

Caracterización Energética de Consumos y Posibles Fuentes de la Finca San José de Nazareth en
el Municipio de Palmar Santander

Eduardo Santos Zambrano

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jabid Eduardo Quiroga Mendez

PhD. En Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mi familia, por su amor incondicional, su paciencia infinita y los sacrificios realizados para apoyar mi formación profesional. Este logro es un reflejo de su constante aliento y respaldo.

A mi director de proyecto, Ingeniero Jabid Eduardo Quiroga por su invaluable orientación metodológica y la confianza depositada en mis capacidades. Su guía fue fundamental para dar dirección y alcance a esta investigación.

A mi pareja, por su apoyo incondicional, su comprensión y por ser la fuerza motivadora en los momentos de mayor desafío durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad industrial de Santander y al honorable cuerpo de docentes del programa de Ingeniería Mecánica, por impartir el conocimiento y fomentar el pensamiento crítico que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que, con su apoyo y colaboración, contribuyeron significativamente a la realización y culminación de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi director de proyecto, Ingeniero Jabid Eduardo Quiroga, por su invaluable dirección. Sus conocimientos, oportunas correcciones y lectura crítica del documento fueron fundamentales para dar forma y solidez a esta investigación.

A la Universidad industrial de Santander, mi alma máter, y en especial al programa de Ingeniería Mecánica, por proveer la infraestructura, los recursos bibliográficos y el entorno académico que fomentaron mi desarrollo profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia y a mi pareja por su paciencia, aliento y apoyo incondicional. Su respaldo emocional fue el soporte indispensable para superar los desafíos que implicó la realización de esta tesis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Revisión Literaria.....	16
3.1 Zonas rurales no interconectadas (ZNI).....	16
3.2 Caracterización energética rural	17
3.3 Energía solar fotovoltaica	17
3.4 Energía eólica.....	18
3.5 Energía a partir de biomasa.....	18
3.6 Consumo energético en ganadería extensiva	19
4. Metodología	19
4.1 Diagnóstico energético.....	19
4.1.1 Subsistema de bombeo.....	20
4.1.2 Subsistema de cercado eléctrico	20
4.1.3 Subsistema de iluminación	20
4.2 Diseño de la energía renovable a implementar	21
4.2.1 Recurso solar de la región.....	21
4.2.2 Sistema fotovoltaico.....	21
4.3 Comparación y análisis de costos para la implementación del sistema.....	22
5. Diagnostico Energético	22

5.1 El Sistema de Bombeo de Agua: El Proceso de Mayor Demanda Potencial.....	22
5.2 Sistema de cercado eléctrico: La carga base de la operación.	24
5.3 Sistema de iluminación.	25
6. Calculo energía necesaria.	26
6.1 Sistema de cercado eléctrico: Para gestión de pastoreo rotacional.....	27
6.1.1 Cálculo cercado aproximado.....	27
6.1.2 Cálculo energizador.	29
6.1.3 Cálculo del consumo de energía diario.....	31
6.1.4 Sugerencia de instalación de cercado.	31
6.1.5 Panel solar.....	32
6.2 Sistema de bombeo de agua: suministro hídrico de ganado y el riego de pasturas.	33
6.2.1 Determinación de los Requerimientos Hídricos	33
6.2.2 Determinación de la Cabeza Dinámica Total (TDH) con Datos Topográficos Precisos.....	34
6.2.3 Caudal del diseño (Q).	36
6.2.4 Cálculo de Potencia y Selección de la Bomba Final.....	37
6.3 Sistema de iluminación: Para la seguridad y operatividad nocturna en corrales.....	42
6.3.1 Justificación y Requerimientos Lumínicos.....	42
6.3.2 Parámetros de cálculo.	43
6.3.3 Memoria de Cálculo del Consumo Energético.	44
6.4 Selección del Generador Solar Fotovoltaico.....	44
6.4.1 Determinación del Recurso Solar Disponible.....	44
6.4.2 Cálculo de la Potencia Fotovoltaica Requerida (Potencia Pico).....	45
6.4.3 Selección de la Tecnología y Número de Paneles	46

7. Costos y beneficios de las energías alternativas propuestas	47
7.1 Subsistema suministro energía (sistema fotovoltaico).....	48
7.1.1. Subsistema de Bombeo de Agua.....	48
7.1.2. Subsistema de cercado eléctrico	49
7.1.3. Subsistema de iluminación	49
7.1.4. Consolidación del CAPEX Total del Proyecto (total gastos capitales)	50
7.2. Análisis Comparativo con Otras Fuentes de Energía Renovable.	51
7.2.1. Análisis energía Solar Fotovoltaica	51
7.2.2. Análisis energía eólica	52
7.2.3. Análisis energía hidráulica.....	52
8. Conclusiones	53
9. Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Sumatoria de perímetros para el cálculo de alambre requerido.</i>	29
Tabla 2. <i>Costo del subsistema de suministro de energía.</i>	48
Tabla 3. <i>Costo subsistema de bombeo de agua.</i>	48
Tabla 4. <i>Presupuesto para la instalación de 3,450 m de cerca.</i>	49
Tabla 5. <i>Costo de los materiales de iluminación</i>	50
Tabla 6. <i>Consolidades de los gastos capitales.</i>	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa de división de áreas, Finca San José de Nazareth.</i>	27
Figura 2. <i>Localización del cercado perimetral de toda el área de la finca</i>	28
Figura 3. <i>Localización del cercado perimetral de cada potrero de la finca.</i>	28
Figura 4. <i>Speedrite 3000 Unigizer - Technical Specifications and User Manual</i>	30
Figura 5. <i>Sugerencia del espacio entre los alambres y postes, Datamars, p.06.</i>	32
Figura 6. <i>Sugerencia del espacio entre los alambres y postes, Datamars, p.09.</i>	33
Figura 7. <i>Pendiente, longitud del punto de extracción al punto más alto de la finca.</i>	34
Figura 8. <i>Curva de rendimiento típica para una bomba sumergible multietapa. Fuente: Adaptado de Grundfos Holding A/S (2024).</i>	39
Figura 9. <i>Bomba Grundfos SP 17-14 N.º 12a00014</i>	39
Figura 10. <i>Curva de Rendimiento de la Bomba Seleccionada (Grundfos SP 17-14) y Punto de Operación del Sistema.</i>	40
Figura 11. <i>Curvas de Rendimiento del Motor Eléctrico Sumergible (Grundfos MS4000, 5.5 kW). Fuente: Adaptado de Grundfos Holding A/S (2024).</i>	41

Glosario

Biodigestor: Sistema cerrado que descompone materia orgánica (como el estiércol del ganado) en ausencia de oxígeno para producir biogás (combustible) y fertilizante.

CAPEX: Abreviatura inglesa para "Gasto de Capital". Es la inversión inicial y única que se realiza para adquirir e instalar todos los activos del proyecto (paneles, bomba, cercas, etc.). Es el "precio de compra" de todo el sistema.

