A través de un enfoque técnico y económico detallado, se buscará determinar la efectividad y rentabilidad de la implementación de paneles solares en el sistema de bombeo, proporcionando así a la finca los datos necesarios para tomar decisiones

informadas que impulsen la eficiencia hídrica, reduzcan los costos y promuevan prácticas agrícolas más sostenibles.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema de bombeo automático basado en energía solar fotovoltaica para la finca La Riña.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer los componentes y requerimientos técnicos para la implementación de un sistema de bombeo automático basado en energía solar fotovoltaica.
- Calcular los elementos necesarios para el dimensionamiento del sistema de captación de energía solar y el sistema de bombeo para el riego del cultivo y consumo humano.
- Definir un sistema de control automático para el bombeo de agua que disminuya el uso de recursos hídricos.
- Determinar la viabilidad económica del sistema de bombeo automático basado en energía solar fotovoltaica.

3. Marco Teórico

En esta sección, nos sumergiremos en los conceptos, teorías y enfoques claves vinculados al área de energías renovables y la rama de sistemas de transporte y aprovechamiento de fluidos de la ingeniería mecánica que sustentan nuestro proyecto, brindando una sólida estructura de

conocimiento sobre la cual construir nuestros análisis. Reconocemos que existen otros tipos de energías renovables, sin embargo, en esta investigación abordaremos solamente información acerca de la energía solar.

3.1 Conceptos

3.1.1 Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*)

El pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) es una gramínea perenne originaria de África tropical, conocida por su rápido crecimiento y su capacidad para producir una gran cantidad de biomasa. Este cultivo es ampliamente utilizado en sistemas agropecuarios, especialmente como forraje en la alimentación del ganado bovino, debido a su alto contenido de fibra y digestibilidad (Jones et al., 2019). Además, se destaca por su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, lo que lo convierte en una opción viable para la producción agrícola en zonas tropicales y subtropicales.

3.1.1.1 Ciclo de Crecimiento del Pasto Elefante. El ciclo de crecimiento del pasto elefante es de aproximadamente 90 días, dividido en varias fases: inicial, desarrollo, mediados, y final. Durante la fase inicial, que abarca los primeros 35 días, la planta requiere una cantidad significativa de agua para establecerse adecuadamente. En las fases de desarrollo y mediados, que suman aproximadamente 45 días, el crecimiento vegetativo es más acelerado, requiriendo niveles adecuados de humedad y nutrientes de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (FAO, 2015). Finalmente, en la fase final, que comprende los últimos 10 días, el requerimiento hídrico disminuye a medida que la planta alcanza su madurez.

3.1.2 Tipo de Textura de Suelo y Características

Se seleccionó un suelo de textura franca para este estudio, basado en el Estudio General de Suelos del Departamento del Cesar (IGAC, 1987), que describe las propiedades del suelo en zonas

montañosas cercanas a la finca "La Riña". Este tipo de suelo, con un equilibrio entre arena, limo y arcilla, es ideal para la agricultura por su buen balance entre retención de agua y drenaje, facilitando la circulación de aire y nutrientes.

A continuación, se describen las principales propiedades del suelo en cuanto a su textura y cómo estas influyen en su capacidad para la agricultura:

3.1.2.1 Densidad Aparente (Da). Refleja la masa de las partículas del suelo en un volumen determinado, expresada en g/cm^3 . Para suelos francos, la densidad aparente es de aproximadamente 1.3 g/cm^3 , lo que influye en la porosidad y capacidad de retención de agua.

3.1.2.2 Capacidad de Campo (CC). Representa el porcentaje de agua que un suelo puede retener tras drenar el exceso por gravedad.

3.1.2.3 Punto de Marchitez Permanente (PMP). Es el porcentaje de humedad en el suelo donde las plantas no pueden extraer suficiente agua, lo que provoca su marchitez.

3.1.2.4 Fracción de Humedad Aprovechable (F). Este parámetro se utiliza comúnmente para determinar qué proporción de la humedad del suelo debe reponerse en cada riego.

Se muestra los intervalos de valores de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) para diferentes texturas de suelo (ver apéndice D).

3.1.3 Humedad Aprovechable

La humedad aprovechable (HA) es la cantidad de agua en el suelo disponible para ser absorbida por las plantas, representando el agua que las plantas pueden utilizar antes de experimentar estrés hídrico.

La ecuación para el cálculo de la humedad aprovechable es:

Ecuación 1: Ecuación de la humedad aprovechable.

$$HA = \frac{(CC - PMP) * Da * P}{100}$$

Donde:

CC = Capacidad de Campo.

PMP = Punto de Marchitez Permanente.

Da = Densidad Aparente (1.3 g/cm³).

P = Profundidad de raíces (40 cm).

3.1.4 Cálculo de las Necesidades Hídricas del Cultivo

El cálculo de las necesidades hídricas es crucial para dimensionar el sistema de bombeo. Este cálculo considera las condiciones climáticas, el tipo de suelo, el tipo de planta y el área de plantación. Las variables climáticas fueron extraídas de la base de datos de NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) en un periodo de 10 años, para robustecer el modelo.

Las variables consideradas incluyen:

- Temperatura promedio diaria (°C).
- Velocidad del viento (m/s).
- Humedad relativa (%).
- Irradiación solar promedio diaria (MJ/m²/día).
- Humedad del suelo en la zona de raíces (%).

3.1.4.1 Valores fisiológicos. Para determinar los valores fisiológicos del pasto elefante, se utilizó la base de datos de CROPWAT 8.0. En la Tabla 1, se presentan los valores fisiológicos generales para gramíneas (pasto elefante).

Tabla 1

Valores fisiológicos generales para gramíneas (pastos)

Fase	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final	Total
Coefficiente del cultivo (Kc)	0.85	0.85	0.95	0.95	-
Duración de la fase (días)	35	15	30	10	90

Nota. Datos adaptados de CROPWAT 8.0, software desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

3.1.4.2 Evapotranspiración de referencia (ET₀). La evapotranspiración de referencia (ET₀) es una magnitud que mide la cantidad de agua que se evapora y transpira de una superficie de referencia bajo determinadas condiciones. Esta se utiliza como base para estimar las necesidades de riego de diferentes cultivos.

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, se utilizó el software ET₀ calculator, el cual, ingresando los datos de un conjunto de variables a lo largo de determinado período de tiempo, me determina la evapotranspiración de referencia a lo largo de ese período para cada día respectivamente.

Las variables ingresadas son:

T_{prom} = Temperatura promedio diaria (°C).

V_{viento} = Velocidad del viento (m/s).

H_R = Humedad relativa (%).

I_S = Irradiación solar promedio diaria (MJ/m²/día).

K_c = Coeficiente de cultivo (factor que representa las necesidades de agua del cultivo específico, (Tabla 2).

3.1.4.3 Evapotranspiración del Cultivo (ETc). La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia ET_o por el coeficiente de cultivo (K_c).

Ecuación 2: Ecuación de la evapotranspiración del Cultivo,

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del Cultivo (mm/día).

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm/día).

K_c = Coeficiente del cultivo.

3.1.4.4 Volumen de agua requerido del cultivo al día. Para determinar la cantidad de agua que debe suministrarse diariamente logrando satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de manera eficiente se utilizó la siguiente ecuación.

Ecuación 3: Ecuación de volumen de agua requerido del cultivo al día.

$$VOL_{REQ} = Area * ET_c * 1 \text{ dia}$$

Donde:

$Area$ = Área (m²).

ET_c = Evapotranspiración del Cultivo (mm/día).

3.1.4.5 Caudal Requerido por Planta. Una vez conocida la cantidad teórica de las plantas (Teórico debido a piedras u otros elementos) se utilizará como referencia para determinar la cantidad de emisores de goteo, se dispondrá un emisor por cada planta para que rieguen de forma localizada la zona radicular de las plantas del cultivo y así poder tener una mayor eficiencia de riego.

Ecuación 4: Ecuación de caudal requerido por planta

$$Qp = \frac{Q_{REQ}}{N_{plantas}}$$

Donde:

Qp = Caudal requerido por planta, (m³/sg).

Q_{REQ} = Caudal requerido del cultivo, (m³/sg).

$N_{plantas}$ = Numero de plantas.

3.1.4.7 Lámina Neta. La lámina neta (LN) es la cantidad de agua que debe aplicarse a un cultivo para reponer la humedad aprovechable consumida por las plantas. Esta representa la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo sin exceder su capacidad de almacenamiento en el suelo.

Ecuación 5: Ecuación de la lámina neta.

$$LN = HA * F$$

Donde:

LN = Lámina neta, (mm/día).

HA = Humedad aprovechable, (mm).

F = Fracción de la humedad aprovechable, estipulado de 50%

3.1.4.6 Frecuencia de riego. La frecuencia de riego se calcula con la relación entre la lámina neta (mm) y la evapotranspiración del cultivo en mm/día.

Ecuación 6: Ecuación de frecuencia de riego.

$$Fr = \frac{LN}{ETc}$$

Donde:

LN = Lamina neta, (mm/día).

ETc = Evapotranspiración del Cultivo, (mm/día).

3.1.5 Diseño de la red de distribución

En un sistema de riego por goteo la implementación de diversos tipos de tuberías es muy importante para garantizar tanto la eficiencia como la efectividad del riego. Cada tipo de tubería está diseñada para manejar diferentes aspectos desde el suministro principal hasta la distribución para cada planta.

El uso de distintos tipos de tubería permite un mejor control de la presión y el caudal al reducir pérdidas de carga relacionadas con éstos, además que otorga cierta flexibilidad para el mantenimiento al sistema debido a la segmentación que se consigue del cultivo, también es importante ya que permiten la optimización de costos, al utilizar diferentes tipos de tuberías, estas se pueden usar en los lugares donde se necesiten dependiendo de sus características.

La red de distribución constara de los siguientes elementos:

3.1.5.1 Tubería principal. Esta tubería transporta grandes volúmenes de agua desde la fuente principal hasta el área de cultivo. Para manejar altos caudales y mantener las pérdidas de presión al mínimo en largas distancias, esta tubería debe tener un diámetro amplio. Suele estar fabricada en PVC debido a su resistencia y durabilidad.

3.1.5.2 Tuberías secundarias. Estas tuberías se encargan de distribuir el agua desde la tubería principal hacia diferentes zonas del cultivo, facilitando un control más preciso del riego en cada sector. Al igual que la tubería principal, generalmente están hechas de PVC.

3.1.5.3 Tuberías porta laterales. Estas tuberías sirven como conexión entre las tuberías secundarias y las laterales, y suelen estar fabricadas en polietileno (PE), un material adecuado para este tipo de uso.

3.1.5.4 Tuberías laterales o porta goteros. Son las encargadas de distribuir el agua directamente a las plantas de manera uniforme a través de emisores o goteros que liberan agua directamente en las raíces. Normalmente, estas tuberías también son de polietileno (PE) debido a su flexibilidad y facilidad de instalación.

3.1.5.5 Manómetros. Los manómetros son dispositivos esenciales en los sistemas de riego, ya que permiten medir la presión del agua en diferentes puntos del sistema. Esta medición es fundamental para asegurar que el sistema funcione dentro de los parámetros de diseño y para detectar cualquier anomalía en la distribución de presión.

3.1.5.6 Medidor o caudalímetro. Este dispositivo es fundamental para medir el caudal de agua entregado a la red de riego, permitiendo un mejor control y registro del flujo. El caudalímetro se instala al inicio de la tubería primaria.

3.1.5.7 Reguladores de caudal. Estos dispositivos se utilizan para controlar el flujo de agua en la entrada de las tuberías secundarias, ajustando el caudal de acuerdo con el diseño establecido.

3.1.5.8 Reguladores de presión. Normalmente se instalan en la entrada de las tuberías laterales, la superficie controlada por un regulador de presión se conoce como módulo de riego, permiten garantizar un nivel de presión adecuado para el funcionamiento del sistema.

3.1.5.9 Emisor. El emisor de riego es un componente crucial en los sistemas de riego por goteo, ya que distribuye el agua de manera controlada y localizada a la zona radicular de las plantas, garantizando un uso eficiente del agua y fertilizantes. Existen diversos tipos de emisores, siendo los emisores auto compensantes una de las opciones más eficientes para mantener un caudal constante bajo diferentes presiones, lo que es esencial en terrenos con desniveles o sistemas con variaciones de presión.

3.1.6 Diseño hidráulico

3.1.6.1 Dimensionado de tuberías. La velocidad recomendada del agua en sistemas de riego por goteo es de 0.6 a 2.25 m/s (Pizarro, 1996). Velocidades superiores aumentan las pérdidas por carga, mientras que velocidades inferiores favorecen la acumulación de sedimentos y requieren diámetros mayores, generando costos adicionales. Se utilizará una velocidad de diseño de 1 m/s para dimensionar las tuberías del sistema.

3.1.6.1.1 Caudal tubería con salidas múltiples. El caudal en una tubería con salidas múltiples se refiere al flujo total de agua que se distribuye a través de diversos puntos de salida, como goteros o aspersores, a lo largo de la tubería. Este tipo de configuración es común en sistemas de riego por goteo, donde se requiere una entrega precisa y controlada de agua a cada planta. sionar las tuberías del sistema.

Ecuación 7: Ecuación del caudal tubería con salidas múltiples.

$$Q = N \text{ salidas} * Q \text{ salida}$$

Donde:

$N \text{ salidas}$ = Número de salidas.

$Q \text{ salida}$ = Caudal de salidas, (m³/sg).

3.1.6.1.2 Área de la sección transversal de una tubería. El área de la sección transversal de una tubería es un parámetro fundamental en el diseño de sistemas hidráulicos, ya que determina la cantidad de flujo que puede transportar la tubería. Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 8: Ecuación del área de la sección transversal de una tubería.

$$A = \frac{Q}{v_d}$$

Donde:

$A = \text{Área, (m}^2\text{)}.$

$Q = \text{Caudal, (m}^3\text{/sg)}.$

$v_d = \text{Velocidad de diseño, (m}^2\text{/sg)}.$

3.1.6.1.3 Diámetro de la sección transversal de una tubería. El diámetro de la tubería se deriva directamente del área de la sección transversal, y es un factor determinante en la capacidad de transporte de la tubería y en las pérdidas de carga debidas a la fricción. El diámetro se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 9: Diámetro de la sección transversal de una tubería.

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Donde:

$A = \text{Área, (m}^2\text{)}.$

$D = \text{Diámetro, (m)}.$

3.1.6.1.4 Tiempo para suministrar el volumen requerido

Ecuación 10: Tiempo para suministrar el volumen requerido.

$$t_{REQ} = \frac{Vol_{REQ}}{Q}$$

Donde:

t_{REQ} Tiempo requerido, (sg).

Vol_{REQ} = Volumen de agua requerido, (m³)

Q = Caudal de la tubería, (m³/sg).

3.1.6.1.4 Pérdida de cargas por fricción para tuberías con única salida. Las pérdidas de carga por fricción representan la disminución de energía en el flujo de un fluido debido a la

resistencia que este encuentra al moverse a través de la tubería para calcular la pérdida de carga por fricción en una tubería con única salida, se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach, que relaciona la pérdida de carga con la longitud de la tubería, el caudal y las propiedades del fluido. La ecuación específica es la siguiente.

Ecuación 11: Pérdidas de carga por fricción en una tubería con única salida.

$$h_f = f_{DW} * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga por fricción (m)

v = Velocidad (m/sg)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

L = Longitud de la tubería.

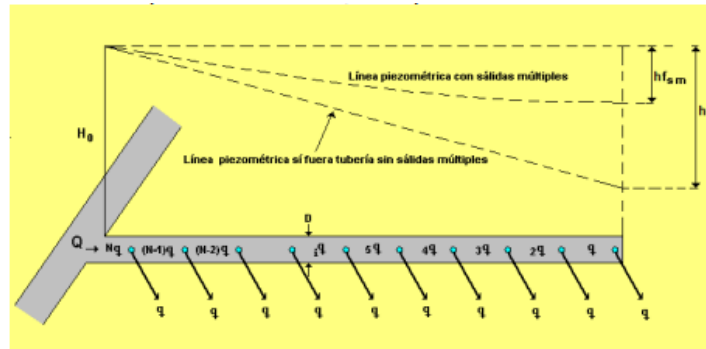
f_{DW} = Coeficiente de Darcy-Weisbach

g = Gravedad (m/sg²)

3.1.6.1.5 Pérdida de cargas por fricción para tuberías con salida múltiple. En una tubería con múltiples salidas, el flujo de agua disminuye progresivamente, reduciendo la pérdida de carga por fricción en comparación con una tubería sin salidas (ver figura 11). Para calcular la pérdida de carga, es necesario evaluar cada segmento desde la última salida hasta la primera (Ángeles et al., 2007). Sin embargo, se puede simplificar el cálculo considerando la pérdida de carga de una tubería simple con el mismo diámetro, longitud y flujo de entrada, y ajustando con el coeficiente de Christiansen (F) para salidas múltiples.

Figura 1

Tubería con salidas múltiples. Primera salida al mismo espaciamiento que los emisores



Nota. Tubería con salidas múltiples. Adaptada de Montiel et al. (2002) y García & Briones (2007). La figura ilustra la reducción de caudal y la pérdida de carga en tuberías con salidas múltiples, mostrando cómo la línea piezométrica se modifica en comparación con una tubería sin salidas bajo las mismas condiciones.

La ecuación específica para pérdidas de carga en tuberías con salidas múltiples se utiliza porque proporciona una forma más precisa y manejable de calcular las pérdidas de fricción en situaciones donde el caudal no es constante, sino que disminuye a lo largo de la tubería debido a las múltiples salidas.

Ecuación 12: Ecuación de la pérdida de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples.

$$h_f = K * \frac{(Q)^m}{D^n} * L * F$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga por fricción, (m).

Q = Caudal, (m³/s).

D = Diámetro interno de la tubería, (m).

L = Longitud de la tubería, (m).

K = Coeficiente empírico.

F = Coeficiente de Christiansen.

m = Coeficiente del caudal.

n = Coeficiente del diámetro.

Para determinar los valores del coeficiente empírico (K), del coeficiente del caudal (m) y del coeficiente del diámetro (n) la tabla (ver apéndice C) proporciona distintos datos y ecuaciones según la fórmula que se utilice para determinar las pérdidas de carga por fricción.

Se escogió la fórmula de Darcy-Weisbach debido a que está basada en conceptos fundamentales de mecánica de fluidos, además permite tener una gama amplia para las condiciones del flujo y puede ser aplicable para distintos tipos de material en la tubería y diferentes fluidos.

Según la tabla, para la fórmula de Darcy-Weisbach se tiene que:

$$m = 2$$

$$n = 5$$

3.1.6.1.6 Número de Reynolds. El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que se utiliza para caracterizar el tipo de flujo dentro de una tubería, ya sea laminar, transicional o turbulento. Este número permite evaluar el comportamiento del fluido en movimiento y determinar la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas presentes en el sistema.

Ecuación 13: Ecuación del número de Reynolds.

$$Re = \frac{v * D}{\nu}$$

Donde:

Re = número de Reynolds.

v = velocidad del fluido (m/s).

D = diámetro interno de la tubería (m).

ν = viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

Para determinar la viscosidad cinemática del fluido, se debe tener en cuenta la temperatura del agua, la cual anteriormente se estimó y es de unos $20^\circ c$.

$$\nu_{20^\circ} = 1.004 \times 10^{-6} m^2/sg$$

3.1.6.1.7 coeficiente de Darcy-Weisbach (f_{DW}). Posteriormente, se debe estimar en que régimen se encuentra el flujo, si el número de Reynolds es menor de 4000, el flujo es laminar y se debe usar la siguiente ecuación:

Ecuación 14: Ecuación del coeficiente de Darcy-Weisbach cuando $Re < 4000$.

$$f_{DW} = \frac{64}{Re}$$

Donde:

f_{DW} = Coeficiente de Darcy-Weisbach

Re = número de Reynolds.