Célula Fotovoltaica: Componente fundamental de un panel solar. Es el dispositivo semiconductor que convierte la luz solar directamente en electricidad de corriente continua (DC).

Degradación: Pérdida gradual y natural de la capacidad de un panel solar para producir energía a lo largo de su vida útil, usualmente expresada como un pequeño porcentaje anual.

Energizador (o Impulsor): Es el corazón de la cerca eléctrica. Es el aparato que convierte la energía de bajo voltaje (de las baterías) en pulsos cortos de alto voltaje que se envían a través del alambre.

Fotovoltaico: Relativo al efecto fotovoltaico, que es el proceso de generación de una corriente eléctrica en un material al ser expuesto a la luz.

Horas Sol Pico (HSP): Es la unidad que mide el recurso solar de un lugar. Representa el número de horas equivalentes al día en que la irradiancia solar alcanzaría su valor máximo estándar.

Monocristalino: Tipo de célula fotovoltaica fabricada a partir de un único cristal de silicio de alta pureza. Estos paneles son reconocibles por su color negro uniforme y su alta eficiencia.

MPPT (Maximum Power Point Tracking): Seguimiento del Punto de Máxima Potencia. Es una tecnología inteligente utilizada en los controladores de carga que ajusta constantemente los

parámetros eléctricos para extraer la máxima potencia posible de los paneles solares en todo momento.

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Es la normativa de obligatorio cumplimiento en Colombia que establece los requisitos de seguridad que deben cumplir las instalaciones eléctricas.

TDH (Cabeza Dinámica Total): Es el "esfuerzo total" que una bomba debe vencer para mover agua. Se mide en metros y es la suma de la altura vertical (altura estática) y las pérdidas de energía por la fricción en la tubería.

Tier 1: Clasificación utilizada en la industria fotovoltaica para categorizar a los fabricantes de paneles solares según su bancabilidad, solidez financiera y nivel de automatización en su producción. Es un indicador de alta calidad y fiabilidad.

Trifásico: Sistema de producción y distribución de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud. Es utilizado para alimentar motores y equipos de alta potencia, como el de la bomba seleccionada.

Resumen

Título: Caracterización Energética de Consumos y Posibles Fuentes de la Finca San José de Nazareth en el Municipio de Palmar Santander*

Autor: Eduardo Santos Zambrano**

Palabras Clave: Electrificación rural, energía solar, bombeo fotovoltaico, ganadería sostenible.

Descripción: El presente proyecto de grado tiene como propósito la caracterización energética de la finca San José de Nazareth, ubicada en el municipio de Palmar, Santander, con el fin de identificar sus consumos energéticos actuales y futuros, y proponer una solución basada en fuentes de energía renovable que sea técnica, económica y ambientalmente viable. La finca, dedicada a la cría de ganado, no cuenta con conexión a la red eléctrica nacional, lo cual limita la implementación de tecnologías esenciales como cercas eléctricas, iluminación en áreas operativas y sistemas de bombeo de agua.

A través de un diagnóstico energético detallado, se estimó una demanda diaria de 15.5 kWh, distribuida principalmente entre iluminación, bombeo de agua y cercas. Se analizaron tres fuentes de energía renovable: solar fotovoltaica, eólica y biomasa, concluyendo que la energía solar es la alternativa más adecuada debido a la alta radiación solar de la región, su bajo mantenimiento y modularidad. Se propuso un sistema fotovoltaico autónomo.

El análisis económico demostró que la solución solar tiene un retorno de inversión del 22.7%, con un periodo de recuperación de 4.4 años y un ahorro acumulado superior a \$13 millones COP en comparación con un generador diésel. Se concluye que la implementación de energías renovables no solo es viable para la finca, sino que puede ser replicable en otras zonas rurales con condiciones similares.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Mendez. PhD. En Ingeniería Civil.

Abstract

Title: Energy Characterization of Consumption and Possible Sources of the San José de Nazareth Farm in the Municipality of Palmar Santander *

Author(s): Eduardo Santos Zambrano **

Key Words: Rural electrification, solar energy, photovoltaic pumping, sustainable livestock farming.

Description: The purpose of this degree project is the energy characterization of the San José de Nazareth farm, located in the municipality of Palmar, Santander, in order to identify its current and future energy consumption, and to propose a solution based on renewable energy sources that is technically, economically and environmentally viable. The cattle-raising farm does not have a connection to the national electricity grid, which limits the implementation of essential technologies such as electric fencing, lighting in operational areas and water pumping systems.

Through a detailed energy diagnosis, a daily demand of 15.5 kWh was estimated, mainly distributed between lighting, water pumping and fencing. Three renewable energy sources were analyzed: solar photovoltaic, wind and biomass, concluding that solar energy is the most suitable alternative due to the high solar radiation of the region, its low maintenance and modularity.

The economic analysis showed that the solar solution has a return on investment of 22.7%, with a payback period of 4.4 years and a cumulative savings of more than \$13 million COP compared to a diesel generator. It is concluded that the implementation of renewable energies is not only viable for the farm but can be replicated in other rural areas with similar conditions.

* Degree Work

** Faculty of Physicalmechanics. School of Mechanical Engineering. Mechanical engineering. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. PhD. In Civil Engineering.

Introducción

El acceso a la energía es un factor determinante para el desarrollo sostenible de cualquier territorio, especialmente en las zonas rurales donde la cobertura de redes eléctricas convencionales es limitada o inexistente. En Colombia, una proporción significativa de la población rural carece de un suministro energético continuo, confiable y ambientalmente sostenible. Esta carencia no solo limita las condiciones de vida de los habitantes, sino que también restringe el crecimiento productivo de las actividades agrícolas y ganaderas, fundamentales para la economía nacional (UPME, 2020).

En este contexto, la finca San José de Nazareth, ubicada en el municipio de Palmar, Santander, enfrenta desafíos energéticos que afectan directamente su capacidad operativa. La finca, con una extensión de 13.4 hectáreas y orientada a la cría de ganado para producción de carne, carece de conexión a la red eléctrica nacional. Esta condición impide la implementación de tecnologías fundamentales como cercas eléctricas, sistemas de riego automatizados e iluminación en zonas estratégicas, comprometiendo la eficiencia y productividad del sistema ganadero.

Ante esta situación, las fuentes de energía renovable representan una alternativa viable y sostenible para suplir las necesidades energéticas de la finca. Tecnologías como los sistemas fotovoltaicos, la energía eólica de pequeña escala o el aprovechamiento de biomasa, permiten generar electricidad de manera descentralizada, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a la mitigación del cambio climático (IRENA, 2021).

El presente proyecto de grado tiene como objetivo realizar una caracterización energética integral de la finca San José de Nazareth, incluyendo tanto los consumos actuales como las proyecciones futuras, con el fin de analizar alternativas tecnológicas basadas en energías

renovables que permitan suplir dichos requerimientos de manera eficiente, económica y ambientalmente responsable. Para lograr este propósito, se desarrollarán actividades de diagnóstico energético, análisis del potencial de fuentes renovables, y evaluación técnico-económica de las soluciones propuestas.

Esta investigación se enmarca en el enfoque de sostenibilidad energética para zonas rurales no interconectadas, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 7: “Energía asequible y no contaminante”, y el ODS 13: “Acción por el clima”, propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Llevar a cabo la caracterización energética de la finca San José de Nazareth, ubicada en el municipio de Palmar, Santander, y analizar fuentes alternativas de energía que puedan satisfacer de manera eficiente sus necesidades energéticas.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar un diagnóstico del consumo actual y proyectado de energía en la finca San José de Nazareth, identificando equipos, actividades y procesos que requieren energía, como cercas eléctricas, bombeo de agua e iluminación.

Calcular el total de energía necesaria para abastecer a 50 novillos en una finca de 13.4 hectáreas, considerando factores como la energía requerida para cercas eléctricas que subdividan los potreros, el bombeo de agua desde el río hasta el punto más alto de la finca, la instalación de puntos de rocío y de iluminación en los bebederos, comederos y corrales.

Comparar los costos y beneficios de las energías alternativas propuestas, evaluando tanto su impacto económico (instalación, operación, mantenimiento) como el impacto ambiental, con el fin de seleccionar la opción más eficiente y sostenibles para la finca.

3. Revisión Literaria

Una vez establecidos los fundamentos teóricos que rigen el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, los principios de la hidráulica para bombeo y las demandas energéticas características de la operación ganadera. Por lo tanto, en el presente capítulo se aborda el diagnóstico energético de la Finca San José de Nazareth, detallando el levantamiento de cargas y la cuantificación de la demanda eléctrica, lo cual constituye la base fundamental para el posterior diseño de la solución energética.

3.1 Zonas rurales no interconectadas (ZNI)

Colombia presenta una geografía compleja que dificulta la cobertura energética en muchas regiones, especialmente en zonas rurales y dispersas. Las Zonas No Interconectadas (ZNI) comprenden territorios donde no existe conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN), lo que genera desafíos importantes en términos de calidad de vida, desarrollo productivo y equidad territorial (UPME, 2020). En estas zonas, la energía suele obtenerse mediante fuentes no renovables como lo son las plantas diésel, trayendo para los ganaderos y agricultores altos costos de operación, mantenimiento y graves impactos ambientales.

Según el Ministerio de Minas y Energía (2021), más de 1,500,000 personas habitan en zonas no interconectadas, principalmente en la Amazonía, el Pacífico y regiones montañosas de la región andina. Esta población depende de esquemas energéticos limitados, intermitentes y costosos, lo que afecta tanto su bienestar como su capacidad de generar ingresos mediante actividades agrícolas, pecuarias y turísticas.

Bajo esta necesidad, el caso de la finca San José de Nazareth es representativo de este desafío, ya que enfrenta limitaciones operativas significativas derivadas de la falta de electricidad convencional.

3.2 Caracterización energética rural

La caracterización energética es el proceso mediante el cual se identifican y cuantifican los consumos de energía dentro de un sistema o instalación. En contextos rurales, esta actividad permite dimensionar las necesidades reales del usuario y planificar soluciones energéticas a la medida. Incluye el inventario de equipos, análisis de hábitos de uso, registro de variables operativas y proyecciones de consumo futuro (Gómez & Cárdenas, 2020).

En sistemas ganaderos y agropecuarios como el de la finca San José de Nazareth, los principales consumos energéticos están asociados a:

- Iluminación de instalaciones clave (corrales, comederos, bebederos)
- Bombeo de agua para consumo animal y riego.
- Cercas eléctricas para manejo adecuado de potreros.
- Cargas menores como radio, sensores o equipos de control ambiental.

Un análisis energético riguroso permite establecer prioridades de intervención, evaluar cargas críticas y proponer soluciones adecuadas en términos de capacidad, autonomía y sostenibilidad.

3.3 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es la fuente renovable más utilizada en zonas rurales no interconectadas, debido a su disponibilidad constante y a la madurez tecnológica de los sistemas fotovoltaicos.

Colombia cuenta con niveles de irradiación superiores a los 4,5 kWh/m²-día en promedio, lo que la convierte en un territorio con alto potencial solar (IDEAM, 2020).

La energía solar requiere una planificación adecuada del sistema de almacenamiento, debido a su naturaleza intermitente (solo genera durante el día). El diseño debe considerar la autonomía esperada (en días sin sol), la eficiencia de los paneles y la tasa de descarga de las baterías.

3.4 Energía eólica

La energía eólica aprovecha la fuerza del viento para accionar un generador eléctrico. Su viabilidad depende de la velocidad y constancia del viento, siendo más efectiva en zonas costeras o de topografía abierta. En zonas como Palmar (Santander), la instalación de micro generadores eólicos podría complementar los sistemas fotovoltaicos si se identifican patrones estacionales de viento favorables (Sánchez et al., 2018).

3.5 Energía a partir de biomasa

La biomasa es una fuente valiosa en contextos ganaderos, ya que permite el aprovechamiento de residuos orgánicos (estiércol, restos vegetales, podas, etc.) mediante digestores anaeróbicos que producen biogás. Este gas puede ser utilizado para generar electricidad o para alimentar cocinas rurales, reduciendo la dependencia de la leña o el gas propano (Ramírez & Gómez, 2019).

Aunque su implementación requiere mayor control técnico, los beneficios a largo plazo en sostenibilidad, manejo de residuos y fertilización orgánica hacen que la biomasa sea una opción integral en fincas medianas y grandes.

3.6 Consumo energético en ganadería extensiva

La actividad ganadera, especialmente en su modalidad extensiva, requiere de energía para operaciones básicas como el bombeo de agua, iluminación de corrales, funcionamiento de cercas eléctricas y eventualmente refrigeración o procesamiento local de productos. Según Correa, Martínez y González (2020), en fincas ganaderas medianas, entre el 35% y 50% del consumo energético se destina al abastecimiento de agua.

El uso de tecnologías energéticamente eficientes puede mejorar considerablemente la rentabilidad de estas explotaciones. Por ejemplo, la electrificación de cercas permite una mejor rotación de potreros y mejora el aprovechamiento del forraje (Sánchez, Ramírez & Velázquez, 2018).

4. Metodología

Esta investigación se desarrolló empleando un análisis de rendimiento energético con el fin de caracterizar y determinar las fuentes energéticas renovables que puedan implementarse en el contexto de la finca San José de Nazareth.

El proyecto se llevó a cabo considerando factores ambientales, con el objetivo de suplir la necesidad energética, como el bombeo para los riegos, la electricidad para la rotación de corrales y la iluminación en los puntos requeridos. El trabajo se dividió en tres fases principales.

4.1 Diagnóstico energético

El objetivo principal en esta etapa fue hacer un análisis de los consumos energéticos presentes de la finca San José de Nazareth, haciendo uso de las herramientas como Google Earth Pro y los planos de la finca, con esto, se determinaron las distancias y desniveles topográficos para con estos, aplicar modelos de ingeniería como la ecuación de Darcy-Weisbach, la ecuación de

potencia de la bomba y la ecuación de Ohm, para calcular la demanda energética en cada subsistema.