Si el número de Reynolds es mayor de 4000, el flujo es turbulento y se debe usar la utilizar la ecuación de Colebrook-White.

Ecuación 15: Ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{DW}}} = -2 * \log \left(\frac{\left(\frac{\epsilon}{D} \right)}{3.7} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f_{DW}}} \right)$$

donde:

f_{DW} = coeficiente de Darcy-Weisbach

ϵ = rugosidad absoluta de la tubería (m)

D = diámetro interno de la tubería (m)

Re = número de Reynolds

La rugosidad de la tubería (ϵ) para un material como el polietileno (PE) o el policloruro de Vinilo (PVC) se suele tomar valores entre 0.0015 - 0.007 mm siendo 0.007 mm el más común y característico, por ende, se tomará ese.

$$\epsilon = 0.007 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3.1.6.1.8 Coeficiente de Christiansen (F). Representa la disminución progresiva en el caudal de la tubería, se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 16: Ecuación del Coeficiente de Christiansen.

$$F = \frac{1}{1+m} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2}$$

Donde:

F = Coeficiente de Christiansen.

N = Número de puntos de pérdida de caudal.

M = Coeficiente del caudal.

3.1.6.7 Pérdidas de carga localizadas. Las pérdidas de carga localizadas son las pérdidas de energía en una tubería causadas por codos, válvulas, y otros accesorios que alteran la dirección o velocidad del flujo, generando turbulencia y fricción adicional, se determinan mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 17: Ecuación de pérdidas de carga localizadas.

$$h_k = K * \frac{(v_D)^2}{2 * g}$$

Donde:

h_k = Pérdidas de carga localizadas, m.

K = Coeficiente de pérdida de carga.

v_D = velocidad de diseño del agua, m/sg.

g = gravedad, (m²/sg).

3.1.6.8 Cálculo del cabezal de presión. En el cálculo del cabezal de presión, se utiliza la ecuación de Bernoulli para determinar la altura total de energía (cabezal) requerida en el punto de entrada de la tubería.

Ecuación 18: Ecuación de conservación de energía de Bernoulli.

$$H_{cabeza} = H_{cola} + h_f + h_k$$

$$h_{cabeza} + z_{cabeza} + \frac{(v)^2}{2 * g} = h_{cola} + z_{cola} + \frac{(v)^2}{2 * g} + h_f + h_k$$

Donde:

h_{cabeza} = Presión en la cabeza, (m).

z_{cabeza} = Altura de la cabeza con respecto a nivel del mar, (m).

v = velocidad del agua, (m/sg).

g = gravedad, (m²/sg).

h_{cola} = presión en la cola, (m).

z_{cola} = altura de la cola con respecto al nivel del mar, (m).

h_f = pérdida de carga debido a la fricción, (m).

h_k = Pérdidas de carga localizadas, (m).

Teniendo en cuenta que se va a manejar una velocidad de diseño de $v= 1$ m/sg en las tuberías, las velocidades se cancelan quedando así la siguiente ecuación:

Ecuación 19: Ecuación del cabezal de presión en una tubería.

$$h_{cabeza} = h_{cola} + \Delta z + h_f + h_k$$

Donde:

h_{cabeza} = presión en la cabeza, (m).

h_f = pérdida de carga debido a la fricción, (m).

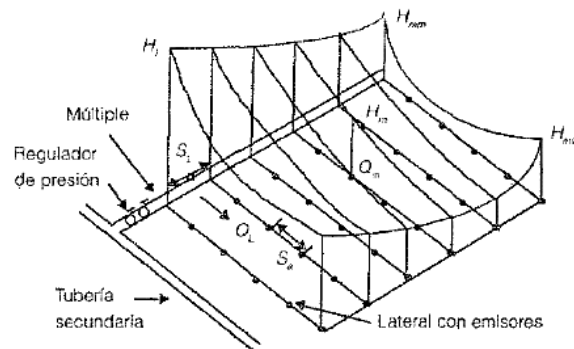
Δz = diferencia de altura entre la cabeza y la cola, (m).

h_k = Pérdidas de carga localizadas, (m).

Para el cálculo de la presión a la entrada de las tuberías laterales o porta emisor es necesario tener en cuenta el punto más desfavorable del tramo de la tubería, el cual corresponde al último emisor, esto se debe a las pérdidas de carga causadas por la fricción a lo largo de la tubería debido a los emisores, las cuales provocan una disminución de presión a lo largo de esta como se puede apreciar en la siguiente imagen:

Figura 2

Distribución de presiones a lo largo de la tubería lateral y porta lateral



Nota. Figura tomada de Saldarriaga, J. G. (1998). Hidráulica de tuberías. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana. La figura muestra la distribución de presiones a lo largo de una tubería lateral y porta lateral, destacando la importancia del regulador de presión y la variación del caudal en las diferentes salidas.

3.1.6.9 Cálculo del NPSH. El cálculo del NPSH (Net Positive Suction Head) es crucial para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro de la bomba centrífuga en el sistema de bombeo fotovoltaico. El NPSH se utiliza para determinar si hay suficiente presión en la entrada de la bomba para evitar la cavitación, un fenómeno que puede dañar seriamente los componentes de la bomba y reducir su eficiencia.

Para el cálculo del NPSH, se consideran dos valores importantes:

$NPSH_{requerido}$: Este es el valor mínimo de NPSH que la bomba necesita para operar sin riesgo de cavitación, y es especificado por el fabricante de la bomba.

Para determinar el cálculo del NPSH requerido se utiliza la siguiente ecuación, en donde se tiene un factor del 10% que relaciona al $NPSH_{disponible}$ con el $NPSH_{requerido}$. Esta ecuación se obtuvo de Mott (2006), *Mecánica de fluidos aplicados*, página 413."

Ecuación 20: Cálculo NPSH requerido

$$NPSH_{disponible} \geq 1.1 * NPSH_{requerido}$$

$NPSH_{disponible}$: Es el valor efectivo de presión que tiene el fluido en la entrada de la bomba, tomando en cuenta la presión atmosférica, la altura de succión y las pérdidas de carga en la línea de succión. Este valor debe ser igual o superior al NPSH requerido para evitar la cavitación y asegurar un funcionamiento eficiente de la bomba.

Ecuación 21: Cálculo del NPSH disponible.

$$NPSH_{disponible} = H_a - H_s - H_{vp} - H_{suc}$$

Donde

H_a = Presión atmosférica, (m).

H_s = Altura estática de succión, (m).

H_{vp} = Altura de vapor del líquido, (m).

H_{suc} = Pérdidas de fricción en la línea de succión, (m).

3.1.6.9.1 Presión atmosférica. La presión atmosférica (H_a) es la presión ejercida por el peso de la atmósfera sobre la superficie terrestre. Esta presión disminuye a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, en la tabla del ANEXO 1, se puede ver la relación que existe entre la altura sobre el nivel del mar y la presión atmosférica.

3.1.6.9.2 Presión de vapor. La presión de vapor (H_{vp}), es la presión a la cual un líquido comienza a evaporarse a una temperatura específica, en la tabla (ver apéndice B) se muestra la relación entre la temperatura del agua y la presión de vapor.

3.1.6.9.3 Altura Estática de Succión de una Bomba. La altura estática de succión es un parámetro fundamental en el diseño y operación de sistemas de bombeo. Se define como la distancia vertical entre el nivel del agua en la fuente de succión y el eje de la bomba cuando esta se encuentra por encima del nivel del agua. Este concepto es crucial para garantizar que la bomba funcione eficientemente y sin problemas como la cavitación.

3.1.6.10 Altura Dinámica de la Bomba. La altura dinámica total de la bomba, también conocida como altura manométrica total ($H_{dinámica}$), es un parámetro crucial para determinar la capacidad de una bomba para elevar un líquido desde un nivel inferior hasta un nivel superior. Este valor representa la suma de todas las alturas que la bomba debe vencer para asegurar un flujo continuo de agua en el sistema y se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 22: Altura dinámica de la bomba.

$$H_{Dinámica} = h_s + H_{descarga} + h_{kT}$$

Donde:

$H_{Dinámica}$ = Altura dinámica de la bomba, (m).

h_s = Altura estática de succión, (m).

$H_{salida\ bomba}$ = Altura a la salida de la bomba, (m).

h_{kT} = Pérdida de carga total debido a las singularidades, (m).

Reemplazando se tiene:

3.1.6.11 Potencia de la Bomba. La potencia requerida para el funcionamiento de una bomba, esta potencia determina la cantidad de energía que la bomba necesita para mover el volumen de agua requerido a través del sistema, superando tanto la altura dinámica total como las pérdidas por fricción en las tuberías.

La potencia de la bomba viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 23: Potencia de la bomba

$$P = \rho * g * Q_{TOTAL} * H_{Dinámica}$$

Donde:

ρ = Densidad del agua (aproximadamente 1000 kg/m³)

g = Gravedad, (m/sg²)

Q_{TOTAL} = Caudal total del sistema, (m³/s).

$H_{Dinámica}$ = Altura dinámica, (m).

3.1.7 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es una tecnología diseñada para convertir la energía solar en electricidad mediante el uso de paneles solares. Este sistema se compone principalmente de módulos fotovoltaicos, que contienen células solares capaces de transformar la luz solar en corriente eléctrica. La energía generada pasa a través de un inversor, el cual convierte la corriente continua en corriente alterna, adecuada para el uso doméstico o industrial. Además, el sistema

puede incluir baterías para almacenar el exceso de energía producida y un controlador de carga que gestiona el flujo hacia las baterías y protege el sistema de sobrecargas. También se utilizan estructuras de soporte para sostener los paneles, junto con cableado y protecciones eléctricas, para asegurar una instalación segura y eficiente.

3.1.7.1 Cálculo de la Demanda Diaria Máxima. El propósito de calcular la demanda diaria máxima de energía es determinar el consumo total de electricidad requerido para operar todos los dispositivos esenciales en la finca durante el día donde más suministro de energía eléctrica se necesite. Este cálculo es crucial para dimensionar adecuadamente el sistema de generación de energía fotovoltaica, asegurando que pueda satisfacer las necesidades energéticas sin interrupciones, para calcular la demanda diaria máxima, primerio se procede a calcular la demanda diaria mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 24: Ecuación de la demanda diaria de energía.

$$D_{Diaria} = P * H * N$$

Donde:

P= Potencia del electrodoméstico, (W).

H= Número de horas en funcionamiento, (h).

N= Número de dispositivos

Ecuación 25: Ecuación de la demanda diaria máxima de energía.

$$D_{máxd} = (1.2) * P * H * N$$

3.1.7.2 Horas de sol pico (HSP). Las Horas de Sol Pico (HSP) son una medida utilizada en el diseño de sistemas de energía solar para representar la cantidad de energía solar disponible en un área específica durante un día. Se define como el número de horas en las que la irradiación

solar media es de 1 kW/m². Este valor simplifica el cálculo de la energía generada por los paneles solares, facilitando la planificación y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

Ecuación 26: Ecuación de horas de sol pico

$$HSP = \frac{\text{Radiacion solar}}{1 \frac{kW}{m^2}}$$

3.1.7.3 Potencia requerida. Se debe determinar la potencia máxima de carga que debe ser suministrada por los paneles solares para satisfacer la demanda energética diaria de la instalación durante las horas solares pico. Este cálculo se realiza utilizando la ecuación:

Ecuación 27: Ecuación de la potencia requerida.

$$P_{Req} = \frac{Dmax}{HSP}$$

Donde:

P_{Req} = Potencia requerida.

Dmax = Demanda máxima de la instalación

HSP = Hora solar pico

3.1.7.4 Número de Paneles. Para calcular el número de paneles necesarios en el sistema fotovoltaico, se utiliza la relación entre la potencia total del generador (PG) y la potencia pico del panel seleccionado (P_{real}). Esta ecuación permite asegurar que la cantidad de paneles instalados sea suficiente para cubrir la demanda energética del sistema, garantizando un suministro adecuado y eficiente.

Ecuación 28: Ecuación del número de paneles requeridos.

$$\#paneles \geq \frac{PG}{P_{Req}}$$

Donde:

P_G = Potencia del generador fotovoltaico, (Wh).

P_{real} = Potencia pico producida por el panel elegido, (Wh).

3.1.7.4 Sistema de Baterías. El cálculo del sistema de baterías es fundamental para asegurar que una instalación fotovoltaica pueda operar de manera continua, incluso en ausencia de luz solar. La capacidad de almacenamiento requerida se determina utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 29: Ecuación de la capacidad de la batería

$$C_{baterias} = \frac{D_{max} * D_a}{P_d * V}$$

Donde:

$D_{máx}$ = Demanda máxima.

D_a = Días de autonomía.

P_d = Profundidad de descarga de la batería, (Ah).

V_{sist} = Tensión del sistema, (V).

3.1.7.5 Controlador. El cálculo del controlador de carga es esencial en una instalación fotovoltaica, ya que este componente regula el flujo de energía desde los paneles solares hacia las baterías, protegiendo el sistema de sobrecargas y asegurando un funcionamiento seguro y eficiente. La corriente que debe manejar el controlador se determina utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 30: Ecuación de la corriente que debe manejar controlador.

$$I_{Controlador} = \frac{P_{paneles}}{V_{sistema}} * F_{seguridad}$$

Donde:

$I_{Controlador}$ = Corriente que debe manejar controlador, (A).

$P_{paneles}$ = Potencia total de los paneles solares, (W).

$V_{sistema}$ = Voltaje del sistema, (24V).

F seguridad = Factor de seguridad, normalmente entre 1.25 a 1.5 para compensar variaciones en la potencia de salida de los paneles solares debido a condiciones ambientales.

4. Desarrollo

4.1 Ubicación y topografía de la finca

4.1.1 Ubicación geográfica

La finca La Riña está ubicada en la región noreste del departamento del Cesar, Colombia, cerca de las localidades de La Mina y Atanquez. Esta zona se encuentra al noreste de la ciudad de Valledupar, a una altitud media que varía entre los 850 y 750 metros sobre el nivel del mar.

Figura 3

Ubicación de la finca La Riña



Nota. Imágenes obtenidas utilizando el software Google Earth Pro para determinar la posición exacta de la finca.

Coordenadas Geográficas:

- Latitud: 10.682° N

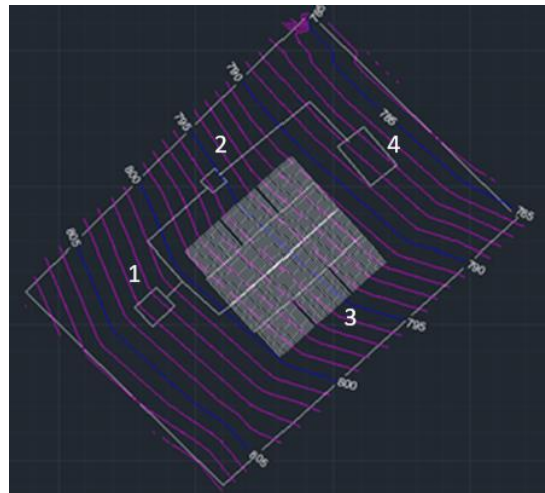
- Longitud: 73.327° W

4.1.2 Topografía de la parte de la finca seleccionada para el sistema de bombeo

El plano topográfico del terreno es fundamental para la correcta instalación del sistema de bombeo fotovoltaico, ya que permite conocer las características del relieve y la ubicación exacta de cada componente del sistema. En la figura se presentan las curvas de nivel obtenidas a partir de imágenes satelitales de Google Earth Pro, procesadas en AutoCAD para generar un modelo detallado de la topografía de la finca.

Figura 4

Topografía de la parte de la finca seleccionada para el sistema de bombeo



Nota. Imágenes obtenidas utilizando el software AutoCAD.

Se presenta la topografía de la finca (ver figura 4), donde se destacan las principales secciones del sistema de bombeo fotovoltaico, señaladas con números para facilitar su identificación:

1. Reservorio de agua.
2. Tanque de almacenamiento.

3. Cultivo.

4. Casa.

4.2 Análisis del Cultivo y Necesidades Hídricas

4.2.1 Tipo de Cultivo

En este proyecto se pretende utilizar lo que se produzca del cultivo para almacenarlo a través del silo, este consiste en un método de conservación en el cual se conserva herméticamente lo producido una vez triturado para posteriormente ser utilizado en el abastecimiento de los animales usualmente en temporadas de sequias o cuando no haya disponibilidad de comida para estos.

Figura 5

Ensilaje para alimentos de bovinos



Nota. Tomado de Proain Tecnología agrícola, 2020. *¿Qué es el ensilaje y cuál es el proceso de elaboración?*

4.2.2 Dimensiones del Cultivo

A continuación, con ayuda del software Google Earth Pro, se seleccionó la siguiente zona para el desarrollo del cultivo de Pasto elefante, al tener cierta inclinación y al estar ubicado a cierta cercanía de la casa, la zona del cultivo resulta estratégica.

Figura 6

Ubicación del cultivo por medio del Google Earth Pro



Nota. Imagen obtenida utilizando el software Google Earth Pro para determinar la posición exacta del cultivo en la finca. Esta herramienta permite visualizar la distribución del área de cultivo y su entorno, facilitando la planificación y gestión del riego y otros recursos.

Por medio del software Google Earth Pro, se determinaron los datos del largo y ancho de la zona y se obtuvo un valor estimado del área seleccionada.

Área del cultivo: 3154.12 m²

Largo de la zona del cultivo: 57.14 m

Ancho de la zona del cultivo: 55.2 m

4.2.3 Distancia de Siembra

La distancia de siembra recomendada para el cultivo de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) es entre 60 y 120 cm. Se han evaluado distancias de siembra más comunes para este cultivo y, según *A Guide to Growing and Caring for Napier Grass* (s.f.), la distancia de siembra óptima para el cultivo de pasto elefante es de aproximadamente 80 cm. Para este estudio, se tomará

como referencia una distancia de 80 cm de separación entre plantas y 100 cm entre cada fila de siembra.

En este caso, se diseñará un sistema para el cultivo de pasto elefante donde se dispondrá de un lateral por fila de plantas.

4.2.4 Cálculo de la humedad Aprovechable

Las características que se tomaron de la textura para el suelo franco las cuales son:

Densidad Aparente (Da): 1.3 g/cm.

Capacidad de Campo (CC): 15%

Punto de Marchitez Permanente (PMP): 7.5%

Fracción de Humedad Aprovechable (F): 50%

Profundidad de raíces: 40 cm

Para el cálculo de la humedad aprovechable se utiliza la Ecuación 1

Reemplazando se tiene:

$$HA = \frac{(15 - 7.5) * 1.3 \text{ g/cm}^3 * 40 \text{ cm}}{100} = 3.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = 3.9 \text{ cm. c. a}$$

Para el cálculo de la Humedad aprovechable (HA), g/cm² se convierte a cm al interpretar la cantidad de agua como una columna de altura equivalente en el suelo.

$$HA = 3.9 \text{ cm}$$

4.2.5 Cálculo de las Necesidades Hídricas del Cultivo

Como se puede apreciar en la Tabla 1, la duración de un ciclo de cultivo de pasto elefante es de aproximadamente 90 días. En la zona Caribe colombiana, la época de cultivos suele iniciarse el 1 de abril, coincidiendo con el comienzo de la temporada de lluvias, lo cual favorece un mejor desarrollo durante la fase inicial del cultivo, una etapa crucial para el crecimiento de la planta.

Se planifican cuatro ciclos de cultivo por año, comenzando el 1 de abril, cada uno con una duración de 90 días, para un total de 360 días de cultivo al año.

Otra característica importante del cultivo de pasto elefante es la profundidad de sus raíces, que oscila entre 30 y 50 cm. Para efectos de los cálculos, se ha considerado una profundidad promedio de raíz de 40 cm.

4.2.5.1 Cálculo de la evapotranspiración del Cultivo (ETc). Se tendrá entonces para cada día del año (a partir del 1 de abril) información correspondiente a la temperatura promedio, la velocidad del viento, la humedad relativa, la humedad del suelo en la zona de las raíces, el coeficiente del cultivo, la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo con un valor promedio para cada día en los últimos 10 años.