4.1.1 Subsistema de bombeo

Teniendo en cuenta que este es el sistema con mayor consumo energético y las variables para este, como lo son el caudal y la altura de la cabeza dinámica total de agua se determinó la potencia para así poder seleccionar una bomba que cumpla con los requerimientos del consumo para el ganado y el riego del pasto.

4.1.2 Subsistema de cercado eléctrico

Este sistema está pensando para un funcionamiento continuo las 24 horas, se desarrolla para un total de 7 potreros y su función es mantener una barrera para el ganado.

Inicialmente se mide la longitud perimetral del terreno en general y seguido de esto se subdivide en áreas correspondientes a cada potrero, con este cálculo perimetral se determina la cantidad de alambre requerido para dividir cada área. Con este valor se selecciona un energizador que cumpla con las características técnicas para su requerimiento, en este caso se debe tener en cuenta el tipo de animal a contener, la longitud del cercado y la compatibilidad con el sistema de energía solar.

4.1.3 Subsistema de iluminación

Este sistema es esencial para el funcionamiento continuo de la finca y así mismo para mantener la seguridad. Es clave para áreas como corrales, bebederos y comederos, en este caso, se establecieron los parámetros de cálculo, primeramente, seleccionando la tecnología LED que supliera las necesidades al momento de su implementación y se determinaron las horas en las que se operaran estas luminarias.

Al concluir este proceso de diagnóstico, nos dio como resultado la consolidación de un perfil de energía de consumo diario de 15.5 kWh y una curva de carga de 24 horas.

4.2 Diseño de la energía renovable a implementar

En esta sección, se procedió a realizar el diseño de la solución energética renovable, teniendo como base la demanda calculada previamente y el recurso solar de la región, obtenido desde la base de datos de PVGIS. Con estos datos se dimensionaron los componentes clave del sistema fotovoltaico aislado.

4.2.1 Recurso solar de la región

Se determinó el recurso, midiéndolo en Horas Sol Pico (HSP), que corresponde el número de horas durante el día en que la radiación solar alcanza su valor máximo estándar. Para determinar un valor confiable se utilizaron herramientas de simulación como la PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Este análisis.

Con este dato determinado podemos continuar calculando la potencia fotovoltaica requerida para generar la energía diaria que suministrará energéticamente la finca, teniendo en cuenta las pérdidas del sistema y añadiendo un margen de seguridad para garantizar energía suficiente incluso en días nublados.

4.2.2 Sistema fotovoltaico

El generador solar fotovoltaico convierte Energía Solar en Energía Eléctrica con el fin de suplir la demanda energética de la finca. A partir del recurso encontrado y los requerimientos del sistema se seleccionó la tecnología y la cantidad de paneles requeridos.

La elección de estos se basó en criterios técnicos, económicos y ambientales asegurando una eficiencia y disponibilidad sin impactar el uso del suelo y cumpliendo significativamente con el objetivo de optimizar los costos de inversión.

4.3 Comparación y análisis de costos para la implementación del sistema

Para finalizar, a partir del diagnóstico y el diseño planteado, se llevó a cabo una evaluación técnico-económica y ambiental, buscando seleccionar el sistema más eficiente y sostenible para verificar la viabilidad del proyecto.

Se realizó el cálculo de indicadores financieros como el periodo de retorno de la inversión y se cuantificó su beneficio ambiental en términos de la reducción de emisiones de CO₂.

5. Diagnóstico Energético

La finca San José de Nazareth se encuentra ubicada en el municipio de Palmar, departamento de Santander, Colombia. Posee una extensión aproximada de 13.4 hectáreas y su actividad principal es la cría y engorde de ganado bovino, con una capacidad proyectada de hasta 50 novillos. La topografía del terreno es predominantemente ondulada, con presencia de coberturas arbóreas, fuentes hídricas naturales y zonas de potrero subdivididas para rotación del pastoreo. El diagnóstico se estructura en torno a tres sistemas críticos que definen el perfil de consumo energético: el sistema de cercado eléctrico para la gestión rotacional de potreros, el sistema de bombeo de agua para garantizar el suministro hídrico, y el sistema de iluminación para la seguridad y operatividad nocturna. A través de la descripción de estos sistemas, se establecerá el fundamento técnico que justifica cada una de las demandas energéticas de la operación ganadera proyectada.

5.1 El Sistema de Bombeo de Agua: El Proceso de Mayor Demanda Potencial

El suministro de agua es el proceso vital y, previsiblemente, el de mayor impacto energético en la Finca San José de Nazareth. La estrategia hídrica se basa en la captación desde una fuente superficial perenne, el Río Suárez, y su posterior elevación a un punto de

almacenamiento estratégicamente ubicado en la cota más alta de la propiedad. Este diseño es fundamental para habilitar un sistema de distribución por gravedad que alimente eficientemente los bebederos en cada uno de los potreros y, en una segunda fase, un sistema de riego para las praderas.

La cuantificación de la energía requerida para este proceso depende de un análisis de ingeniería de fluidos que se basará en parámetros medidos directamente en campo. La potencia eléctrica de la electrobomba a seleccionar será una función directa de tres variables críticas:

- El Caudal Requerido (Q): Este parámetro será determinado por la suma de dos demandas. Primero, la demanda del ganado, calculada a partir de estándares zootécnicos que establecen el consumo diario de agua por unidad de peso vivo para bovinos en condiciones climáticas locales. Segundo, la demanda de riego, que se definirá en función del área de pastura a irrigar y la lámina de agua necesaria para compensar la evapotranspiración en la región.
- La Cabeza Dinámica Total (TDH): Este es el factor más determinante y se compone de la suma de la altura estática y las pérdidas por fricción. La altura estática, que representa la diferencia de elevación vertical entre el punto de succión en el río y el punto de descarga en el tanque, será determinada mediante un levantamiento topográfico o el uso de altimetría de precisión. Las pérdidas por fricción serán calculadas aplicando principios de la mecánica de fluidos, como la ecuación de Darcy-Weisbach, considerando la longitud total, el diámetro y el material de la tubería de impulsión.

- La Eficiencia del Sistema (η): La potencia eléctrica final dependerá de la eficiencia combinada del conjunto motor-bomba. Este valor será obtenido de las curvas de rendimiento proporcionadas por el fabricante del equipo que se seleccione en función del punto de operación (caudal y TDH) calculado.

Por su naturaleza, este sistema representa una carga de alta potencia e intermitente, cuya operación es programada durante periodos específicos del día para optimizar el uso de la energía generada.

5.2 Sistema de cercado eléctrico: La carga base de la operación.

La implementación de un sistema de pastoreo rotacional es un pilar en la modernización de la finca. Esta práctica requiere de subdivisión del terreno en 7 potreros mediante un sistema de cercado eléctrico. Dicho sistema actúa como una barrera psicológica que permite un manejo eficiente del ganado y una recuperación adecuada de pasturas.