Se tomarán los datos del día en donde la evapotranspiración del cultivo fue mayor en todo el año, este día corresponde al 2 de marzo, para el cálculo del volumen requerido y posteriormente el diseño del sistema de riego, los datos se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 2

Datos del día con mayor evapotranspiración del cultivo (2 de marzo)

Medida	Valor
Temperatura diaria promedio (c°)	28.56
Velocidad del viento promedio (m/sg)	0.732
Humedad relativa promedio (%)	66.508
Humedad el suelo promedio (%)	59.2
Irradiación promedio (MJ/m ² /día)	21.274
KC	0.95
Eto promedio (mm/día)	4.4

Etc promedio (mm/día)	4.18
-----------------------	------

Nota. Datos promedio obtenidos para el día con mayor evapotranspiración del cultivo (2 de marzo). ETo = Evapotranspiración de referencia; ETC = Evapotranspiración del cultivo; KC = Coeficiente de cultivo. Los datos fueron calculados utilizando la base de datos de la NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER).

4.2.5.2 Volumen de agua requerido del cultivo al día. Para determinar la cantidad de agua que debe suministrarse diariamente logrando satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de manera eficiente se utilizó la Ecuación de volumen de agua requerido del cultivo al día (ver ecuación 3).

Reemplazando se tiene:

$$VOL_{REQ} = 3154.12 \text{ m}^2 * \left(4.18 \frac{\text{mm}}{\text{día}}\right) * \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right) * (1 \text{ día}) = 13.184 \text{ m}^3$$

Teniendo para la zona del cultivo un rectángulo de área 3154.12 m^2 de 52.5 m de ancho y 57.14 m de largo aproximadamente, se procede a calcular el número de los que serían teóricamente la cantidad de plantas que se van a cultivar

$$L = 57.14 \text{ m}$$

$$W = 55.2 \text{ m}$$

$$A = 3154.12 \text{ m}^2$$

Ecuación 31: Ecuación de números de plantas.

$$N_{plantas} = \left(\frac{L}{0.8}\right) * \left(\frac{W}{0.1}\right)$$

Donde:

$N_{plantas}$ = Numero de plantas.

L = Largo del cultivo.

W = Ancho del cultivo.

Reemplazando se tiene:

$$N_{plantas} = \left(\frac{57.14}{0.8}\right) * \left(\frac{52.5}{1}\right) = 3749.8 \cong 3750$$

4.2.5.3 Cálculo del caudal Requerido por Planta. Una vez conocida la cantidad teórica de las plantas (Teórico debido a piedras u otros elementos) se utilizará como referencia para determinar la cantidad de emisores de goteo, se dispondrá un emisor por cada planta para que rieguen de forma localizada la zona radicular de las plantas del cultivo y así poder tener una mayor eficiencia de riego.

A continuación, se procede a calcular el caudal requerido por planta mediante la ecuación de caudal requerido por planta (ver ecuación 4).

Reemplazando se tiene:

$$Qp = \frac{\left(13184 \frac{L}{dia}\right)}{3750} = 3.515 \frac{L}{dia}$$

4.2.5.6 Cálculo de la Lámina Neta. Para el cálculo de la lámina neta se utiliza la Ecuación 5.

Reemplazando se tiene:

$$LN = 3.9 \text{ cm} * 0.5 = 1.95 \text{ cm} = 19.5 \text{ mm}$$

4.2.5.4 Cálculo de la frecuencia de riego. Para el cálculo de la frecuencia de riego se utiliza la Ecuación 6.

Reemplazando se tiene:

$$Fr = \frac{19.5 \text{ mm}}{4.18 \frac{\text{mm}}{\text{día}}} = 4.666 \text{ días} \cong 5 \text{ días}$$

4.2.6 Hora del riego y temperatura del agua

El sistema de riego será activado a las 8:00 am de la mañana, el riego se realizará en las horas de la mañana puesto que en ese momento del día la evaporación del agua es menor esto permite que se absorción de agua en el suelo sea mayor.

La temperatura del agua a esa hora del día es un poco inferior a la temperatura ambiente debido a la influencia que han tenido las temperaturas nocturnas sobre esta, suele tener un valor que oscila entre los 16 y 21°C, se tomará la temperatura del agua en el sistema de riego de 20°C.

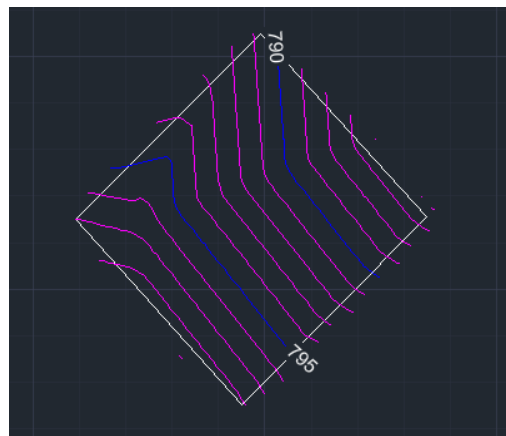
4.3 Diseño hidráulico del sistema de riego

4.3.1 Topografía de la zona del cultivo

Para conocer detalladamente los datos topográficos de la zona de cultivo se hizo necesario el uso de varias herramientas digitales, se utilizó el software Google Earth Pro para delimitar la zona del cultivo, una vez delimitada, con la ayuda del software de diseño AutoCAD se extrajeron las curvas de nivel de la zona.

Figura 7

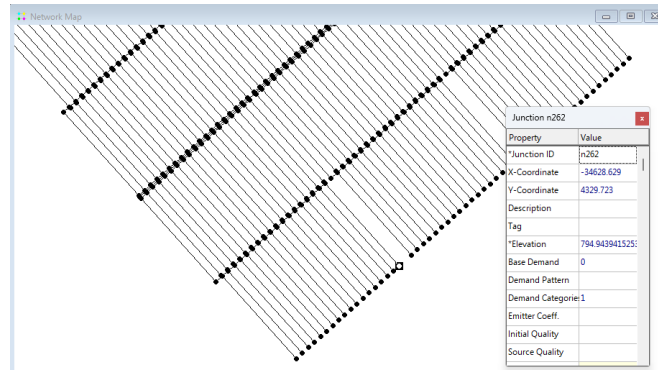
Curvas de nivel del cultivo en AutoCAD



El complemento civil 3D De AutoCAD permitió pasar el diseño de la red de tuberías propuesto realizado en AutoCAD a EPANET 2.0.

Figura 8

Sistema de riego en EPANET 2.0



Nota. Como se puede apreciar en la imagen cada punto del sistema tienen su valor correspondiente de elevación, estos datos se utilizarán más adelante para el cálculo de la presión en la cabeza del sistema y posteriormente determinar cuál bomba es la más adecuada para este.

4.3.2 Diseño de la red de distribución

4.3.2.1 Emisor.

4.3.2.1.1 Caudal del emisor. Para suplir el caudal requerido por planta (3.515 L/día) y teniendo en cuenta que se dispondrá de un emisor por planta, se debe usar emisores de goteo con un caudal que logre satisfacer las necesidades hídricas durante el día.

Además, se tendrán que regar todas las plantas uniformemente a pesar de estar en una superficie irregular donde las plantas pueden estar ubicadas a diferentes niveles de altura.

4.3.2.1.2 Selección del Emisor. Para diseñar el cultivo tendrá un emisor por planta, ya que permitirá una distribución más precisa del agua y una optimización en cuanto al uso de fertilizantes porque las raíces pueden absorberlos más eficientemente.

Una opción que cumple los requisitos establecidos es un emisor auto compensante, la razón por la cual se seleccionó el tipo auto compensante es debido a que este proporciona un caudal constante bajo un amplio margen de presión.

Un emisor auto compensante de goteo con un caudal de 2 L/h por hora o de 4 L/h podría cumplir con los requisitos establecidos, se seleccionó un emisor con caudal de 4 L/h ya que ofrece un mayor manejo de caudal, lo que se traduce en menor tiempo de funcionamiento del sistema y la diferencia de precio con respecto al emisor de 2 L/h no es tan significativa.

Por lo tanto, un emisor de goteo auto compensante con un caudal de 4 L/h será una buena opción para asegurar una distribución uniforme, eficiente y en poco tiempo del agua.

Características del emisor:

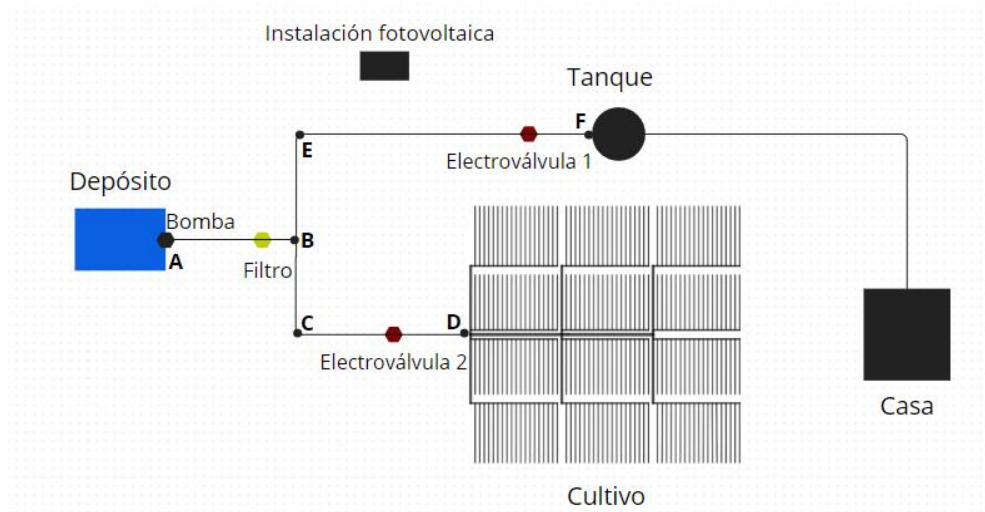
- El modelo tiene las siguientes características:
- Presión de apertura: 10 m.c.a
- Presión de cierre: 2.4 m.c.a
- Intervalo de auto compensación: 10 – 41 m.c.a
- Coeficiente de variación menor al 3%

Este emisor auto compensante se conecta directamente a una tubería de riego de 16 a 32mm.

4.3.1.2 Distribución y sectorización.

Figura 9

Esquema del Sistema fotovoltaico de bombeo automático

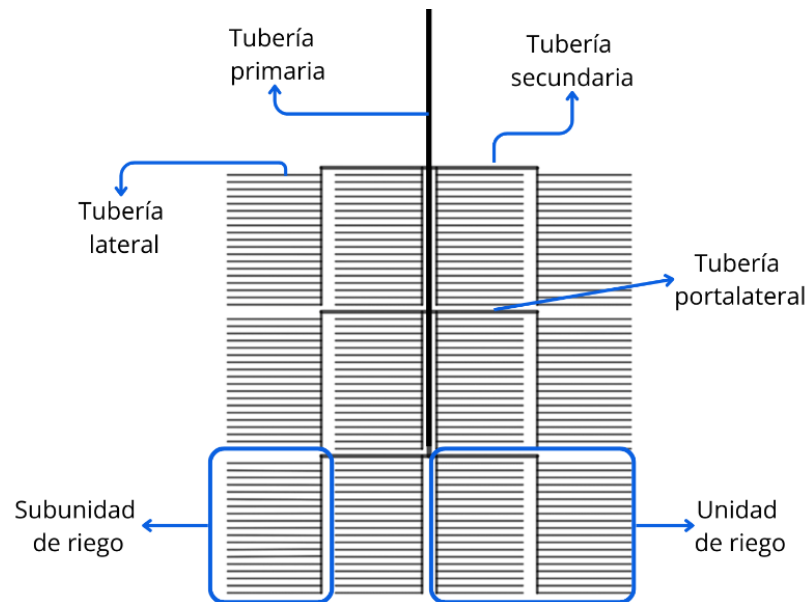


En el esquema se observa la configuración del sistema de bombeo automatizado, donde la bomba (A) toma el agua del depósito y la impulsa a través del filtro hasta llegar al punto donde se divide el sistema (B) hacia la red de distribución para el cultivo y el tanque de almacenamiento. El sistema cuenta con dos electroválvulas (1 y 2) que permiten sectorizar el riego entre el cultivo y el tanque de almacenamiento, asegurando un uso eficiente del recurso hídrico y un control preciso del riego.

Se diseñó el sistema buscando reducir lo más que se pueda la longitud de las tuberías más grandes ya que representan un mayor costo, el sistema consta de una tubería primaria de la cual están conectadas 6 tuberías denominada secundarias, estas tuberías son el inicio de las unidades de riego. A su vez estas unidades de riego están conformadas por tuberías porta laterales, que están conectadas a las tuberías laterales o porta emisores, el conjunto conformado por una tubería porta lateral y sus respectivos laterales es denominado la subunidad de riego (ver figura 10).

Figura 10

Esquema del Sistema de Riego con Distribución de Tuberías



El sistema de riego está compuesto por diferentes tipos de tuberías, cada una con una función específica dentro de la distribución del agua a las unidades de riego. A continuación, se presentan las longitudes de cada tipo de tubería en el sistema:

1. Longitud de la tubería primaria: 51.3 m
2. Longitud de la tubería secundaria: 14 m
3. Longitud de la tubería porta lateral: 18 m
4. Longitud de la tubería lateral: 13.6 m

4.3.1.2.1 Dimensionado de las tuberías laterales. Basándose en la velocidad de diseño seleccionada, se procede a calcular el caudal correspondiente de la tubería.

Velocidad de diseño:

$$v_d = 1 \text{ m/sg}$$

Teniendo en cuenta el distanciamiento de emisores, el cual es de 0.8 m, se tendrán 17 emisores por lateral, reemplazando en la ecuación para calcular el caudal (ver ecuación 7) se tiene:

$$Q_L = 17 * 1.11 \times 10^{-6} m^3 / sg = 1.889 \times 10^{-5} m^3 / sg$$

Para determinar el área transversal de la tubería lateral, se utiliza la ecuación del área de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 8).

$$A_L = \frac{1.889 \times 10^{-5} m^3 / sg}{1 m / sg} = 1.889 \times 10^{-5} m^2$$

Una vez obtenida el área transversal, se determina el diámetro de la tubería lateral, se utiliza la ecuación del diámetro de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 9):

$$D_L = 2 * \sqrt{\frac{1.889 \times 10^{-5} m^2}{\pi}} = 0.0049 m$$

$$D_L \cong 4.9 mm$$

Teniendo en cuenta el valor del diámetro obtenido y las indicaciones del fabricante, la cual menciona que la tubería de riego conectada al emisor debe encontrarse en un rango de 16 a 32 mm, se seleccionó un diámetro de 16 mm.

Para calcular el coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería lateral, primero se reemplaza los valores en la ecuación del número de Reynolds (ver ecuación 13), se tiene:

$$Re = \frac{1 m / sg * 0.016 m}{1.004 \times 10^{-6} m^2 / sg} = 15,936.25$$

Como $Re > 4000$, se utiliza la ecuación de Colebrook-White (ver ecuación 15), realizando un proceso de iteración en la ecuación de Colebrook-White se obtiene una aproximación del valor del coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$f_{DW} = 0.0282$$

Obteniendo el valor del coeficiente de Darcy-Weisbach, se procede a calcular la constante empírica K de la ecuación de la pérdida de carga por fricción.

$$K = 0.0826 * 0.0282 = 2.33x10^{-3}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de Christiansen (ver ecuación 16).

Donde:

N= 17, número de emisores.

m=2, Coeficiente del caudal.

Reemplazando se tiene:

$$F = \frac{1}{1+2} + \frac{1}{2*17} + \frac{\sqrt{2-1}}{6*17^2} = 0.372$$

Sustituyendo en la ecuación de pérdida de cargas por fricción para tuberías con salida múltiple (ver ecuación 12) se tiene:

$$h_{fl} = (2.33x10^{-3}) * \frac{(1.889x10^{-5})^2}{(0.016)^5} * 13.6 * 0.372$$

$$h_{fl} = 4.011x10^{-3} \text{ m}$$

4.3.1.2.2 Dimensionado de la tubería porta laterales. Basándose en la velocidad de diseño seleccionada, se procede a calcular el caudal correspondiente de la tubería porta lateral.

Velocidad de diseño:

$$v_d = 1 \text{ m/sg}$$

Teniendo en cuenta el distanciamiento entre filas, el cual es de 1m, se tendrán 18 laterales en cada porta lateral, reemplazando en la ecuación para calcular el caudal (ver ecuación 7) se tiene:

$$Q \text{ porta lateral} = 18 * 1.889x10^{-5} \text{ m}^3/\text{sg} = 3.4x10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg}$$

Para determinar el área transversal de la tubería porta lateral, se utiliza la ecuación del área de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 8).

$$A_{PL} = \frac{3.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg}}{1 \text{ m}/\text{sg}} = 3.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Una vez obtenida el área transversal, se determina el diámetro de la tubería porta lateral, se utiliza la ecuación del diámetro de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 9):

$$D_{PL} = 2 * \sqrt{\frac{3.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\pi}} = 0.0021 \text{ m}$$

$$D_{PL} \cong 21 \text{ mm}$$

Para calcular el coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería porta lateral, primero se reemplaza los valores en la ecuación del número de Reynolds (ver ecuación 13) donde:

$$v = 1 \text{ m}/\text{s}$$

$$D_{PL} = 0.021 \text{ m}$$

$$\nu_{20^\circ} = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sg}$$

Se tiene:

$$Re = \frac{1 \text{ m}/\text{sg} * 0.021 \text{ m}}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sg}} = 20,919.33$$

Como $Re > 4000$, se utiliza la ecuación de Colebrook-White (ver ecuación 15), realizando un proceso de iteración en la ecuación de Colebrook-White se obtiene una aproximación del valor del coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$f_{DW} = 0.0263$$

Obteniendo el valor del coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería porta lateral, se procede a calcular la constante empírica K de la ecuación de la pérdida de carga por fricción.

$$K = 0.0826 * 0.0263 = 2.172 \times 10^{-3}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de Christiansen (ver ecuación 16).

Donde:

N= número de laterales 18.

m= Coeficiente del caudal.

$$F = \frac{1}{1+2} + \frac{1}{2*18} + \frac{\sqrt{2-1}}{6*18^2} = 0.361$$

Sustituyendo en la ecuación de pérdida de cargas por fricción (ver ecuación 12) se tiene:

$$h_{fPL} = (2.172 \times 10^{-3}) * \frac{(3.4 \times 10^{-4})^2}{(0.021)^5} * 18 * 0.361$$

$$h_{fPL} = 0.4 \text{ m}$$

4.3.1.2.3 Dimensionado de la tubería secundaria. Basándose en la velocidad de diseño seleccionada, se procede a calcular el caudal correspondiente de la tubería.

Velocidad de diseño:

$$v_d = 1 \text{ m/sg}$$

En cada tubería secundaria habrán 2 porta laterales, reemplazando en la ecuación para calcular el caudal (ver ecuación 7) se tiene:

$$Q_{\text{secundaria}} = 2 * 3.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg} = 6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg}$$

Para determinar el área transversal de la tubería secundaria, se utiliza la ecuación del área de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 8).

$$A_s = \frac{6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg}}{1 \text{ m/sg}} = 6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Una vez obtenida el área transversal, se determina el diámetro de la tubería secundaria se utiliza la ecuación del diámetro de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 9):

$$D_s = 2 * \sqrt{\frac{6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D_s = 0.0294 \text{ m} \cong 30 \text{ mm}$$

El diámetro de la tubería secundaria se tomará como el diámetro comercial de tubería más cercano superior a este, el cual es de 1 1/4 pulgadas o 0.03175 m para calcular el coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería secundaria, primero se reemplaza los valores en la ecuación del número de Reynolds (ver ecuación 13) se tiene:

$$Re = \frac{1 \text{ m/sg} * 0.03 \text{ m}}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sg}} = 29,880.47$$

Como $Re > 4000$, se utiliza la ecuación de Colebrook-White (ver ecuación 15), realizando un proceso de iteración en la ecuación de Colebrook-White se obtiene una aproximación del valor del coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$f_{DW} = 0.0241$$

Obteniendo el valor del coeficiente de Darcy-Weisbach, se procede a calcular la constante empírica K de la ecuación de la pérdida de carga por fricción.

$$K = 0.0826 * 0.0241 = 2 \times 10^{-3}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de Christiansen (ver ecuación 16).

Donde:

N= 2, número de porta laterales.

m= Coeficiente del caudal.

$$F = \frac{1}{1+2} + \frac{1}{2*2} + \frac{\sqrt{2-1}}{6*2^2} = 0.625$$

Sustituyendo en la ecuación de pérdida de cargas por fricción para tuberías con salida múltiple (ver ecuación 12) se tiene:

$$h_{fs} = (2 \times 10^{-3}) * \frac{(6.8 \times 10^{-4})^2}{(0.031)^5} * 14 * 0.625$$

$$h_{fs} = 0.333 \text{ m}$$

4.3.1.2.4 Dimensionado de la tubería primaria. Basándose en la velocidad de diseño seleccionada, se procede a calcular el caudal correspondiente de la tubería primaria.

Velocidad de diseño:

$$v_d = 1 \text{ m/sg}$$

En la tubería primaria estarán conectadas 6 tuberías secundarias, reemplazando en la ecuación para calcular el caudal (ver ecuación 7) se tiene:

Caudal de la tubería primaria:

$$Q_{\text{primaria}} = 6 * 6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg} = 4.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sg}$$

Para determinar el área transversal de la tubería primaria, se utiliza la ecuación del área de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 8).

$$A_p = \frac{4.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sg}}{1 \text{ m/sg}} = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Una vez obtenida el área transversal, se determina el diámetro de la tubería primaria, se utiliza la ecuación del diámetro de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 9):

$$D_p = 2 * \sqrt{\frac{4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D_p = 0.074 \text{ m}$$

El diámetro de la tubería principal se tomará como el al diámetro comercial de tubería más cercano, el cual es de 3 pulgadas o 0.0762 m para calcular el coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería primaria, primero se reemplaza los valores en la ecuación del número de Reynolds (ver ecuación 13) se tiene:

$$Re = \frac{1 \text{ m/sg} * 0.074 \text{ m}}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sg}} = 73,704.27$$

Como $Re > 4000$, se utiliza la ecuación de Colebrook-White (ver ecuación 15), realizando un proceso de iteración en la ecuación de Colebrook-White se obtiene una aproximación del valor del coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$f_{DW} = 0.019$$

Obteniendo el valor del coeficiente de Darcy-Weisbach, se procede a calcular la constante empírica K de la ecuación de la pérdida de carga por fricción.

$$K = 0.0826 * 0.019 = 1.57 \times 10^{-3}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de Christiansen (ver ecuación 16).

Donde:

$N = 2$, número de porta laterales.

$m =$ Coeficiente del caudal.

$$F = \frac{1}{1+2} + \frac{1}{2*6} + \frac{\sqrt{2-1}}{6*6^2} = 0.421$$

Sustituyendo en la ecuación de perdida de cargas por fricción para tuberías con salida múltiple (ver ecuación 12) se tiene:

$$h_{fp} = (1.57 \times 10^{-3}) * \frac{(4.08 \times 10^{-3})^2}{(0.0765)^5} * 61 * 0.421$$

$$h_{fp} = 0.274 \text{ m}$$

4.3.3 Cálculo de las pérdidas de carga localizadas en el sistema de riego

Se utiliza la ecuación de las pérdidas de carga localizadas (ver ecuación 17) para determinar las pérdidas debido a los accesorios en el tramo de la tubería que conduce al tanque.

Tabla 3

Pérdida de carga localizada en accesorios de la tubería con mayor requerimiento de presión del sistema de riego por goteo

Accesorio	K	N°	h_k
Electroválvula	10	1	0.545
Válvula reguladora de presión	1	1	0.054
Válvula reguladora de caudal	4	1	0.217
Manómetros	0.3	3	0.049
Caudalímetro	1	1	0.054
Reducción brusca	0.35	3	0.057
Total			0.977 m.c.a

Nota. Pérdida de carga localizada en los accesorios del sistema de riego por goteo, los datos fueron calculados con base en las especificaciones del sistema de riego implementado en la finca La Riña.

4.3.4 Cálculo del cabezal de presión en el sistema de riego del cultivo

Para el dimensionado de las tuberías laterales se va a tener en cuenta la presión de apertura que posee el emisor, la cual, por descripción de fabricante es de 10 m.c.a, a partir de dicha presión el emisor proporcionará un caudal constante, por ende, la presión en la cola de la tubería se tomará

con un valor de 10 m.c.a para asegurar que el ultimo emisor a lo largo de esta funcione correctamente.

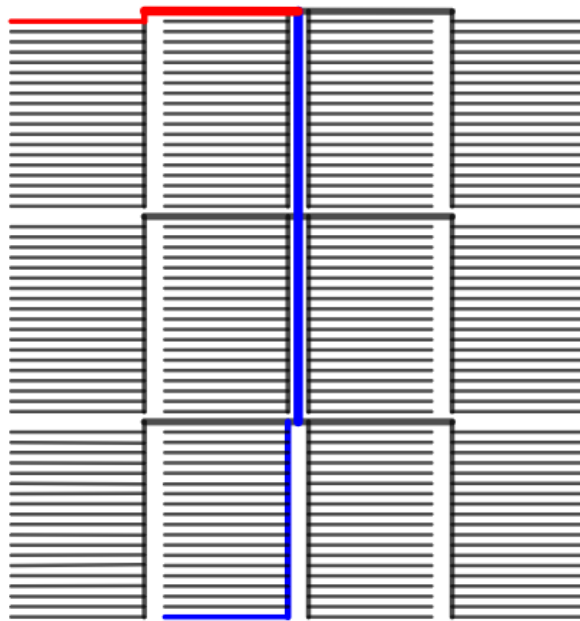
Se procede a calcular la presión en la cabeza de cada tubería lateral, una vez conocidos los valores, se tomará el mayor de estos y corresponderá a la presión en la cola de la porta lateral respectivo de cada tubería lateral, análogamente se hará de la misma forma para hallar la presión en la cabeza de la tubería secundaria y posteriormente la primaria.

Una vez obtenidos todos los diferentes valores de presión en la tubería primaria, se tomará el mayor de ellos, ese será el valor de la presión en la cabeza del sistema, ya que supondrá la ruta que mayor presión requiere el agua para poder llegar al último emisor.

La combinación de los diferentes escenarios conforma dos rutas críticas o rutas para tener en cuenta, una hace referencia a la ruta que más presión requiere en el sistema para que el agua pueda llegar y la otra hace referencia a la ruta que menos presión se requiere en el sistema para que esta pueda llegar (ver figura 11).

Figura 11

Rutas críticas del sistema de riego



Nota. La ruta crítica de color rojo corresponde al tramo el cual requiere mayor presión en la cabeza de la tubería primaria y La ruta crítica de color azul corresponde al tramo el cual requiere menor presión en la cabeza de la tubería primaria.

Se procede a calcular el tramo con mayor presión requerida, se debe tener en cuenta la presión en la cabeza de cada una de las tuberías y hacer la suma de estas (ver tabla 4).

Tabla 4

Ruta crítica con mayor presión requerida

Tubería	ΔZ (m)	$h_{cola} + \Delta z + h_f$
Lateral	-0.177	9.827
Porta lateral	-0.193	10.034
Secundara	-0.152	10.205
Primaria	0	10.393

Nota. Los datos reflejan la ruta crítica con mayor presión requerida en el sistema de riego de la finca La Riña.

Se utiliza la ecuación del cabezal de presión en una tubería (ver ecuación 19) para la presión requerida en la cabeza de la tubería primaria y se obtiene:

$$h_{cabeza TP} = 10.393 + 0.977 = 11.37 \text{ m. c. a}$$

La ruta crítica de color azul corresponde al tramo el cual requiere menor presión en la cabeza de la tubería primaria (ver figura 5).

Tabla 5

Ruta crítica con menor presión requerida

Tubería	ΔZ (m)	$h_{cola} + \Delta z + h_f$
Lateral	-0.322	9.838
Porta lateral	-3.351	6.731
Secundara	-0.002	7.062
Primaria	-7.412	-0.161

Nota. Los datos representan la ruta crítica con menor presión requerida en el sistema de riego de la finca La Riña.

Se utiliza la ecuación del cabezal de presión en una tubería (ver ecuación 19) para la presión requerida en la cabeza de la tubería primaria y se obtiene:

$$h_{cabeza TP} = -0.161 + 0.977 = 0.816 \text{ m. c. a}$$

Para unan presión en la cabeza de la tubería primaria de 10.393 m. c. a, se comprobará si el tramo que requiere menos presión en esta se ve afectado por un exceso de presión, para esto se

despejara de la ecuación del cabezal de presión en una tubería (Ecuación 1) la presión en la cola de la tubería, teniendo lo siguiente:

$$h_{cola} = h_{cabeza} - \Delta z - h_{f TL} - h_k$$

Tabla 6

Presión máxima alcanzada en el sistema

Tubería	ΔZ (m)	$h_{cabeza} - \Delta z - h_{f TL}$
Primaria	-7.412	17.517
Secundara	-0.002	17.286
Porta lateral	-3.351	20.237
Lateral	-0.322	20.554

Nota. Los datos muestran la presión máxima alcanzada en el sistema de riego de la finca La Riña.

Teniendo en cuenta las pérdidas de carga localizadas en accesorios de la tubería con mayor requerimiento de presión del sistema de riego por goteo (ver tabla 3) se reemplaza en la ecuación del cabezal de presión en una tubería (ver ecuación 19).

$$h_{cola} = 20.554 - 0.977 = 19.57 \text{ m. c. a}$$

Es importante determinar el tiempo en el que el sistema suministre el volumen requerido de agua hacia el cultivo, para este cálculo se usó el volumen requerido para el día con más necesidades hídricas del año que corresponde al 2 de marzo (ver tabla 2), se procede a calcular el tiempo requerido teniendo en cuenta el caudal de la tubería primaria, mediante la ecuación 10:

Reemplazando se tiene:

$$t_{REQC} = \frac{13.184 \text{ m}^3}{4.08 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{sg}}} = 3231.37 \text{ sg} = 0.8972 \text{ h}$$

4.4 Diseño Hidráulico del Sistema de Almacenamiento de Agua

Para realizar el diseño hidráulico del sistema de almacenamiento de agua se debe tener en consideración las necesidades de consumo de la vivienda, en la vivienda actualmente residen 5 personas (una familia conformada por el padre, la madre y sus 3 hijos).

En la siguiente tabla se puede detallar el consumo promedio de agua en diferentes zonas del país y también se ofrece un rango de consumo promedio por vivienda.

Tabla 7

Consumo promedio de agua en diferentes ciudades del país

Comparación del número de personas por hogar			
Ciudad	Promedio (Personas / hogar)		Variación (%)
	DNP 1991	DANE – ENH 1999	
Bogotá	5.32	3.79	(28.76)
Cali	4.87	3.91	(19.71)
Medellín	4.74	4.02	(15.19)
Bucaramanga	5.68	4.01	(29.40)
Valledupar	4.93	4.74	(3.93)
Total Nacional	5.1	4.1	(19.4)
Rango de consumo promedio (lts/vivienda/día)			
Limite*	DNP 1991	DANE – ENH 1999	Variación (%)
Inferior	587	448	(20.52)
Superior	828	632	(20.52)

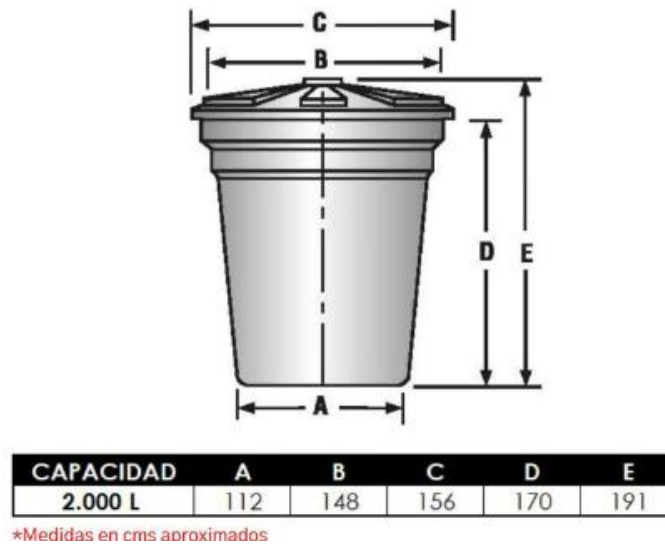
Nota. Datos tomados de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). (2001). Documento de Trabajo y Participación Ciudadana. Estimación del consumo básico de agua potable en Colombia basado en la Encuesta Nacional de Hogares (ENH) de 1999 y el Departamento Nacional de Planeación (DNP) de 1991.

Según esta tabla, el rango de consumo promedio para una casa de 5 personas varía entre (587-828) L/día, para el almacenamiento del agua, se utilizará un tanque de 2000 litros, la razón

de la elección se basa en que puede manejar un volumen apropiado de agua para el consumo que requiere la vivienda.

Figura 12

Dimensiones de Tanque de Agua Seleccionado



Nota. Dimensiones del tanque de agua seleccionado con capacidad de 2,000 litros. Imagen obtenida del sitio web de Homecenter.

Se establecieron los siguientes parámetros de almacenamiento del agua en el tanque:

1. Volumen mínimo de agua en el tanque: 344 L
2. Volumen máximo de agua en el tanque: 2000 L
3. Volumen para suministrar al sistema de almacenamiento: 1656 L

Para la sección del diámetro de la tubería del sistema de llenado de tanque no es un parámetro importante mantener un determinado caudal, así que, para disminuir costos relacionados a las tuberías así como la potencia que requerida para la bomba, se tomará una tubería de 1 pulgada (25.4 mm), se seleccionó este diámetro debido a que resulto ser una alternativa más económica

que implementar una tubería de 3 pulgadas (diámetro de la tubería que está conectada a esta) en este mismo tramo, sin hacer muy extenso el tiempo de llenado del tanque y por ende, el tiempo de funcionamiento de la bomba.

$$D_T = 25.4 \text{ mm}$$

Se procede a calcular el área de la sección transversal de la tubería que dirige al tanque despejando de la ecuación del diámetro de la sección transversal de una tubería (ver ecuación 8):

$$A_T = \frac{\pi * (0.0254 \text{ m})^2}{4} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Para determinar el caudal de la tubería que dirige al tanque, se utiliza la ecuación para calcular el caudal (ver ecuación 8):

$$Q_T = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2 * 1 \frac{\text{m}}{\text{sg}} = 5.067 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} = 1.82412 \text{ m}^3/\text{h}$$

Posteriormente, se procede a determinar el tiempo requerido para llenar el tanque, para ello se tiene en cuenta el volumen requerido a suministrar en el tanque (1656 L) y el caudal de la tubería que dirige a tanque (ver ecuación 10).

$$t_{REQT} = \frac{1.656 \text{ m}^3}{5.067 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{sg}}} = 3312 \text{ sg} = 0.91 \text{ h}$$

4.4.1 Pérdida de cargas por fricción de la tubería que dirige al tanque

Se procede a calcular las pérdidas de carga por fricción en una tubería con única salida para la sección de tramo BF (ver figura 9)

Para calcular el coeficiente de Darcy-Weisbach para la tubería secundaria, primero se reemplaza los valores en la ecuación del número de Reynolds (ver ecuación 13) se tiene:

$$Re = \frac{1 \frac{m}{sg} * 0.0254 m}{1.004 \times \frac{10^{-6} m^2}{sg}} = 25298.8$$

Como $Re > 4000$, se utiliza la ecuación de Colebrook-White (ver ecuación 15), realizando un proceso de iteración en la ecuación de Colebrook-White se obtiene una aproximación del valor del coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$f_{DW} = 0.019$$

Reemplazando en la ecuación de pérdida de carga por fricción en una tubería con única salida (ver ecuación 11) se tiene:

$$hf = 0.019 * \frac{36 m}{0.0254 m} * \frac{(1m/sg)^2}{2 * 9.8 m/sg^2}$$

$$hf = 1.37 m.c.a$$

4.4.2 Pérdida de carga producida en puntos localizados en la tubería dirigida al tanque de almacenamiento

Se utiliza la ecuación de las pérdidas de carga localizadas (ver ecuación 17) para determinar las pérdidas debido a los accesorios en el tramo de la tubería que conduce al tanque.

Tabla 8

Pérdida de carga localizada en accesorios de la tubería hacia el tanque de almacenamiento

Accesorio	K	N°	h_k
Electroválvula	10	1	0,544
Reducción brusca	0,35	3	0,057
Codo 90°	0,75	2	0,081
Total			0.683 m.c.a

4.4.3 Cálculo del cabezal de presión en la tubería dirigida al tanque de almacenamiento

Teniendo en cuenta que la diferencia de altura que hay entre el punto de entrada (Punto B) y el punto de salida (Punto F) del diagrama del sistema de Bombeo Fotovoltaico (ver figura 9), la cual es de (-6m) y al estar conectada a un tanque de almacenamiento abierto, la presión en la cola de la tubería BF tendrá un valor de 0 m.c.a.

Reemplazando en la ecuación del cabezal de presión en una tubería (ver ecuación 19) se tiene lo siguiente:

$$h_{cabeza_{BF}} = 0 - 6 + 1.37 + 0.683 = -3.947 \text{ m. c. a}$$

El valor obtenido para la altura de cabeza requerida ($h_{cabeza_{BF}}$) refleja que la diferencia de altura entre el punto de succión y el punto de descarga (con un valor de -6 m) es el factor dominante que afecta el cálculo.

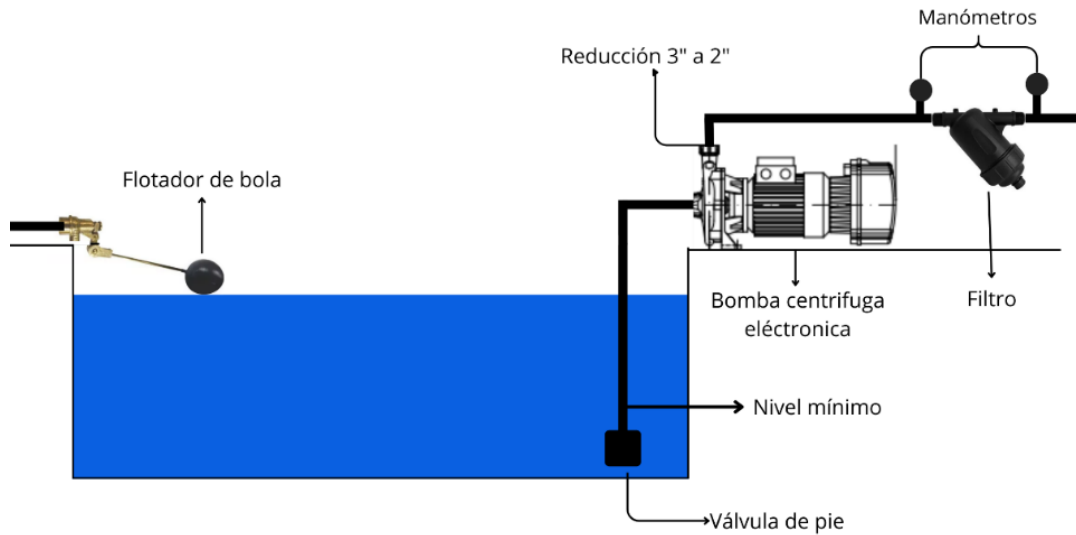
El resultado negativo indica que, gracias a esta diferencia de altura, el sistema tiene suficiente energía disponible para transportar el agua al tanque de almacenamiento sin necesidad de incrementar la potencia de la bomba, por ende, no será un factor para tener en cuenta en la selección de la bomba.