El componente central de este sistema es el energizador o impulsor, Un dispositivo electrónico que genera pulso de alto voltaje a intervalos regulares. La determinación de su consumo energético sigue los siguientes pasos:

1. Diseño del layout y medición: Se elabora un plano a escala de la finca donde se traza la disposición óptima de los 7 potreros. A partir de este plano, se calcula la longitud lineal total del alambre conductor requerido.
2. Selección de equipo: Con base a la longitud total del cercado y el tipo de ganado, se selecciona un energizador comercial cuyas especificaciones técnicas garanticen un pulso efectivo en toda la extensión de la cerca.

3. Determinación del consumo: La potencia de consumo del energizado por expresada en vatios(W), se obtuvo directamente de la ficha técnica del fabricante.

Este sistema se caracteriza por ser una carga de baja potencia, pero de operación continúa (24/7). Constituye la carga base de la finca; aquella que, si bien es de baja magnitud, está presente de forma interrumpida y es esencial para el modelo operativo.

5.3 Sistema de iluminación.

Las labores nocturnas y la facilitación de tareas en la madrugada son aspectos operativos que serán cubiertos mediante un sistema de iluminación artificial. La planificación de este sistema se centrará en áreas de alta actividad como el corral principal, comederos y puntos estratégicos de vigilancia en las zonas de potreros.

La tecnología a emplear serán luminarias tipo reflector con fuente de luz LED, escogidas por su alta eficiencia energética, robustez y larga vida útil. Cualidades idóneas para el entorno rural. La determinación de su demanda energética se realizará de la siguiente manera:

1. Diseño luminotécnico: Se define la cantidad y ubicación de los puntos de luz necesarios para lograr los niveles de iluminación adecuados en las áreas de interés.
2. Selección de luminarias: Se selecciona reflectores LED comerciales y se registrará su potencia nominal individual en vatios (W).
3. Cálculo de carga total: La potencia total del sistema de iluminación será la suma de las potencias nominales de todas las luminarias instaladas. El consumo de energía diario será el producto de esta potencia total por el número de horas de operación.

En conclusión, el diagnóstico metodológico de la Finca San José de Nazareth identifica un perfil de consumo eléctrico heterogéneo, resultado de la superposición de tres tipos de cargas fundamentales: una carga principal intermitente y de alta potencia (bombeo), una carga base continua y de baja potencia (cercado), y una carga nocturna programada de media potencia (iluminación). La ejecución rigurosa de los procedimientos de medición y cálculo aquí descritos para cada sistema proporcionará los datos cuantitativos precisos de la demanda energética. Estos resultados, que se detallarán en el capítulo subsiguiente, son la piedra angular para el diseño de una solución energética renovable, robusta y ajustada a las necesidades reales de la finca.

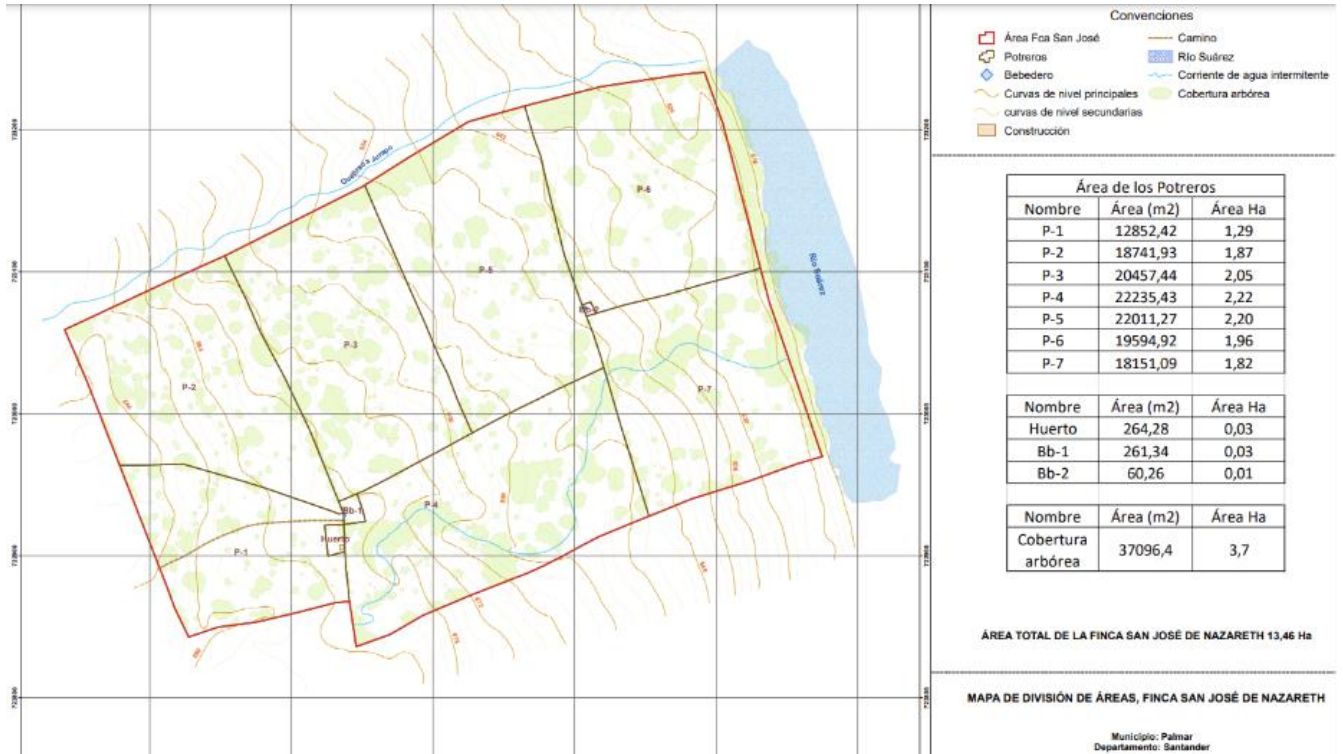
6. Calculo energía necesaria.

Este capítulo presenta la memoria de cálculo de ingeniería que cuantifica el requerimiento energético total para la operación proyectada de la Finca San José de Nazareth. El objetivo es calcular la energía diaria (expresada en kilovatios-hora, kWh) necesaria para abastecer a 50 novillos en una superficie de 13.4 hectáreas, conforme al plano de distribución y la topografía analizados previamente.

La metodología empleada consiste en la desagregación de la demanda total en sus cargas eléctricas constituyentes. Cada carga se analiza de forma individual, justificando su necesidad operativa, definiendo sus parámetros técnicos a partir de estándares de la industria y fuentes académicas, y calculando su consumo energético.

Figura 1.

Mapa de división de áreas, Finca San José de Nazareth.



Los sistemas analizados son:

6.1 Sistema de cercado eléctrico: Para gestión de pastoreo rotacional.

Para el cercado eléctrico de los 7 potreros, se mide la distancia total externa, como cada subdivisión de potrero y se estima el consumo del equipo que lo alimentará.