4.5 Diseño hidráulico del Reservorio de Agua

El diseño del reservorio de agua es un componente esencial en la planificación del sistema de bombeo, ya que permite almacenar y distribuir el agua de manera eficiente según las necesidades del cultivo y de consumo humano. En este esquema se muestran los elementos principales del reservorio, como el sistema de control de nivel y la bomba centrífuga electrónica, que garantizan un suministro constante y adecuado de agua.

Figura 13

Esquema del reservorio de agua



El esquema ilustra claramente la disposición del flotador de bola para el control del nivel de agua, así como la ubicación de la válvula de pie y los manómetros, que son esenciales para monitorear la presión en el sistema, además de tener un nivel mínimo al cual el agua puede llegar, este nivel será monitoreado por un sensor de nivel de altura del agua.

4.5.1 Dimensionamiento del reservorio de agua

El volumen de un reservorio rectangular se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{Largo (L)} \times \text{Ancho (A)} \times \text{Profundidad (D)}$$

Se tiene que:

$$\text{Volumen} = 30 \text{ m}^3$$

$$\text{Profundidad (D)} = 1.5 \text{ metros}$$

Se despeja la fórmula del volumen para obtener el área de la base (L x A):

$$L \times A = \frac{30 \text{ m}^3}{1.5 \text{ m}} = 20 \text{ m}^2$$

Para estabilidad y facilidad de construcción, es común usar una relación entre el largo y el ancho de aproximadamente 2:1.

Largo (L): 6.32 metros

Ancho (A): 3.16 metros

Profundidad (D): 1.5 metros

4.6 Selección de la Bomba

Se ha seleccionado una bomba centrífuga para el proyecto debido a sus características adecuadas para las necesidades específicas del sistema de riego y abastecimiento de agua

La principal razón por la cual se seleccionó una bomba de tipo centrífuga es porque son ideales para aplicaciones que requieren un alto caudal de agua con una presión moderada, como los sistemas de riego por goteo o aspersión. En el contexto de la finca, donde se necesita suministrar grandes volúmenes de agua para el riego del cultivo, una bomba centrífuga permite un flujo continuo y estable, optimizando el uso de energía solar disponible.

4.6.1 Caudal total

Para determinar el caudal total del sistema se debe tener en consideración tanto el caudal que se suministra al cultivo como el caudal que se suministra al tanque de almacenamiento y se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 32: Cálculo del caudal total del sistema.

$$Q_{TOTAL} = Q_{Cultivo} + Q_{Tanque}$$

Donde:

$$Q_{TOTAL} = \text{Caudal total, } \left(\frac{m^3}{sg}\right).$$

$$Q_{Cultivo} = \text{Caudal suministrado al cultivo, } \left(\frac{m^3}{sg}\right).$$

Q_{Tanque} = Caudal suministrado al tanque de almacenamiento, $\left(\frac{m^3}{sg}\right)$.

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$Q_{TOTAL} = 4.08 \times 10^{-3} \frac{m^3}{sg} + 5.067 \times 10^{-4} \frac{m^3}{sg} = 4.586 \times 10^{-3} \frac{m^3}{sg} = 16.5096 \text{ m}^3/h$$

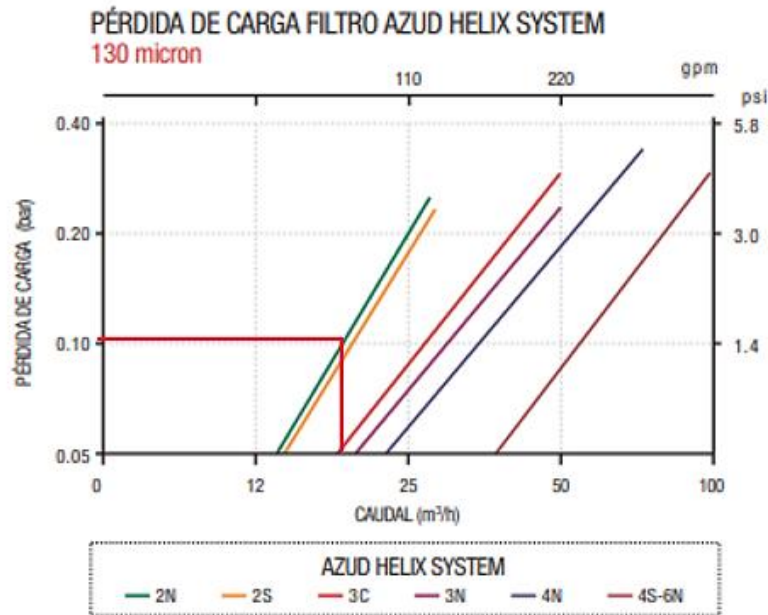
4.6.2 Cálculo de pérdidas de carga localizadas totales en el sistema

Para los sistemas de bombeo, el filtro es un componente esencial, ya que elimina impurezas y partículas sólidas del agua antes de que entre en la bomba y en las tuberías de riego.

Para determinar las pérdidas de carga en el filtro, es necesario identificar el caudal que fluirá a través del filtro en el sistema (16.5096 m³/h). A partir del caudal de operación, se puede trazar una línea vertical en el punto correspondiente de la gráfica de las curvas de Pérdida de Carga del Filtro Azud Helix System (Figura 14) para determinar la pérdida de carga específica asociada con el filtro, el filtro seleccionado fue el AZUD HELIX SYSTEM 2N ya que maneja el caudal establecido.

Figura 14

Curvas de Pérdida de Carga del Filtro Azud Helix System



Nota. Curvas de pérdida de carga del filtro Azud Helix System, obtenidas del catálogo técnico de AZUD. Las curvas muestran la relación entre el caudal y la pérdida de carga para diferentes modelos del filtro con 130 micrones de tamaño de poro. Fuente: AZUD. (2022). AZUD Helix System.

Se utiliza la ecuación de las pérdidas de carga localizadas (ver ecuación 17) para determinar las pérdidas debido a los accesorios en todo el sistema.

Tabla 9

Pérdidas de carga localizadas en accesorios de todo el sistema

Accesorio	K	N°	h_k
Electroválvula	10	1	0.5447
Válvula reguladora de presión	1	1	0.0545
Válvula reguladora de caudal	4	1	0.2179
Reducción brusca	0.35	3	0.0572

Manómetros	0.3	3	0.0490
Caudalímetro	1	1	0.0545
T	0.6	1	0.0327
Filtro de anillas	-	1	0.1000
Codo 90°	0.75	3	0.1225
Válvula de pie	2.5	1	0.1362
Total			1.3691

Nota. Los datos reflejan las pérdidas de carga totales localizadas en los accesorios del sistema de riego de la finca La Riña.

4.6.3 Cálculo de la presión a la salida de la bomba.

Para determinar la presión a la salida de la bomba debe considerarse el tramo que mayor presión requiera en el sistema bombeo, este tramo viene siendo el obtenido en la parte del sistema del cultivo, a ese tramo se le debe sumar la diferencia de altura que hay entre el punto de salida de la bomba (punto A) y el punto donde comienza la tubería principal del cultivo (punto B) del diagrama del sistema de Bombeo Fotovoltaico (ver figura 9) la cual es de (0.3m) y las pérdidas de carga por fricción y accesorios en la ruta que más presión requiere en el cultivo más las del tramo AB obteniendo la siguiente ecuación:

Ecuación 33: Cabezal de presión a la salida de la bomba.

$$H_{salida\ bomba} = H_{TP} + \Delta z_{AB} + hf_{AB} + h_{kt}$$

$$H_{salida\ bomba} = 10.393 + 0.3 + 1.324 + 1.36 = 13.377\ m.c.a$$

4.6.4 Cálculo del NPSH requerido y disponible

Se debe tener en cuenta el nivel mínimo estipulado de agua para el reservorio, el cual fue de 30 cm o 0.3m. La Altura estática de succión vendría siendo la distancia que hay entre el nivel mínimo estipulado de agua para el reservorio y la altura a la que se encuentra la entrada de la bomba la cual es de alrededor de 1.65 m.

$$H_s = 1.65 - 0.3 = 1.35 \text{ m. c. a}$$

Para determinar las pérdidas de carga en la línea de succión (H_{suc}), primero se debe hallar las pérdidas de carga por fricción, reemplazamos en la ecuación de pérdidas de carga por fricción en una tubería con única salida (ver ecuación 11) y se tiene:

$$h_{fsuc} = 0.019 * \frac{2 \text{ m}}{0.074 \text{ m}} * \frac{(1\text{m/sg})^2}{2 * 9.8 \text{ m/sg}^2}$$

$$h_{fsuc} = 0.026 \text{ m}$$

Además de las pérdidas de carga por fricción, se deben tener en cuenta las cargas asociadas a los accesorios en esta parte del sistema, los cuales son:

Codo de 90°: El codo de 90° se utiliza para redirigir el flujo del líquido en la tubería de succión, permitiendo una conexión adecuada entre la bomba y la fuente de agua.

Válvula de pie: La principal función de esta válvula es evitar que el fluido regrese al tanque o fuente cuando la bomba se detiene. Esta válvula permite el paso del agua hacia la bomba cuando está en operación, pero cierra automáticamente cuando el flujo se detiene, evitando así que la línea de succión se vacíe.

Teniendo los elementos anteriores en consideración, se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación 34. Cálculo de pérdidas de carga en el tramo de succión.

$$H_{suc} = h_{fsuc} + h k_{codo} + h k_{valvula}$$

Donde:

H_{suc} = Pérdida de carga en el tramo de la succión.

h_{fsuc} = pérdida de carga por fricción en el tramo de la succión

hk_{codo} = pérdida de carga localizada debido al codo

$hk_{valvula\ pie}$ = pérdida de carga localizada debido a la válvula de pie.

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$H_{suc} = 0.026 + 0.136 + 0.04 = 0.202 \text{ m. c. a}$$

Teniendo en cuenta que la altura en la cual se encuentra la finca, de alrededor de unos 780 m (ver apéndice A), se tomó un valor de presión atmosférica de:

$$H_a = 9.42 \text{ m. c. a}$$

La presión de vapor de agua es la presión a la cual un líquido comienza a evaporarse a una temperatura específica, (ver apéndice B) se muestra la relación entre la temperatura del agua y la presión de vapor.

Teniendo en cuenta que la temperatura del agua, la cual se estimó anteriormente de unos 20°C se tiene que la presión de vapor correspondiente según la tabla es:

$$H_{vp} = 0.2388 \text{ m. c. a}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación del NPSH disponible (Ecuación) se tiene:

$$NPSH_{disponible} = 9.42 - 2 - 0.2388 - 0.202 = 7.47 \text{ m.c.a}$$

Para determinar el cálculo del NPSH requerido se utiliza la Ecuación , en donde se tiene un factor del 10% que relaciona al $NPSH_{disponible}$ con el $NPSH_{requerido}$.

Reemplazando se tiene que:

$$NPSH_{requerido} \leq 6.8 \text{ m. c. a}$$

4.6.5 Cálculo de la altura dinámica de la bomba

Este valor representa la suma de todas las alturas que la bomba debe vencer para asegurar un flujo continuo de agua en el sistema y se calcula mediante la Ecuación :

$$H_{Dinámica} = 13.377 + 0.202 = 13.579 \text{ m. c. a}$$

4.6.6 Cálculo de la potencia de la Bomba

La potencia de la bomba viene dada por la siguiente ecuación:

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{sg}^2} * 4.586 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} * 13.07 \text{ m} = 587.50 \text{ W}$$

4.6.7 Selección de la bomba

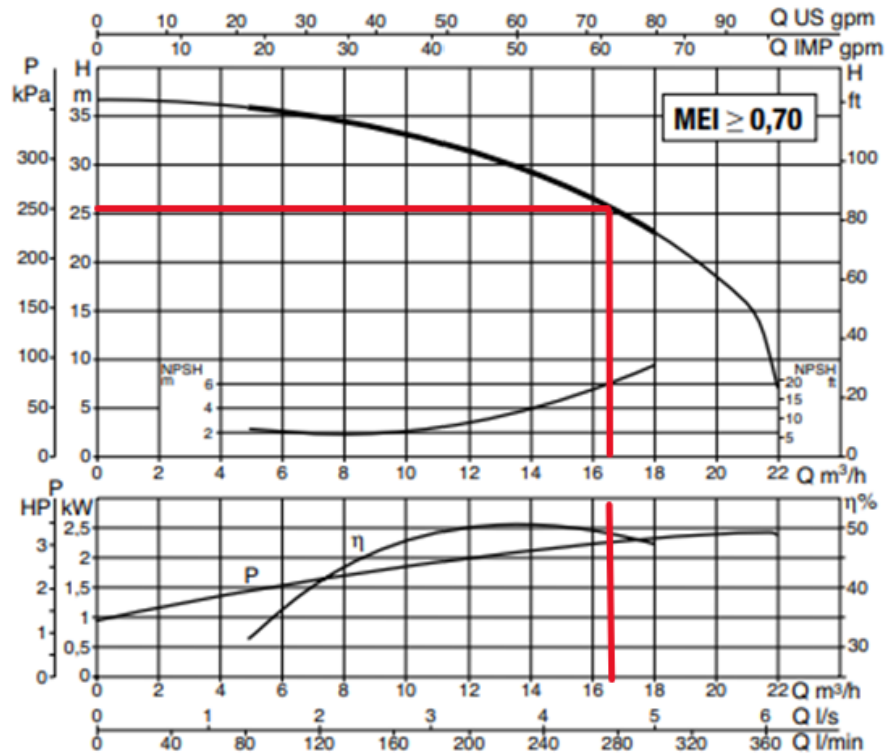
Para la selección de la bomba se deben de tener en cuenta los parámetros anteriormente calculados y encontrar una bomba que cumpla con los requerimientos establecidos por el sistema manejando el caudal establecido, el cual es de 16.5096 m³/h, los requerimientos para seleccionar la bomba son:

- Altura dinámica mayor de 13.07 m.c.a
- Tener un NPSH_{requerido} ≤ 6.86 m.c.a
- Potencia de bomba superior a 587.50 KW

Se ha seleccionado la bomba centrífuga Monobloc KE 36/200 para el sistema de bombeo fotovoltaico automatizado en la finca La Riña debido a su capacidad para cumplir con los requisitos específicos de caudal y altura manométrica necesarios para el riego y suministro de agua.

Figura 15

Curvas de Rendimiento Hidráulico de la Bomba Centrífuga Monorrodete KE 36/200



Para un caudal de $16.5096 \text{ m}^3/\text{h}$ se tiene lo siguiente:

- Altura Manométrica = 25 metros.
- NPSH Requerido = 6 metros.
- Potencia Requerida = 2.2 kW
- Eficiencia (η): 47%.

Las curvas demuestran que la bomba seleccionada puede operar dentro de los parámetros necesarios para el sistema de bombeo en la finca, alcanzando la altura y el caudal requeridos.

4.7 Sistemas de Control y Automatización

4.7.1 Sistema de Control del Cultivo

4.7.1.1 Modelo Predictivo del Cultivo. Se implementó un modelo de regresión lineal múltiple con el objetivo de predecir el volumen de agua requerido (VOL_{REQ}) para el riego del cultivo para cada día, utilizando diversas variables ambientales y operativas como entradas. Este modelo es fundamental para el desarrollo de un sistema de riego automatizado que optimice el uso del agua en función de las condiciones ambientales, mejorando la eficiencia del riego y reduciendo el desperdicio de agua.

Las variables utilizadas como entradas para el modelo de regresión lineal múltiple son:

- T_{prom} = Temperatura promedio diaria ($^{\circ}\text{C}$).
- V_{viento} = Velocidad del viento (m/s).
- H_R = Humedad relativa a (%).
- H_S = Humedad del suelo en la zona de raíces (%).
- I_S = Irradiación solar promedio diaria ($(\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día})$).
- K_C = Coeficiente de cultivo (factor que representa las necesidades de agua del cultivo específico).

La variable de salida, o variable dependiente, es:

VOL_{REQ} = Volumen de agua requerido para el riego (m^3).

4.7.1.1.1 Ecuación del Modelo de Regresión. La regresión lineal múltiple permite modelar la relación entre el volumen de agua requerido (VOL_{REQ}) y las variables independientes (entrada) mediante la siguiente ecuación lineal:

Ecuación 35: Modelo de Regresión.

$$VOL_{REQ} = \beta_0 + \beta_1 \cdot T_{prom} + \beta_2 \cdot V_{viento} + \beta_3 \cdot H_R + \beta_4 \cdot H_S + \beta_5 \cdot I_S + \beta_6 \cdot K_c$$

Donde:

- β_0 es el término independiente (intercepto).
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ son los coeficientes de regresión asociados a cada una de las variables independientes.

Después del entrenamiento del modelo utilizando los datos recopilados y con ayuda del programa Excel para realizar la regresión lineal múltiple, los coeficientes obtenidos son los siguientes:

- Intercepción (β_0) = -23.431
- Coeficiente de T_{prom} (β_1) = 0.5776
- Coeficiente de V_{viento} (β_2) = 1.5495
- Coeficiente de H_R (β_3) = 0.0373
- Coeficiente de H_S (β_4) = -2.9854
- Coeficiente de I_S (β_5) = 0.3940
- Coeficiente de K_c (β_6) = 12.0854

El modelo se evaluó utilizando el análisis de varianza con el fin de determinar si las diferencias observadas entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas y se obtuvieron los siguientes indicadores de desempeño:

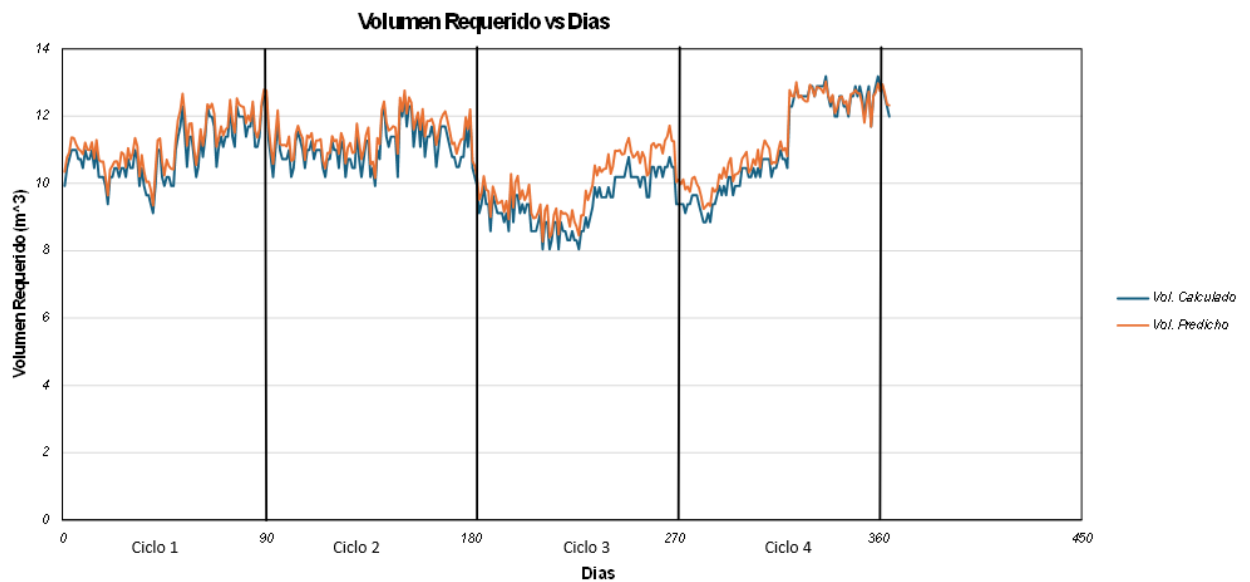
- Coeficiente de Correlación Múltiple: 0.9899
- Coeficiente de Determinación (R^2): 0.9798
- R^2 Ajustado: 0.9795
- Error Típico: 0.1684

Los resultados obtenidos implican una gran correlación entre las variables de entrada y la variable de salida, además de que cada variable independiente posee relevancia en la variable dependiente, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9798 (cercano a 1) refleja una gran capacidad predictiva, el bajo error típico sugiere que las predicciones del modelo son bastante precisas.