6.1.1 Cálculo cercado aproximado.

En las imágenes siguientes se muestra cómo se obtuvo los datos de alambre requerido, usando herramientas tales como; plataforma Google Earth, al igual que visitas técnicas donde se tomaron algunas medidas para un resultado más asertivo.

Figura 2.

Localización del cercado perimetral de toda el área de la finca

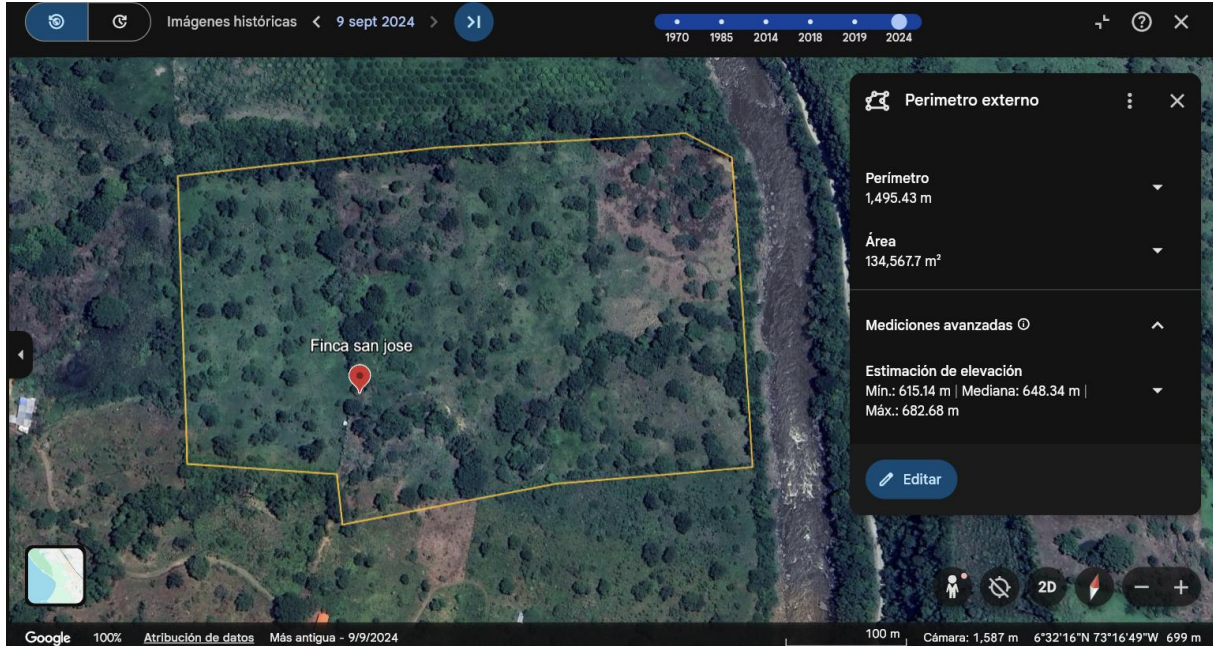
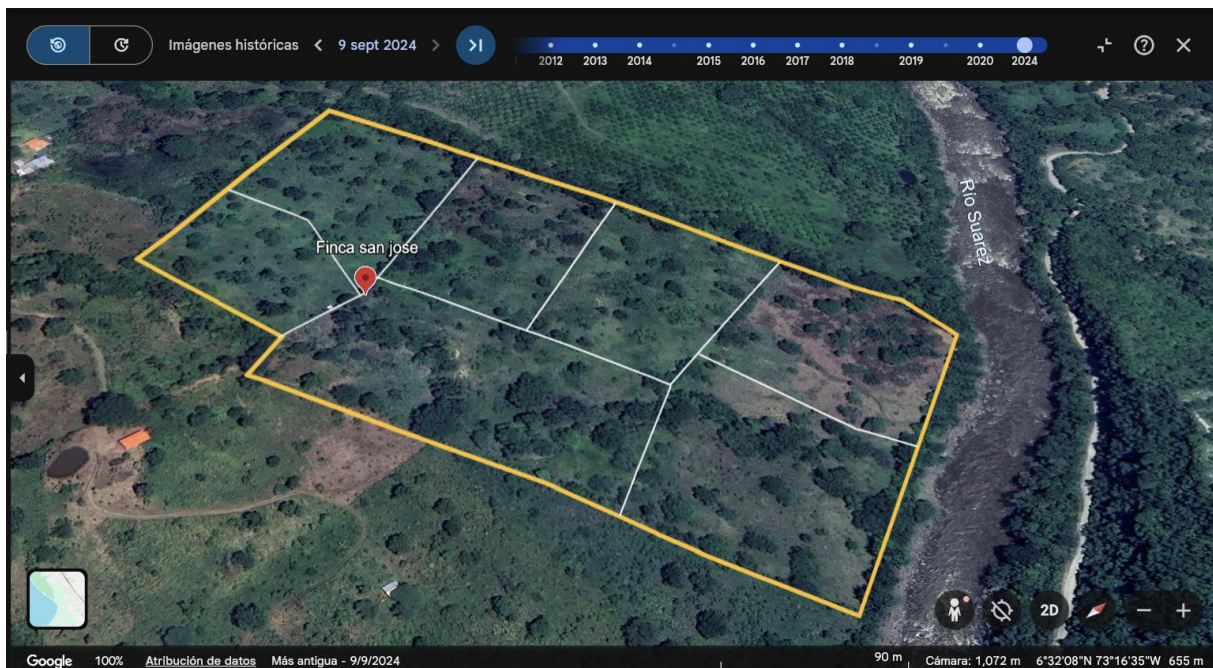


Figura 3.

Localización del cercado perimetral de cada potrero de la finca.



Cálculo promedio de alambre requerido para cercar el total de 13,4 hectáreas en 7 sub potreros.

Tabla 1.

Sumatoria de perímetros para el cálculo de alambre requerido.

Cercado de alambre requerido		
Nombre	área(m ²)	perímetro (m)
P-1	12852,42	392,28
P-2	18741,93	405,98
P-3	20457,44	435,15
P-4	22235,43	587,15
P-5	22011,27	576,15
P-6	19594,92	415,89
P-7	18151,09	409,25
Total, cercado		3221,85
Total, para diseño		3450

Nota. Esta tabla muestra la suma de perímetros de cada potrero para determinar el alambre requerido para este proyecto.

6.1.2 Cálculo energizador.

El alambre no consume energía; quien lo hace es el energizador (también llamado impulsor), que es el aparato que envía el pulso eléctrico.

El sistema de cercado eléctrico es un componente esencial para la implementación de un sistema de pastoreo rotacional en los siete potreros de la finca. Su función es mantener una barrera psicológica efectiva para el ganado, lo que exige una operación continua durante las 24 horas del día. La energía requerida para este sistema es determinada por la potencia de consumo del energizador, el cual debe ser seleccionado en función de la longitud total del alambre a electrificar.

A partir del análisis del plano topográfico y las visitas técnicas que se realizó previamente, se calculó una longitud total de cercado de 3450 metros.