Una vez obtenida la ecuación del modelo predictivo para calcular el volumen requerido, se calcula por medio de ésta el volumen necesario para cada día del año, teniendo así 2 variables, el volumen calculado por medio de los datos históricos y el volumen obtenido por medio del modelo predictivo. Podemos evidenciar en la siguiente gráfica el comportamiento de estas 2 variables con respecto a los días del año.

Figura 16

Volumen Requerido vs Días (Comparación de métodos de cálculo)



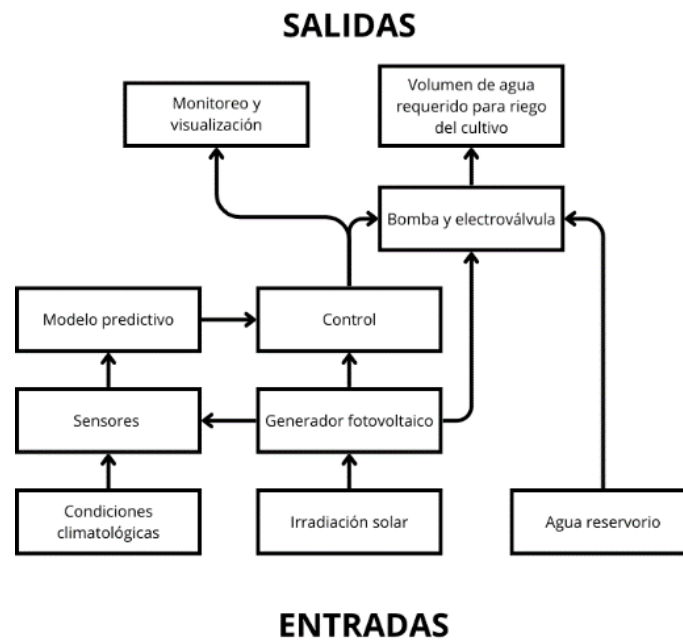
La gráfica muestra una alta concordancia entre el volumen calculado a partir de datos históricos y el volumen predicho por el modelo de regresión lineal múltiple, lo que sugiere que el modelo predictivo tiene una buena precisión, ya que a través de los diferentes ciclos representados en la gráfica (Ciclo 1 al Ciclo 4), se puede observar que el modelo predictivo sigue de cerca el comportamiento del volumen calculado con algunas diferencias menores.

Dado el ajuste observado entre ambas variables, se puede concluir que el modelo de regresión lineal múltiple utilizado es válido para predecir la cantidad de agua necesaria diariamente. Esta validación es crucial para justificar el uso del modelo como una herramienta efectiva en la gestión automatizada del sistema de riego, asegurando un uso eficiente del recurso hídrico y poder así optimizar la cantidad de agua suministrada en función de las condiciones ambientales y las necesidades del cultivo. Esto no solo puede reducir el desperdicio de agua, sino también mejorar la productividad del cultivo al mantener condiciones óptimas de riego.

4.7.1.2 Descomposición funcional del sistema de riego. En la Figura 17, se muestra un diagrama de las entradas clave al sistema de riego automático y cómo estas son procesadas a través de sensores y un modelo predictivo para calcular el volumen de agua necesario. Luego, el controlador utiliza esta información para gestionar la operación de la bomba y la electroválvula, alimentadas por un generador fotovoltaico. También se incluye un bloque de monitoreo y visualización que proporciona datos en tiempo real sobre el estado del sistema al operador. Este diagrama abarca los elementos esenciales que permiten una operación autónoma del sistema de riego.

Figura 17

Diagrama de Descomposición Funcional del Sistema de Riego



4.7.1.3 Diagrama de Flujo para Control Automático del Riego para el Cultivo

Figura 18

Diagrama de flujo para el sistema de riego para el cultivo (parte 1)

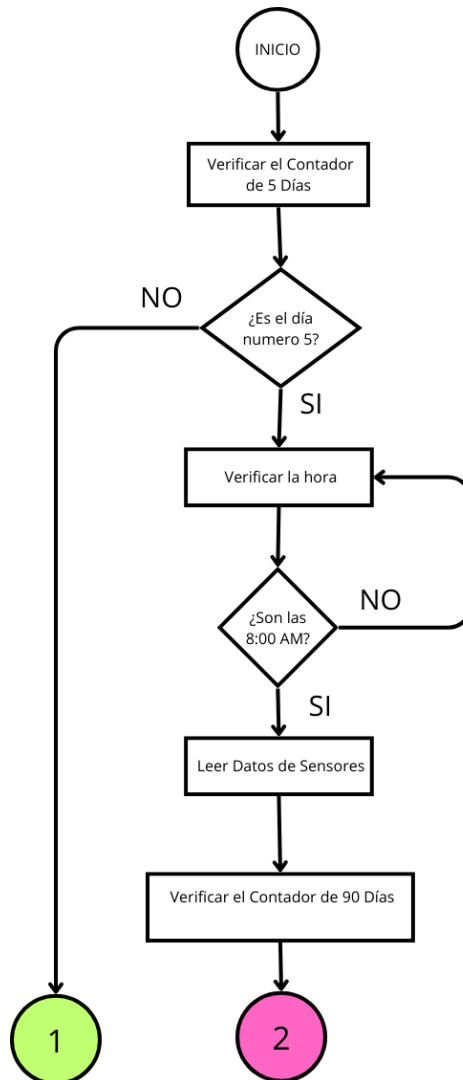


Figura 19

Diagrama de flujo para el sistema de riego para el cultivo (parte 2)

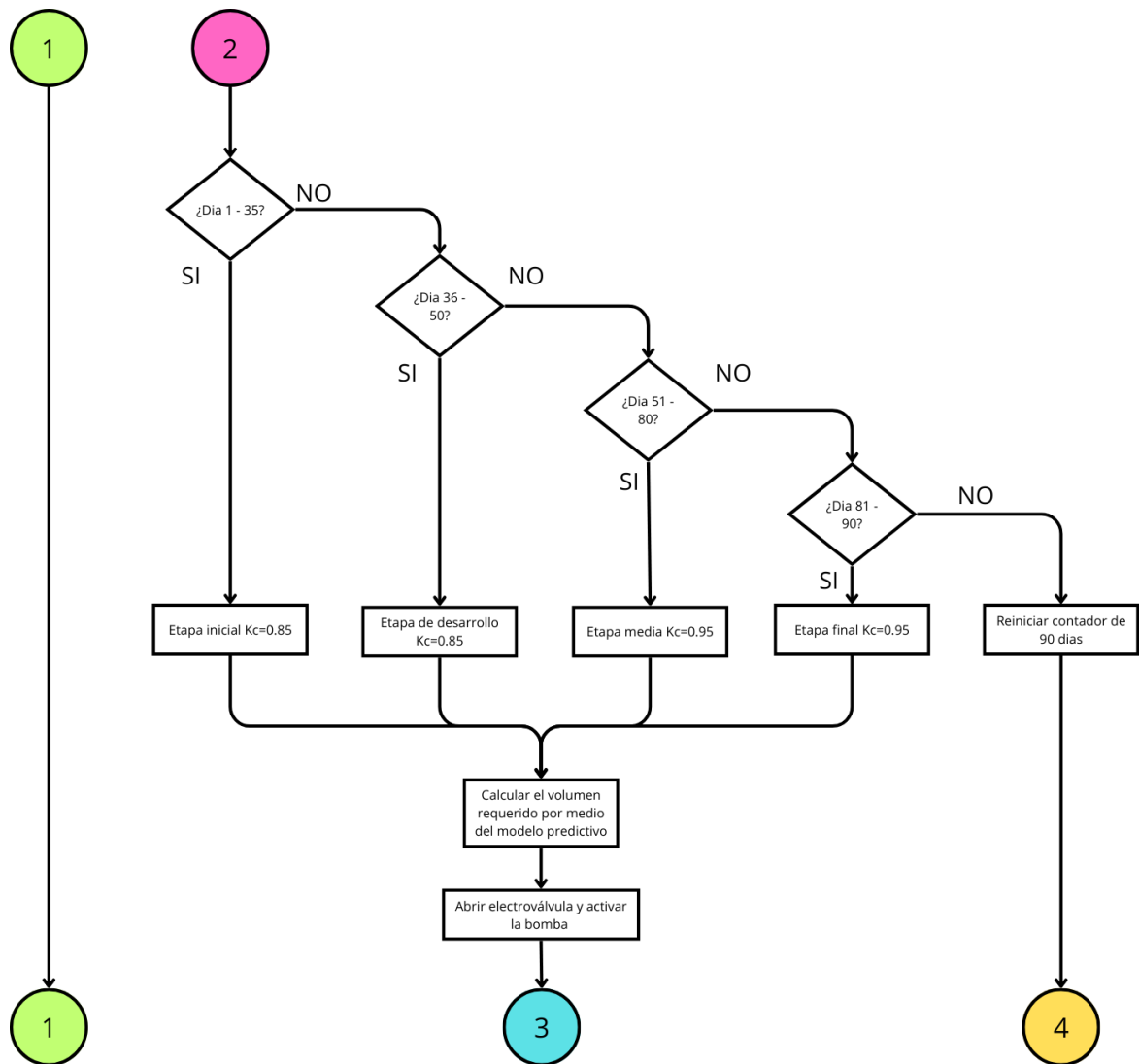
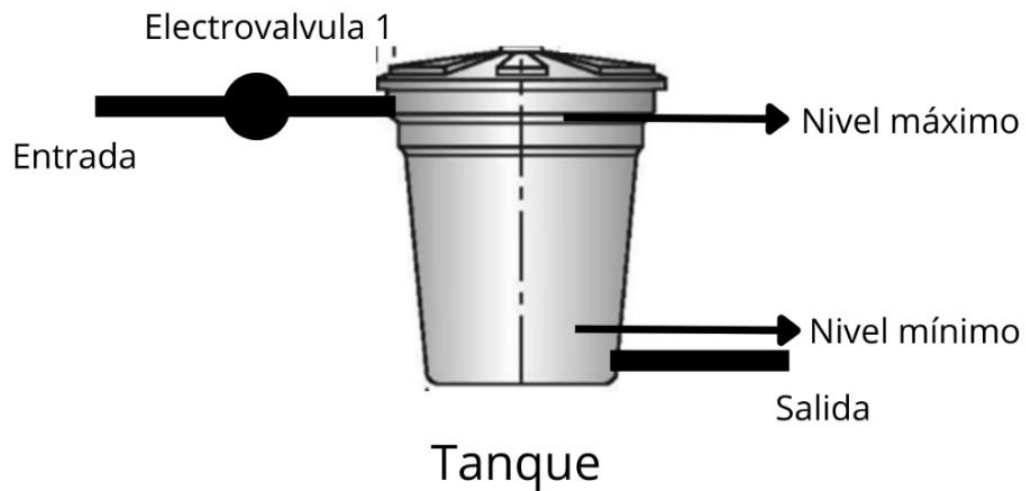
**Figura 20**

Diagrama de flujo para el sistema de riego para el cultivo (parte 3)

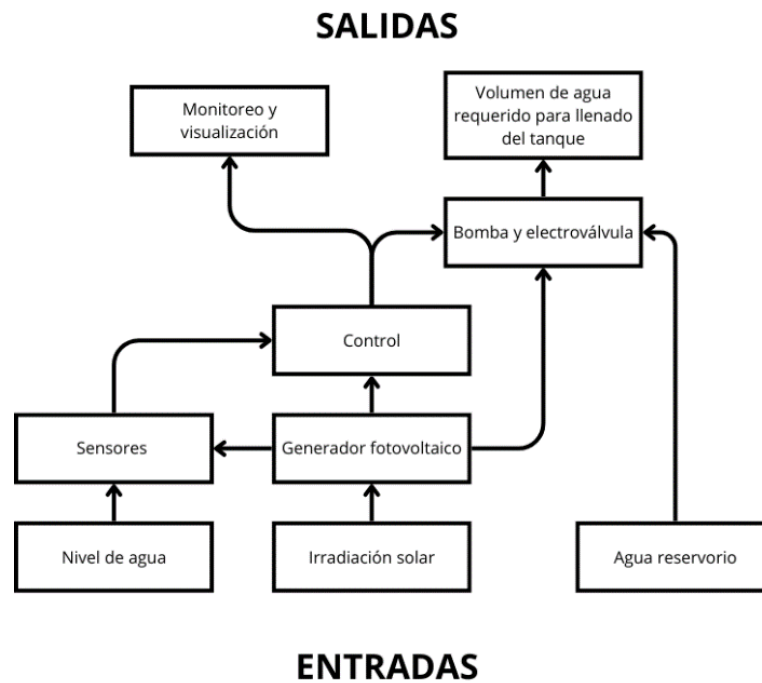


Nota. El esquema identifica cada componente que hace parte del sistema de control de llenado del tanque, en donde los sensores van a estar ubicados en el nivel máximo y mínimo.

4.7.2.1 Descomposición funcional del sistema de llenado del tanque. En la figura 21, se muestra el diagrama de las entradas clave al sistema de llenado de tanque, similar al sistema de riego para el cultivo, utiliza los datos suministrados por los sensores para determinar el volumen necesario de agua que se debe suministrar.

Figura 22

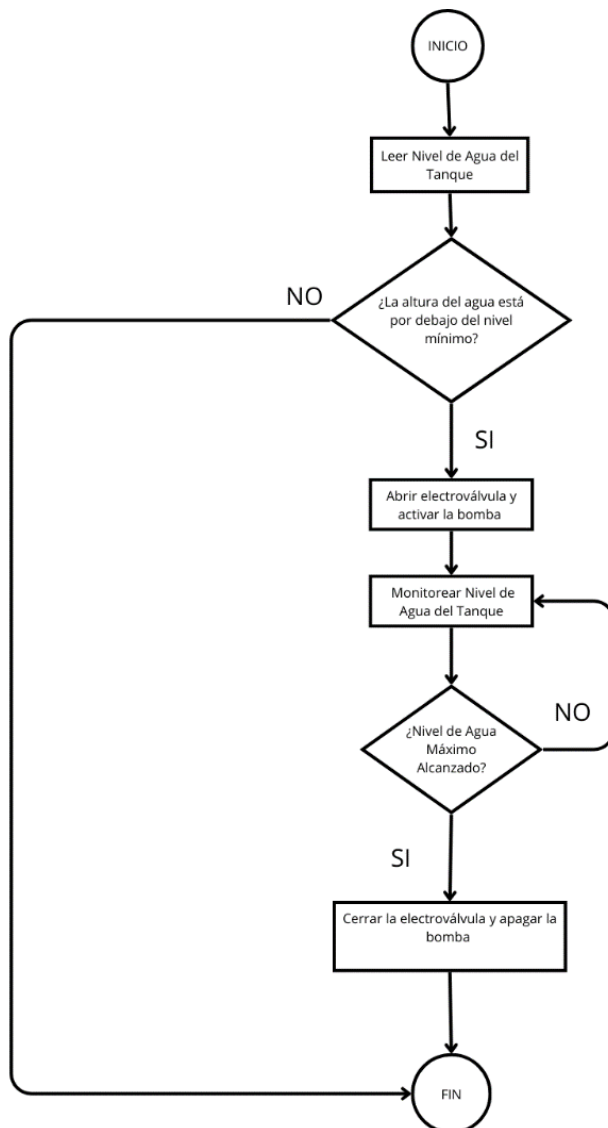
Diagrama de Descomposición Funcional del Sistema Llenado del Tanque)



4.7.2.2 Diagrama de Flujo para el control automático del sistema de llenado del tanque

Figura 23

Diagrama de flujo para el sistema de llenado de tanque

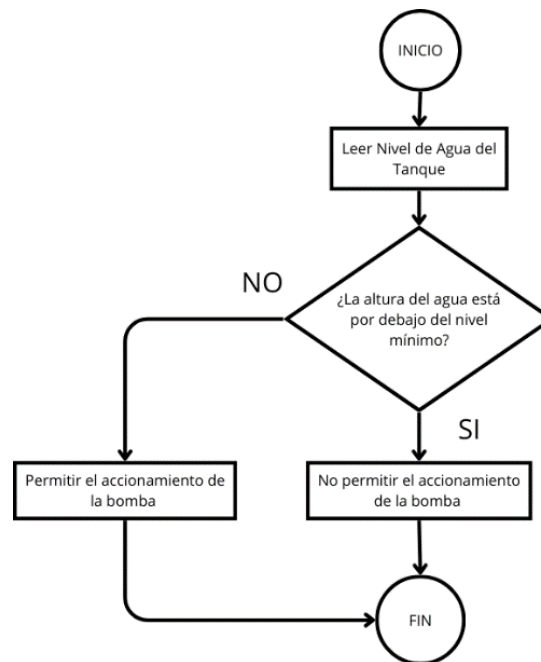


4.7.3 Sistema de Control del Reservorio

4.7.3.1 Diagrama de Flujo para el control automático del sistema del reservorio.

Figura 24

Diagrama de flujo para el sistema del reservorio



4.8 Diseño del Sistema Fotovoltaico

Se presenta el diseño integral del sistema fotovoltaico propuesto, abarcando todos los componentes esenciales y los cálculos necesarios para asegurar su correcta implementación y funcionamiento.

4.8.1 Estudio de Orientación de los Paneles y HSP

Se optó por usar paneles solares fijos, mucho más económicos, para este tipo de paneles se debe calcular la inclinación a la que estarán para aprovechar la mayor radiación solar.

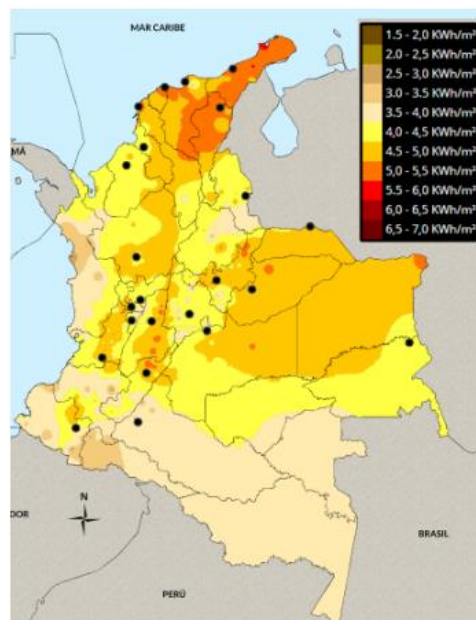
Para calcular el ángulo de inclinación, se consideró la base de datos que arroja la NASA, con las coordenadas del lugar, se obtienen los valores de la radiación solar para una superficie y se estudió la irradiación solar promedio de los últimos 20 años por mes para ángulos de inclinación de superficie diferentes que dependerán de la latitud en la que se encuentra la ubicación, de 10.68 (ver apéndice E).

Para determinar cuál ángulo es el óptimo para la inclinación del panel se procede a calcular el promedio de los ángulos en donde la radiación fue la óptima para cada mes tal y como se muestra en la tabla, obteniendo un valor de:

$$\alpha = 6.67^\circ$$

Figura 14

Mapa de radiación solar promedio en Colombia



Nota. Mapa de radiación solar promedio en Colombia. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Los datos del Atlas solar reflejan mediciones de radiación en una superficie plana. Se utilizó el valor promedio diario de radiación para asegurar la generación de energía en una zona no conectada a la red. Las horas solares pico (HSP), equivalentes a 1 kWh/m² por día, se calcularon usando la radiación proporcionada por el Atlas solar para mejorar la fiabilidad del sistema, el valor de HSP se determinó como 5 horas.