Para cuantificar la demanda energética del sistema, se procedió a seleccionar un energizador comercial cuyas características técnicas se ajustan a los requerimientos de la finca. Los criterios de selección fueron la longitud del cercado (3.45 km), el tipo de animal a contener (ganado bovino) y la compatibilidad con un sistema de energía solar (alimentación a 12V DC).

Se seleccionó como equipo de referencia el modelo Speedrite 3000, un dispositivo de bajo impedimento y 3 Joules de energía liberada, adecuado para la aplicación. Según la ficha técnica oficial del fabricante, el equipo presenta un consumo de corriente nominal de 320 miliamperios (mA) cuando es alimentado por una fuente de 12 voltios de corriente continua (DC) (Datamars Livestock, 2024).

Figura 4.

Speedrite 3000 Unigizer - Technical Specifications and User Manual



A partir de este dato, se calcula la potencia nominal de consumo (P) utilizando la ley de Ohm

$$P = V * I \quad (1)$$

$$P_{nominal} = 12 (V) * 0.320 (A) = 3.84 (W) \quad (2)$$

El cálculo arroja una potencia nominal de 3.84 W en condiciones ideales de operación. Sin embargo, para el dimensionamiento del sistema de suministro energético de la finca, se ha adoptado un valor de diseño conservador de 9 W. Esta decisión se fundamenta en adquirir un energizador que sea eficiente y cumpla la necesidad de la finca tanto en el presente, o si en un futuro se requiere hacer más subdivisiones de los potreros. Así mismo cumple el principio de ingeniería de diseño para sistemas autónomos.

Margen de Seguridad Operacional: El consumo real del energizador puede incrementarse debido a condiciones no ideales, tales como el contacto de vegetación con el alambre conductor (fallas a tierra), lo que exige un mayor esfuerzo del equipo para mantener el voltaje en la línea (Datamars Livestock, 2024). El valor adoptado de 9 W proporciona un amplio margen de seguridad para garantizar la operación ininterrumpida de la cerca incluso en dichas condiciones.

6.1.3 Cálculo del consumo de energía diario.

Con la potencia diseño establecida, el consumo de energía diario (E_{cerca}) se calcula de la siguiente manera

$$E_{cerca} = 9 (W) * 24 \left(\frac{h}{dia} \right) = 216 \left(\frac{Wh}{dia} \right) \quad (3)$$

El consumo energético del sistema de cercado eléctrico es de 0.22 (kWh/día).

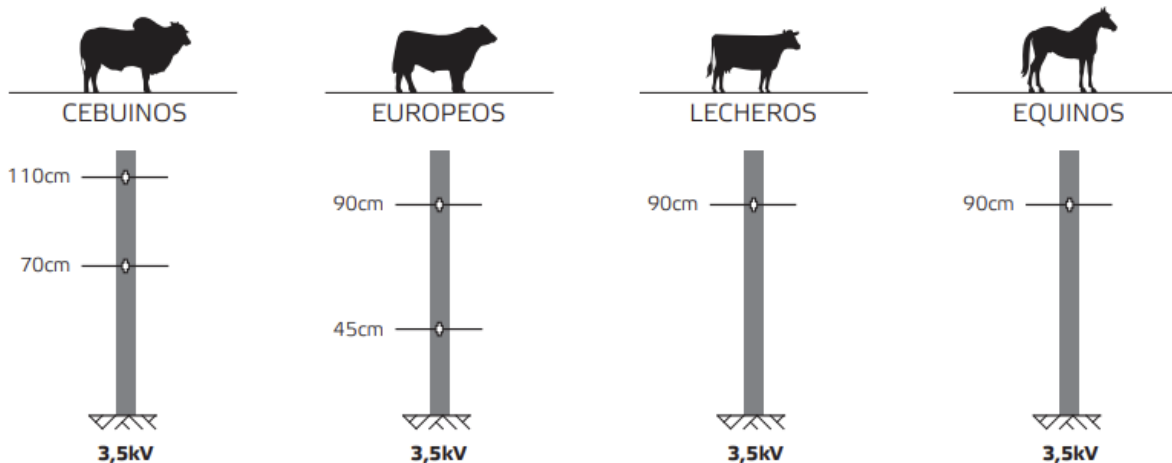
6.1.4 Sugerencia de instalación de cercado.

La separación entre los alambres o hilos es variable, puede tener uno o más alambres dependiendo de la especie, raza, categoría animal o temperamento. Debemos establecer la altura de los alambres de manera tal que los animales toquen uno o más hilos cuando quieran pasar la

cerca. Los alambres deberán estar aislados y el espacio entre los postes dependerá del terreno, siempre manteniendo la altura correcta (Manual práctico de cercas eléctricas, Datamars, p.06).

Figura 5.

Sugerencia del espacio entre los alambres y postes, Datamars, p.06.



La cerca tiene que ser, antes que nada, funcional. Su simetría es secundaria y el espacio entre los postes lo determinará principalmente la topografía del terreno. Se recomienda colocar postes cada 25 metros como máximo, procurando mantener siempre la altura adecuada.

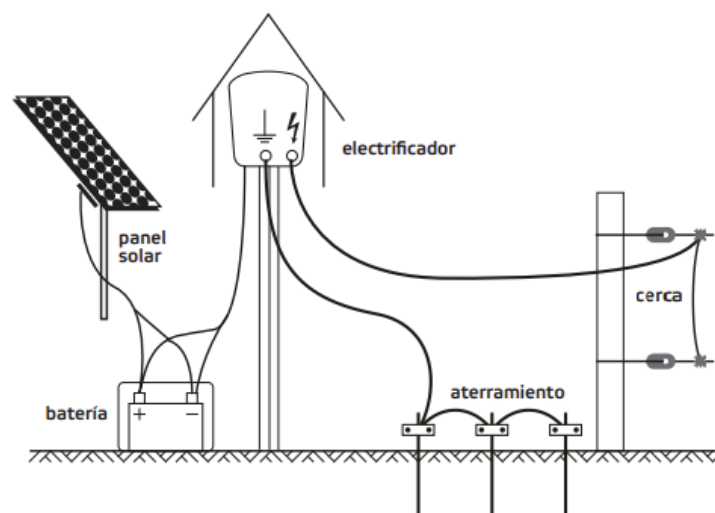
6.1.5 Panel solar.

El panel solar debe ser instalado a una altura adecuada del suelo, de manera tal que ningún animal pueda alcanzarlo. También debe estar en un lugar protegido de las ráfagas de viento para que no consiga voltearlo. El panel debe tener un controlador de carga para preservar la batería y así aumentar su vida útil, evitando tener que cambiar las baterías frecuentemente. Lo ideal es siempre contar con un panel bien dimensionado para el consumo del electrificador, con un controlador de carga y batería nueva cargada. De esta manera el sistema estará funcionando adecuadamente con alta durabilidad y buen funcionamiento. Para definir la posición correcta del

panel, adicione 10 grados de inclinación a la latitud del lugar de instalación, apuntando hacia el Norte, en localidades bajo la línea del Ecuador y para el Sur para localidades sobre la línea del Ecuador. (Manual práctico de cercas eléctricas, Datamars, p.09.)