Reemplazando se tiene que:

$$HSP = \frac{\left(5 \frac{kWh^2}{m^2}\right)}{1 \frac{kW}{m^2}} = 5 \text{ horas}$$

4.8.2 Cálculo de la Demanda Diaria Máxima

Para el cálculo de la demanda diaria máxima de energía, primero se determina la demanda diaria de energía, para ello se utiliza la Ecuación .

Teniendo en cuenta la cantidad de dispositivos, la potencia, el número de horas en funcionamiento, se procede a realizar los cálculos de la demanda diaria y se registran en la siguiente tabla:

Tabla 10

Consumo energético diario de dispositivos en la finca

Elemento	Numero	Horas	Potencia (Watts)	Potencia Total (Watts)	Energía (Wh)
Bomba	1	1.79	2200	2200	3947.24
Electroválvula 1	1	0.90	2	2	1.79
Electroválvula 2	1	0.90	2	2	1.79
Bombillos	5	6.00	7	35	210
Electrónica	1	24.00	1	1	24
Ventiladores	1	3.00	60	120	360
Cargador celular	3	1.00	20	60	60
TOTAL				2360	4424.83

Nota. Consumo energético diario de dispositivos en la finca La Riña.

En la tabla 15, se detallan los dispositivos considerados, junto con su potencia, tiempo de uso y el consumo total de energía esperado por día en la finca.

La generación se verá afectada por el rendimiento del todo el conjunto de elementos que la componen, por lo cual se debe tener en cuenta las pérdidas que esta pueda presentar para poder abastecer toda la demanda instalada. Sería aplicar un factor de seguridad del 20% sobre de la demanda instalada, para determinar la demanda diaria máxima de energía se utiliza la Ecuación 25.

Reemplazando se tiene que:

$$D_{máxd} = (1.2) * (4424.83) = 5309.794 \text{ Wh}$$

4.8.3 Cálculo del Número de Paneles

Se calculó la potencia máxima de carga que debe ser suministrada por los paneles solares para satisfacer la demanda energética diaria de la instalación durante las horas solares pico. Este cálculo se realiza utilizando la Ecuación 27.

Reemplazando se tiene lo siguiente:

$$P_{Req} = \frac{5309.794 \text{ Wh}}{5 \text{ h}} = 1061.95 \text{ W}$$

De esta manera, la potencia requerida del conjunto de paneles solares se determinó en 1061.95 W. Este valor es esencial para seleccionar el panel solar adecuado, considerando tanto su disponibilidad comercial como sus características técnicas.

El panel seleccionado fue el Panel Solar 550W 24V Monocristalino JA SOLAR, el cual cuenta con las siguientes características:

Tabla 11

Especificaciones técnicas del panel solar

Aspecto	Especificación
Nombre	Panel Solar 550W 24V Monocristalino JA SOLAR
Precio	\$718.523 (Exento de IVA)
Potencia	545W
Voltaje de Trabajo	24V
Tipo de Célula	Monocristalina
Eficiencia del Módulo	21.1%

Nota. Especificaciones técnicas del panel solar seleccionado para el sistema fotovoltaico de la finca La Riña. Los datos incluyen información sobre la capacidad de generación, dimensiones, eficiencia y características de la célula del módulo.

Una vez seleccionado el panel, se procederá a calcular el número total de paneles necesarios y su configuración óptima para garantizar que la instalación pueda cubrir la demanda energética proyectada mediante la Ecuación 28.

Reemplazando se tiene:

$$\#paneles \geq \frac{1061.95 \text{ W}}{550 \text{ W}}$$

$$\#paneles \geq 1.93$$

El número de paneles que se necesitarán para la instalación será de 2

$$\#paneles = 2$$

4.8.4 Cálculo de la capacidad de las Baterías

Para esta instalación, se ha diseñado un sistema con una autonomía de 1 día y una batería AGM, la cual posee una profundidad de descarga del 50%, para determinar la capacidad requerida del sistema para las baterías se utiliza la Ecuación 29.

Reemplazando se tiene:

$$C_{baterias} = \frac{5309.794 \text{ Wh} * 1}{0.5 * 24 \text{ V}} = 442.483 \text{ Ah}$$

La batería seleccionada fue la Batería AGM 12V 250Ah Tensite, la cual cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 12

Especificaciones de la batería seleccionada

Aspecto	Especificación
Nombre	Batería de GEL 12V 300Ah Tensite
Precio	\$2.104.553 (Sin IVA)
Voltaje de la Batería	12V
Capacidad (Amperios-Hora)	300 Ah
Energía Útil Almacenada	50%

Nota. Especificaciones de la batería de GEL seleccionada para el sistema de almacenamiento de energía en la finca La Riña.

4.8.5 Cálculo de la corriente del controlador

La corriente que debe manejar el controlador se determina utilizando la Ecuación.

Reemplazando se tiene:

$$I_{\text{Controlador}} = \frac{550 \text{ W}}{24 \text{ V}} * 1.25 = 28.65 \text{ A}$$

El controlador seleccionado fue el Controlador Carga MPPT 30A ML2430 12/24V LCD SRNE, el cual cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 13

Especificaciones técnicas del controlador seleccionado

Aspecto	Especificación
Nombre	Controlador Carga MPPT 30A ML2430 12/24V LCD SRNE
Precio	\$469.763 (Exento de IVA)
Voltaje de Trabajo	12V / 24V
Amperios Máximos de Carga	30A
Salida de Consumo en DC	12V o 24V, dependiendo de la batería

Nota. Especificaciones técnicas del controlador de carga MPPT seleccionado para el sistema fotovoltaico de la finca La Riña.

Con una capacidad de manejo de corriente de hasta 30 amperios (A), este controlador es capaz de gestionar la corriente calculada de 28.65 A, que es la máxima generada por el conjunto de paneles solares.

Este controlador es compatible con sistemas de 12V y 24V, lo que lo hace adecuado para la configuración específica de la instalación, donde se requiere un voltaje de 24V.

4.8.6 Selección del inversor

Para este sistema específico, el inversor debe ser capaz de manejar un voltaje de trabajo de 24V, acorde con la configuración del banco de baterías y la salida del panel solar.

El inversor seleccionado fue el Inversor MultiPlus 24V 3000VA, el cual cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 14

Especificaciones Técnicas del inversor seleccionado

Aspecto	Especificación
Nombre	Inversor MultiPlus 24V 3000VA 70-50 120V VE. Bus (UL) Victron Energy
Precio	\$4.893.939 (Exento de IVA)
Voltaje de Trabajo	24V

Nota. Especificaciones técnicas del inversor seleccionado para el sistema fotovoltaico de la finca La Riña.

4.9 Selección de Componentes

4.9.1 Sensor de nivel para el reservorio

Hemos seleccionado el sensor capacitivo de proximidad LJC18A3-B-Z/BX para proteger la bomba sumergible, ya que detecta objetos no metálicos, como líquidos, siendo ideal para monitorear el nivel de agua y prevenir la succión en seco. Su rango de detección ajustable de 5 a 10 mm permite una instalación flexible y garantiza una detección precisa. Con un costo entre \$40.000 y \$80.000 COP, es una opción económica y eficiente que asegura calidad y funcionalidad en el sistema.

4.9.2 Sensor de nivel para el tanque

El DPL-1-BK es un sensor impresionante que destaca por su sencillez y eficiencia. Su diseño compacto y robusto lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de medición de nivel de agua, especialmente en entornos donde la durabilidad es esencial. Una de las maravillas de este sensor es su capacidad para proporcionar mediciones precisas sin necesidad de complicadas calibraciones. Su bajo costo lo convierte en una opción accesible, lo que significa que se puede implementar en múltiples proyectos sin afectar significativamente el presupuesto.

4.9.3 Sensor de temperatura

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que destaca por su precisión y facilidad de integración. Funciona en un rango de -55°C a 125°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Su salida digital utiliza el protocolo 1-Wire, lo que permite conectar múltiples sensores en un solo bus de datos, simplificando la instalación en grandes áreas de cultivo. Además, su costo es relativamente bajo, lo que lo convierte en una opción popular en aplicaciones agrícolas y de riego automatizado.

4.9.4 Sensor de humedad relativa

El DHT22 es un sensor combinado de temperatura y humedad que ofrece una buena relación costo-beneficio. Mide la humedad relativa en un rango del 0% al 100% con una precisión de $\pm 2\%$, lo que es crucial para ajustar el riego según las condiciones atmosféricas. Su capacidad para medir tanto temperatura como humedad lo hace versátil, permitiendo que un solo sensor cubra múltiples necesidades de monitoreo. Es fácil de integrar en sistemas de microcontroladores y su costo oscila entre \$20.000 y \$40.000 COP, lo que lo hace accesible para la mayoría de las aplicaciones de riego.

4.9.5 Sensor de radiación solar

El Apogee SP-110 es un piranómetro diseñado para medir la radiación solar, un factor clave en la evapotranspiración y, por ende, en las necesidades hídricas de las plantas. Este sensor es altamente preciso, con un rango de medición de 0 a 2000 W/m² y una precisión del $\pm 5\%$. Aunque es más costoso que otros sensores, con un precio entre \$600.000 y \$800.000 COP, su durabilidad y precisión lo hacen una inversión valiosa para un sistema de riego automatizado que busca maximizar la eficiencia del uso del agua.

4.9.6 Sensor de velocidad del viento

El Davis 6410 es un anemómetro que mide la velocidad del viento, un factor que influye en la tasa de evaporación del agua. Con un rango de medición de 1 a 78 m/s y una precisión de ± 0.5 m/s, es capaz de proporcionar datos confiables que pueden ser utilizados para ajustar el riego en función de las condiciones climáticas. Este sensor es popular en estaciones meteorológicas y aplicaciones agrícolas debido a su fiabilidad y coste razonable, que varía entre \$250.000 y \$400.000 COP.

4.9.7 Sensor de humedad

El Capacitivo YL-69 es un sensor de humedad del suelo simple y económico, ideal para aplicaciones de riego básico. Mide el contenido de agua en el suelo a través de cambios en la capacitancia, proporcionando una salida analógica que puede ser interpretada fácilmente por un microcontrolador. Aunque su precisión es menor comparada con sensores más avanzados, su bajo costo, entre \$10.00 y \$20.000 COP, lo hace una opción atractiva para monitoreo general en sistemas de riego, especialmente en escenarios donde se requiere un gran número de sensores para cubrir extensas áreas de cultivo.

4.9.8 Módulo de relé electromagnético

El módulo de relé electromagnético de 4 canales es ideal para un sistema de riego automatizado debido a su capacidad para controlar múltiples zonas y su compatibilidad con 24VDC, lo que es crucial para operar válvulas y bombas. Además, ofrece una excelente relación costo-beneficio, con un precio competitivo y una alta capacidad de corriente (10A), asegurando la eficiencia y expansión del sistema de riego, siendo la opción más completa para un proyecto predictivo de bajo costo.

4.9.9 Temporizador

El Temporizador Digital Programable KG316T complementa el módulo de relé de 4 canales, automatizando el control de válvulas y bombas para una gestión eficiente del riego. Con un rango de voltaje de 12V a 24V y capacidad para soportar hasta 16A, es compatible con el sistema. Ofrece 17 programas ON/OFF diarios o semanales, permitiendo ajustar los tiempos de riego según las necesidades. Su pantalla LCD facilita la programación y su batería interna garantiza que los ajustes se conserven durante cortes de energía. Además, cuenta con modos manual y automático para activar el riego según se requiera.

4.9.10 Microcontrolador

El MSPEXP430G es ideal para sistemas de riego automatizado, ya que ofrece suficiente número de pines de entrada/salida y canales analógicos para controlar sensores y actuadores como bombas o válvulas. Su bajo consumo de energía asegura una operación eficiente, minimizando el impacto en sistemas de alimentación con baterías o paneles solares. Aunque su voltaje de operación es inferior al rango de 3.3V a 5V solicitado, es posible integrarlo con reguladores de voltaje.

4.9.11 Pantalla de visualización

La pantalla seleccionada fue la Nextion NX4024T032 como la mejor opción para el sistema de riego automatizado. Ofrece una pantalla táctil de 3.2 pulgadas, fácil de programar gracias a su editor gráfico, lo que simplifica el diseño de interfaces. Además, utiliza el protocolo UART (TTL), compatible con el microcontrolador MSPEXP430G que seleccionamos anteriormente. Su bajo consumo energético de 85mA y precio accesible (entre 120,000 y 140,000 COP) la hacen ideal para el proyecto.

4.9.12 Electroválvulas

Las electroválvulas son componentes electromecánicos que controlan el flujo de agua en sistemas de riego automatizados mediante un solenoide activado eléctricamente. Son ideales para integrarse con controladores y sensores, permitiendo un uso eficiente del agua.

En nuestro proyecto, utilizaremos la válvula solenoide IR-110-N-2W, de 74 mm de diámetro, por su precisión y confiabilidad en sistemas de riego medianos o grandes. Funciona a 24V y se integra fácilmente con el microcontrolador MSPEXP430G, activándose solo cuando es necesario para evitar el desperdicio de agua. Su diseño resistente garantiza durabilidad en condiciones adversas.

Para la tubería primaria de 25 mm, usaremos la válvula Rain Bird 100-DV de 1 pulgada, también controlada a 24V. Compatible con el microcontrolador, es una opción más económica y versátil. Ambas válvulas son normalmente cerradas y están diseñadas para un flujo eficiente y bajo consumo energético, con materiales resistentes a la corrosión, asegurando su durabilidad y funcionamiento confiable.

4.9.13 Cableado de sensores y electroválvulas

Utilizaremos diferentes tipos de cables según las necesidades de cada componente. Para la pantalla HMI Nextion y los sensores, emplearemos un cable de señal trenzado de 24-26 AWG de cobre con aislamiento de PVC y, opcionalmente, apantallado para evitar interferencias. Las electroválvulas IR-110-N-2W, que operan a 24V, requerirán cables de alimentación de 16-18 AWG, también de cobre trenzado y con aislamiento resistente a la intemperie.

Para la fuente de alimentación y conexiones de potencia, se usarán cables de 16-18 AWG, asegurando una corriente estable. Las conexiones de tierra se realizarán con cables de 16-18 AWG de cobre y aislamiento adecuado para protección. Estos cables garantizan la durabilidad y el correcto funcionamiento del sistema de riego.

4.9.14 Medidor de flujo

El MAG5100W se destaca por su excelente durabilidad gracias a su construcción en acero inoxidable y su clasificación IP68, lo que lo hace ideal para entornos de riego donde el equipo está expuesto a condiciones difíciles. Su compatibilidad con el protocolo Modbus y la salida de 4-20mA permite una fácil integración con sistemas automatizados, y su precisión del $\pm 0.5\%$ garantiza un monitoreo fiable del caudal. Además, su resistencia a la corrosión lo convierte en una opción más duradera que los modelos de plástico, sin superar el presupuesto de 150,000 COP.

4.9.15 Geomembrana

La geomembrana HDPE de GSE, con un espesor de 0.5 a 2 mm, es ideal para un reservorio subterráneo en entornos agrícolas, gracias a su excelente resistencia a perforaciones y productos químicos. Su alta durabilidad frente a rayos UV asegura una larga vida útil incluso en exposición solar. Aunque su costo oscila entre 10,000 y 18,000 COP por m², su robustez y eficiencia justifican

la inversión, proporcionando protección y durabilidad para sistemas de riego automatizados, resistiendo condiciones ambientales adversas y daños.

4.9.16 Selección de tubería

El uso de tuberías de PVC en líneas primarias y secundarias de sistemas de riego automatizados se debe a su alta resistencia a la presión, durabilidad y bajo costo de instalación y mantenimiento. El PVC es resistente a la corrosión y productos químicos, garantizando una larga vida útil en la conducción de grandes volúmenes de agua bajo presión. Su rigidez estructural mantiene la estabilidad de las líneas principales.

Por otro lado, las tuberías de polietileno (PE) son ideales para portlaterales y laterales debido a su flexibilidad, adaptándose fácilmente a terrenos irregulares. El PE, resistente a rayos UV y productos químicos, facilita la instalación, manipulación y reparación, reduciendo costos de mantenimiento. Además, su compatibilidad con diversos emisores de riego ofrece mayor versatilidad y eficiencia en el sistema. Esta combinación asegura un sistema duradero, eficiente y de fácil mantenimiento.

4.9.17 Válvula reguladora de presión

Fue seleccionada la Válvula Serie 75 de Netafim con un diámetro de ($\frac{3}{4}$ ") para mi sistema de riego por goteo debido a varias razones clave. En primer lugar, su construcción robusta y de alta calidad asegura una larga durabilidad, lo que la convierte en una opción confiable para aplicaciones agrícolas a gran escala. Además, la capacidad de regular la presión de manera precisa garantiza un suministro constante y adecuado de agua a los goteros, lo que es esencial para evitar problemas de sobrepresión que podrían dañar el sistema de riego o reducir su eficiencia.

4.9.18 Caudalímetro

El caudalímetro GPI TM Series de turbina mecánica es altamente económico en comparación con los modelos electromagnéticos y proporciona una buena precisión para el rango de caudal de 15 m³/h. Además, su material en PVC lo hace resistente a la corrosión, ideal para sistemas de riego donde se utiliza agua con químicos o en ambientes de exteriores. Su fácil instalación y mantenimiento lo convierten en una opción práctica y eficiente, manteniendo bajo el costo de operación del sistema de riego.

4.9.19 Válvula de pie

La válvula de pie Universal UPV-300 de PVC reforzado es altamente económica y tiene un rango de tamaños entre 1 y 4 pulgadas, adecuado para diversas configuraciones de sistemas de riego. Su construcción ligera y resistente a la corrosión la hace ideal para sistemas que operan en exteriores, además de ser fácil de mantener y reemplazar en caso de necesidad. La relación calidad-precio es excelente, ya que proporciona durabilidad y fiabilidad a un costo relativamente bajo.

4.9.20 Manómetro

El manómetro Wika 111.10, fabricado en acero inoxidable, es resistente a la corrosión, ideal para ambientes húmedos y exteriores típicos de los sistemas de riego. Con un rango de 0-10 bar, es adecuado para monitorear la presión en sistemas de bombeo estándar. Su precisión y fácil lectura garantizan un control confiable de la presión, evitando daños al equipo y asegurando un funcionamiento eficiente del sistema.

4.10 Rentabilidad económica

En una región como Valledupar, donde las tarifas de energía eléctrica han alcanzado aproximadamente 600 COP por kWh en los últimos años, la dependencia de la red eléctrica no solo es costosa, sino también poco confiable debido a las frecuentes interrupciones del servicio.

Estas fluctuaciones, sumadas a la distancia entre áreas rurales y urbanas, hacen que el acceso a la energía eléctrica sea cada vez más difícil y costoso.

En las zonas rurales alejadas de Valledupar, como la Finca La Riña, conectarse a la red eléctrica implica costos elevados de infraestructura, que pueden superar los 20 millones de COP para cubrir la instalación de postes, cables y transformadores. A esto se suman los gastos recurrentes por el consumo energético mensual, que puede representar una carga significativa para pequeños agricultores.

Además, el futuro no pinta mejor: las proyecciones indican que las tarifas de electricidad seguirán aumentando debido a la escasez de inversión en infraestructura y la creciente demanda energética en el país. Estas circunstancias hacen que la red eléctrica sea una opción financieramente insostenible a largo plazo.

Optar por un sistema de bombeo automatizado con energía solar fotovoltaica elimina los costos asociados a la conexión y uso de la red eléctrica. Desde el primer año, este sistema aprovecha la radiación solar de más de 5,2 horas pico diarias que recibe Valledupar, garantizando un suministro constante de energía sin gastos adicionales en electricidad o combustible. Esto significa que, después de la inversión inicial, el costo operativo del bombeo de agua es prácticamente cero.

La rentabilidad económica mide si un proyecto genera ganancias superiores a los costos. En un sistema de bombeo solar, se evalúa con criterios como el Valor Actual Neto (VAN), que indica si los ingresos futuros superan los costos iniciales; la Tasa Interna de Retorno (TIR), que compara la rentabilidad con la tasa de descuento; el plazo de recuperación (Payback), que muestra en cuánto tiempo se recupera la inversión; y la relación beneficio/costo (B/C) y el índice de

rentabilidad (IR), que reflejan la proporción de beneficios frente a los costos. Estos indicadores ayudan a determinar si el proyecto es financieramente viable y rentable a largo plazo.

4.10.1 Inversión

Para evaluar la viabilidad económica de un sistema de bombeo solar, es esencial analizar el costo de inversión inicial, que incluye la compra de equipos, instalación y gastos asociados. Este costo es crucial para estimar la rentabilidad futura del proyecto, considerando los ahorros en energía y beneficios a largo plazo. A continuación, se detallan los principales componentes que conforman esta inversión inicial.

4.10.2 Información de entrada

La tabla presenta los datos clave para analizar el sistema de bombeo solar. Se estima que los paneles generarán 1.550 kWh/año de autoconsumo, con un ahorro basado en una tarifa de \$856,76 por kWh. Los Gastos de Capital (CAPEX) suman \$53.015.878, cubriendo equipos, acondicionamiento eléctrico y otros elementos. Los Gastos Operativos (OPEX) incluyen solo el mantenimiento anual, estimado en un 4% del CAPEX. El sistema tiene una vida útil proyectada de 25 años y se aplica una tasa de descuento del 8%, ajustada según las expectativas del cliente.

Tabla 15

Especificaciones Técnicas del inversor seleccionado

Datos de entrada		
Vida útil del proyecto	25	años
Inversión inicial	\$	
	53.015.878	
Energía Autoconsumo (kWh/año)	1550	kWh/año
Tarifa de energía	\$ 856,76	COP/kWh
IPC	8,35%	
Impuesto de renta	37%	
Tiempo de deducción (máx. 50% inversión)	1	años

Valor de los activos depreciables	\$
	21.206.351
Tasa de depreciación anual	33,33%
Tiempo de depreciación	3 años
Tasa de descuento	8%
Tasa de crecimiento conservadora para el Diesel	5%

Nota. La tabla presenta los datos necesarios para determinar flujos de caja.

4.10.3 Estados financieros

En este proyecto se utilizó como estado financiero un flujo de caja, en el cual se proyectaron los ingresos y egresos anuales a lo largo de 25 años.

4.10.3.1 Egresos. En los egresos del flujo de caja se incluyen el suministro de materiales y equipo por \$40,954,253 y el montaje electromecánico por \$7,242,000, ambos en el Año 0. A partir del Año 1, se registran costos de mantenimiento anuales que comienzan en \$2,500,000 y aumentan ligeramente en los años siguientes de acuerdo con el IPC.

4.10.3.2 Ingresos. Los ingresos del flujo de caja incluyen el ahorro en la tarifa de energía eléctrica por la autogeneración y su variación anual, considerando la degradación de los paneles y un IPC del 8.35%. Además, la ley 1715 permitió deducir el 50% de la inversión inicial de la renta líquida gravable, junto con una depreciación acelerada de activos al 33.33%. En 2024, con una tasa de impuesto del 37%, se logró un ahorro de \$8.916.307 en el primer año. Los activos a depreciar, equivalentes al 40% de la inversión inicial (\$21.206.351), generaron un ahorro adicional de \$2.615.450 durante 3 años. También se incluyeron ahorros en mano de obra y costo de diésel, sumando \$19.416.191 en ingresos para el primer año y variando en los años posteriores.

Tabla 16

Degradación anual y proyección tarifa de energía

Año	% Degradación	Energía Autoconsumo (kWh/año)	Tarifa de energía CUV (\$/kWh)
1	97,5%	1511	\$ 857
2	97,0%	1502	\$ 928
3	96,4%	1494	\$ 1.006
4	95,9%	1485	\$ 1.090
5	95,3%	1477	\$ 1.181
6	94,8%	1468	\$ 1.279
7	94,2%	1460	\$ 1.386
8	93,7%	1451	\$ 1.502
9	93,1%	1443	\$ 1.627
10	92,6%	1434	\$ 1.763
11	92,0%	1426	\$ 1.911
12	91,5%	1417	\$ 2.070
13	90,9%	1409	\$ 2.243
14	90,4%	1400	\$ 2.430
15	89,8%	1392	\$ 2.633
16	89,3%	1383	\$ 2.853
17	88,7%	1375	\$ 3.091
18	88,2%	1366	\$ 3.349
19	87,6%	1358	\$ 3.629
20	87,1%	1349	\$ 3.932
21	86,5%	1340	\$ 4.260
22	86,0%	1332	\$ 4.616
23	85,4%	1323	\$ 5.001
24	84,9%	1315	\$ 5.419
25	84,3%	1306	\$ 5.872

Nota. En el primer año de se aplica una degradación de 2,5% para los paneles solares y para los siguientes años una degradación lineal de 0,5%.

4.10.4 Flujos de caja

Los flujos de caja reflejan los ingresos y egresos proyectados a lo largo del tiempo, permitiéndome visualizar el movimiento de dinero en el proyecto. Con ellos pude calcular el balance entre lo que entra y lo que sale en cada año, ayudándome a entender si el proyecto es rentable y sostenible en el tiempo.

Luego de tener los flujos de caja, analicé los resultados para evaluar la rentabilidad, calcular el retorno de inversión y determinar cuándo se recuperará el capital.

4.10.5 Análisis de la inversión

Tabla 17

Indicadores y criterios financieros

Indicador	Criterio		Valor	Aplicando el criterio
Valor actual neto (VAN)	$VAN > 0$	Acepta	\$	
	$VAN = 0$	Indiferente	55.255.35	Acepta
	$VAN < 0$	Rechaza	5	
Tasa interna de retorno (TIR)	$TIR > K$	Acepta		
	$TIR = K$	Indiferente	20%	Acepta
	$TIR < K$	Rechaza		
Plazo de recuperación (PAYBACK)	Payback descontado \leq Tiempo de retorno esperado por el inversionista	Acepta		
	Payback descontado $>$ Tiempo de retorno esperado por el inversionista	Rechaza	7,30	Acepta
Relación beneficio costo	$B/C > 1$	Acepta		
	$B/C = 1$	Indiferente	1,90	Acepta
	$B/C < 1$	Rechaza		
Índice de rentabilidad	$IR > 1$	Acepta		
	$IR = 0$	Indiferente	1,04	Acepta
	$IR < 0$	Rechaza		

Nota. La tabla presenta los criterios a considerar para determinar si cada indicador es aceptable, indiferente o rechazado. Teniendo en cuenta un tiempo de retorno esperado por el inversionista de 10 años.

Con base en la tabla proporcionada, se pueden sacar varias conclusiones sobre la viabilidad del sistema de bombeo y riego automatizado con paneles solares desde un punto de vista financiero:

Valor Actual Neto (VAN): El VAN es positivo (\$55.255.355), lo que indica que el proyecto generará más beneficios de los que costará, y, por lo tanto, es económicamente viable. El criterio de aceptación se cumple, lo que significa que los flujos de caja descontados superan la inversión inicial.

Tasa Interna de Retorno (TIR): La TIR del 20% es mayor que la tasa de descuento esperada por los inversores (K), lo cual también es favorable. Esto significa que el retorno del proyecto es superior al rendimiento mínimo requerido, cumpliendo con el criterio de aceptación. El proyecto es atractivo desde la perspectiva de la rentabilidad.

Plazo de Recuperación (Payback): es de 7,3 años, lo que cumple con el criterio de aceptación, ya que el proyecto recuperará su inversión dentro del tiempo esperado por los inversores. Este es un aspecto positivo, ya que el inversor no tendría que esperar demasiado tiempo para comenzar a ver ganancias netas.

Relación Beneficio/Costo (B/C): es de 1,90, lo que significa que, por cada unidad monetaria invertida, se obtienen 1,9 unidades de retorno. Al ser mayor a 1, el criterio se cumple y el proyecto es rentable. La inversión genera suficientes beneficios en relación con sus costos.

Índice de Rentabilidad (IR): es 1,04, lo que indica que el proyecto generará beneficios mayores al costo de la inversión inicial. Al ser mayor a 1, el criterio se cumple, lo cual refuerza la viabilidad económica del sistema.

La implementación de un sistema de bombeo automatizado con energía solar fotovoltaica no solo asegura la independencia energética y sostenibilidad, sino que también garantiza una recuperación de la inversión en tan solo 7 años. Este periodo, cuidadosamente calculado, se debe a la combinación perfecta entre los ahorros generados y la longevidad de los equipos, asegurando que en menos de una década la finca estará operando con costos prácticamente nulos en energía.

¿Por qué 7 años y no menos? Este periodo de retorno está diseñado para maximizar el balance entre inversión inicial, ahorro operativo y la vida útil de los paneles solares, que fácilmente superan los 25 años. Durante estos primeros 7 años, la finca experimentará ahorros significativos al eliminar los gastos de electricidad, los cuales, en una zona como Valledupar, pueden superar fácilmente los 600 COP por kWh, con aumentos proyectados en los próximos años. Al mismo tiempo, el sistema requerirá mantenimiento mínimo, lo que permite que todos los ahorros se destinen directamente a amortizar la inversión inicial.

Una inversión segura y estratégica en comparación con otras opciones, 7 años es un período relativamente corto, considerando que desde el primer año empezarás a notar una reducción drástica en tus costos operativos. Este plazo es clave para asegurar que el sistema se mantenga operativo sin riesgos financieros ni gastos ocultos. En lugar de depender de una red eléctrica costosa y poco confiable, tu finca será autosuficiente y, una vez recuperada la inversión, todo lo que ahorres será ganancia pura.

Rentabilidad asegurada a largo plazo tras estos 7 años, el sistema fotovoltaico seguirá operando durante al menos dos décadas más sin costos significativos, lo que se traduce en un aumento sustancial en la rentabilidad de tu finca. Además, el hecho de que no dependes de las tarifas eléctricas o de costosas conexiones a la red en zonas rurales, refuerza aún más la lógica de esta inversión.

4.10.5.1 Conclusión general. El proyecto de bombeo y riego automatizado con paneles solares se presenta como una inversión rentable. Indicadores como VAN, TIR, Payback, relación B/C y el índice de rentabilidad demuestran que generará beneficios significativos y cumplirá con las expectativas de retorno. Desde un enfoque financiero, avanzar con este sistema basado en energía solar es una decisión acertada.

6. Conclusiones

- El análisis realizado demuestra que la implementación de un sistema de bombeo automático basado en energía solar en la finca "La Riña" es viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. Con una demanda energética diaria máxima de 4.32 kWh y una capacidad de almacenamiento de agua que cubre las necesidades de riego, el proyecto ofrece una solución eficiente y sostenible para la finca.
- El uso de energía solar fotovoltaica en lugar de fuentes convencionales de energía podría generar un ahorro de hasta un 30% en los costos operativos relacionados con el consumo de electricidad, favoreciendo la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.
- Se ha diseñado un sistema de riego optimizado para un área de cultivo de 3,154.12 m², con un caudal requerido de 2.52 L/s, lo que garantiza la distribución adecuada del agua en el cultivo de pasto elefante. Este sistema también permite ajustar el riego según las condiciones del suelo, mejorando la gestión hídrica.
- Un aspecto relevante es el impacto social que estas soluciones generan en zonas rurales como la finca La Riña. La disponibilidad de energía limpia para operar sistemas de bombeo y riego mejora la productividad agrícola y la calidad de vida de los habitantes. Además, el proyecto sirve como modelo replicable para otras fincas rurales en Colombia con problemas de acceso a energía, promoviendo un desarrollo agrícola sostenible en áreas no interconectadas y fomentando la autonomía energética y la preservación del entorno natural.

7. Trabajos futuros

- Realizar una prueba piloto del sistema en la finca "La Riña" para validar los cálculos teóricos y ajustar los parámetros de riego, consumo energético y eficiencia de los paneles solares. Esta implementación en pequeña escala permitirá obtener datos reales para evaluar el rendimiento del sistema y su adaptabilidad a condiciones cambiantes.
- Desarrollar un análisis económico a largo plazo que incluya escenarios de crecimiento de la finca y aumento de la demanda hídrica. Evaluar cómo la ampliación del área de cultivo o la inclusión de nuevos cultivos puede impactar la viabilidad del sistema de bombeo solar.
- Explorar nuevas tecnologías y materiales para mejorar la durabilidad y eficiencia de los paneles solares, bombas y sistemas de almacenamiento de agua. Investigar alternativas para componentes más resistentes a la intemperie y de menor costo, para garantizar una mayor vida útil del sistema en zonas rurales.

Referencias Bibliográficas

- Azud. (2022). *Azud Helix System: Solución eficiente y sostenible para la protección de sistemas de riego*. https://azud.com/wp-content/uploads/2022/09/AZUD_HELIX_SYSTEM-ESP-1.pdf.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils (15th ed.)*. Pearson.
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). (2001). *Documento de Trabajo y Participación Ciudadana*. https://www.cra.gov.co/sites/default/files/marco-legal/2017-11/Documento_de_Trabajo_y_Participacion_Ciudadana_750.pdf.
- DAB Pumps. (2015). *Electronic centrifugal pumps technical catalogue*. https://www.dabpumps.com/sites/default/files/catalogs/05_60171421_Ed_04%2015_ELECTRINIC%20CENTRIFUGAL%20PUMPS_TC_ENG.pdf.
- Congreso de la República de Colombia (1979). Ley 11 del 5 de marzo de 1979 “Por la cual se reconoce la profesión de bibliotecólogo y se reglamenta su ejercicio”. Bogotá: El Congreso
- FAO. (2015). *Soil management manual*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (pp. 255-293). SSSA.
- Hillel, D. (2013). *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press.
- Homecenter. (s.f.). Tanque de agua 2,000 litros. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/31653/tanque-2000-litros/31653>.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1987). *Estudio general de suelos del departamento del Cesar*.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2016). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Miller, R. W., & Gardiner, D. T. (2007). *Soils in our environment* (10th ed.). Prentice Hall.
- NASA. (s.f.). Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer. *NASA Langley Research Center*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- Petrel, C. (2021). *Sistema solar fotovoltaico como fuente de energía para la electrificación de viviendas rurales*.
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18523/7/PetrelCristian_2021_SistemaSolarFotovoltaico.pdf.
- Plataforma Extensión. (2020). *Manual de riego*.
<https://www.plataformaextension.cl/archivos/2020/11/MANUAL-DE-RIEGO.pdf>.
- Proel Diving. (s.f.). Relación entre altitud y presión atmosférica.
<https://proeldiving.com/descargas/tablas/Equivalencia%20Altitud-Presion.pdf>.
- Proain. (s.f.). ¿Qué es el ensilaje y cuál es el proceso de elaboración?
<https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/que-es-el-ensilaje-y-cual-es-el-proceso-de-elaboracion>.
- Richards, L. A. (2013). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Agriculture Handbook 60.
- Riego.mx. (2018). *Diseño hidráulico de tuberías con salidas múltiples mediante métodos numéricos*. IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII.
<https://www.riego.mx/congresos/comeii2018/assets/ponencias/extenso/18057.pdf>.

Rodríguez, F., Ruiz, C., & González, E. (2022). Adaptabilidad del pasto elefante en diferentes tipos de suelo. *International Journal of Agriculture*, 30(1), 87-94.

Saldarriaga, J. G. (1998). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.

Sánchez, A., & Vargas, P. (2016). Calidad del suelo y su impacto en la productividad del pasto elefante. *Soil Science Journal*, 19(1), 35-48.

Apéndices

Apéndice A. Relación entre altura y presión atmosférica

Altura sobre el nivel del mar (m)	Presión atmosférica (m)
0	10,33
250	10,03
500	9,73
750	9,43
1000	9,13
1250	8,83
1500	8,53
1750	8,25
2000	8

Nota. La tabla presenta los criterios a considerar para determinar si cada indicador es aceptable, indiferente o rechazado. Teniendo en cuenta un tiempo de retorno esperado por el inversionista de 10 años.

Apéndice B. Presión de vapor del agua en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Presión de vapor (KPa abs)	Peso específico (KN/m ³)	Carga de presión de vapor (m)
0	0,6105	9,806	0,06226
5	0,8722	9,807	0,08894
10	1,228	9,804	0,1253
20	2,338	9,789	0,2388
30	4,243	9,765	0,4345
40	7,376	9,731	0,758

50	12,33	9,69	1,272
60	19,92	9,642	2,066
70	31,16	9,589	3,25
80	47,34	9,53	4,967
90	70,1	9,467	7,405
100	101,3	9,399	10,78

Nota. Tabla adaptada de *Tabla de presión de vapor de agua líquida y hielo*. Recuperado de VaxaSoftware. La tabla muestra la relación entre la temperatura, la presión de vapor, el peso específico y la carga de presión de vapor del agua, aspectos fundamentales para el cálculo de sistemas térmicos y termodinámicos en ingeniería.

Apéndice C. Relación entre altura y presión atmosférica

Formula	K	m	n
Darcy-Weisbach	$0.0826 * f_{DW}$	2	5
Hazen-Williams	$10.648 * \left(\frac{1}{C_{HW}}\right)^{1.852}$	1.852	4.871
Manning	$10.3 * n^2$	2	5.333
Scobey	$0.004098 * K_s$	1.9	4.9

Nota. Tabla adaptada de Riego.mx. (2018). *Fórmulas para calcular la pérdida de carga por fricción*. La tabla presenta diferentes fórmulas y coeficientes utilizados para calcular la pérdida de carga en sistemas hidráulicos.

Apéndice D. Contenido de agua a CC y PMP en distintas clases texturales

Clase de textura	CC (%)	PMP (%)
Arcilla	23-46	13-29
Franco arcillosa	18-23	9-10
Franca	12-18	4-11
Franco arenosa	8-13	4-6
Arena	5-7	1-3

Nota: Adaptado de Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua (Universidad de Chile, 2015).

Apéndice E. Radiación solar y ángulo óptimo de inclinación por mes

MES	0°	-4.32°	10.68°	25.68°	90°	RADIACIÓN SOLAR OPTIMA	ANGULO OPTIMO DE SUPERFICIE
ENE	5.54	5.28	6.03	6.45	4.29	6.45	33.5
FEB	5.87	5.7	6.18	6.34	3.47	6.34	21.5
MAR	5.51	5.44	5.58	5.45	2.32	5.58	8
ABR	5.05	5.05	4.98	4.69	1.7	5.05	-4.5
MAY	4.95	4.93	4.75	4.36	1.71	4.95	-11
JUN	5.26	5.37	5.03	4.53	1.71	5.37	-15.5

JUL	5.41	5.47	5.2	4.68	1.7	5.51	-15.5
AGO	5.28	5.3	5.16	4.78	1.73	5.3	-8
SEP	5.12	5.09	5.12	4.91	1.98	5.13	1
OCT	4.73	4.65	4.84	4.8	2.47	4.85	13
NOV	4.62	4.48	4.86	5.01	3.05	5.01	23.5
DIC	5.11	4.87	5.58	5.98	4.11	6.07	34
PROM	5.204	5.136	5.276	5.165	2.52	5.4675	6.67

Nota. Valores de radiación solar óptima (kWh/m²) y ángulo óptimo de inclinación de superficie (grados) para cada mes del año en la finca La Riña. Los valores se calculan para diferentes ángulos de inclinación de superficie, desde 0° (horizontal) hasta 90° (vertical), y representan la orientación óptima para maximizar la captación de energía solar.

Apéndice F. Especificaciones del panel solar

Demanda máxima	5309,794 Wh
Potencia requerida	1061,959 W
Potencia del panel	550 W
Voltaje del sistema	24 V
Número de paneles	2
Capacidad de baterías	442,483 Ah
Corriente controlador	28.64 A