Figura 6.

Sugerencia del espacio entre los alambres y postes, Datamars, p.09.



6.2 Sistema de bombeo de agua: suministro hídrico de ganado y el riego de pasturas.

El sistema de bombeo de agua es el componente de mayor consumo energético de la finca. Su función es captar agua desde el Río Suárez y elevarla hasta el punto más alto de la propiedad para su distribución. Esta sección presenta un cálculo refinado de la demanda energética de este sistema, basado en datos topográficos precisos obtenidos mediante software de georreferenciación.

6.2.1 Determinación de los Requerimientos Hídricos

Los requerimientos hídricos permanecen constantes y se basan en las necesidades del ganado y del sistema de riego.

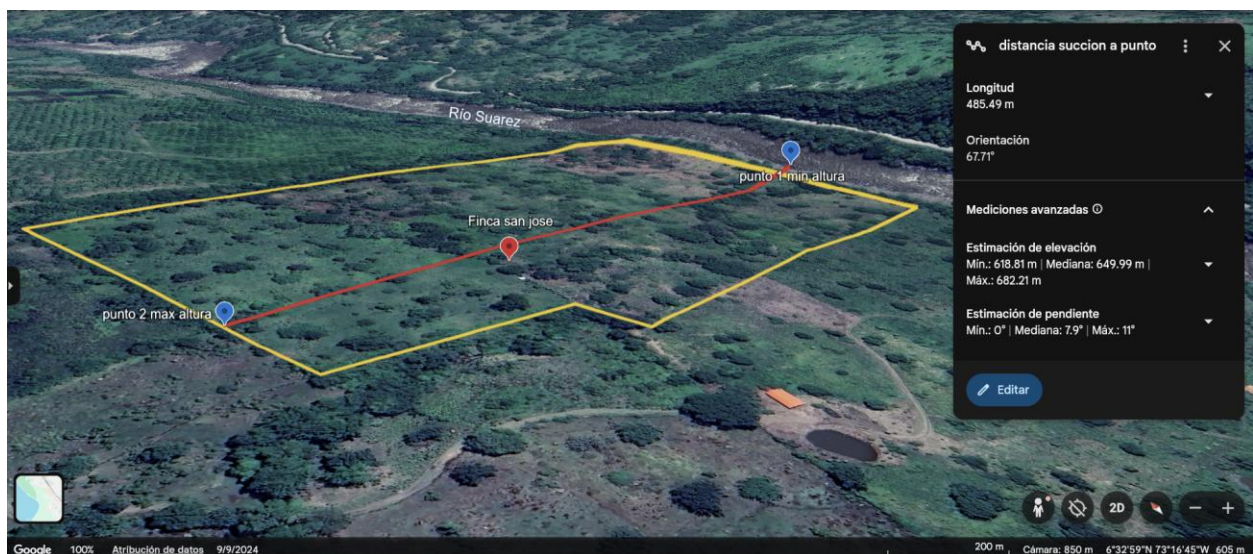
- **Consumo del Ganado:** Se calcula un requerimiento de 2,500 L/día para 50 novillos, adoptando un valor de diseño de 50 litros por animal al día, cifra consistente con las recomendaciones para bovinos en climas cálidos (FAO, 2011).
- **Consumo para Riego:** Se estima una demanda de 20,000 L/día para el riego de una hectárea de pastura, utilizando una lámina de riego de 5 mm/día, valor apropiado para la región Andina (IDEAM, 2023). Esta cantidad de agua se deberá regar en el transcurso de 2 horas aprovechando el pico de radiación solar.
- **Demanda Hídrica Total Diaria:** 22,500 L/día.

6.2.2 Determinación de la Cabeza Dinámica Total (TDH) con Datos Topográficos Precisos

Para este análisis se utilizó el software Google Earth Pro (2024) para generar un perfil topográfico exacto entre el punto de succión en el Río Suárez y el punto de descarga en la cota más alta de la finca.

Figura 7.

Pendiente, longitud del punto de extracción al punto más alto de la finca.



La TDH representa el "esfuerzo" total que la bomba debe realizar y se compone de la altura estática (el desnivel) y las pérdidas de energía por la fricción del agua en la tubería.

- Altura Estática ($h_{estática}$): Es la diferencia de elevación vertical. Los datos extraídos del software son:
- Elevación Máxima (Punto de descarga): 682.21 m
- Elevación Mínima (Punto de succión): 618.81 m

$$h_{estática} = 682.21 \text{ m} - 618.81 \text{ m} = 63.40 \text{ metros} \quad (4)$$

- Pérdidas por fricción (h_f): Para calcular esta pérdida se utiliza la Ecuación de Darcy-Weisbach, la fórmula estándar en ingeniería hidráulica.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Donde:

h_f : Pérdida de carga por fricción (m).

f : Factor de fricción de Darcy (adimensional; 0.019 para PVC).

L : Longitud de la tubería (490 m).

D : Diámetro interno de la tubería (0.05 m). Se selecciona tubería de PVC de 2 pulgadas (0.05m), estándar en aplicaciones rurales por su bajo coeficiente de fricción y resistencia a la corrosión, según el "Manual Técnico de Tuberías" (Pavco Wavin, 2022).

v : Velocidad promedio del fluido (m/s).

g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Primero, se calcula la velocidad del agua en la tubería de 2 pulgadas

$$v = \frac{Q}{\text{Área de la tubería}} = \frac{0.003125 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.025 \text{ m})^2} = 1.59 \text{ m/s} \quad (6)$$

Ahora se calcula las pérdidas dinámicas, se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = 0.019 \frac{490 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} * \frac{(1.59 \text{ m/s})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 23.9 \text{ m} \quad (7)$$

TDH (esfuerzo total que la bomba debe realizar):

$$TDH = h_{estática} + h_f = 63.40 \text{ m} + 23.9 \text{ m} = 87.3 \text{ m} \quad (8)$$

- Longitud de tubería (L): Se calcula la distancia inclinada real, que es la longitud que recorrerá la tubería. Utilizando la distancia horizontal (485.49 m) y vertical (63.40 m) del perfil, se aplica el teorema de Pitágoras:

$$L = \sqrt{(485.49 \text{ m})^2 + (63.4 \text{ m})^2} = 490 \text{ metros} \quad (9)$$

6.2.3 Caudal del diseño (Q).

Se establece 2 horas de operación diaria, coincidiendo con el periodo de mayor radiación solar. Para determinar el valor del caudal se utiliza la ecuación de caudal volumétrico.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (10)$$

Donde:

Q: Caudal volumétrico (m³/s).

V: Volumen total del fluido (m³).

t: Tiempo total de operación (s).

$$Q = \frac{\frac{22,500L}{\text{dia}} * \left(\frac{1m^3}{1000L}\right)}{\frac{2h}{\text{dia}} * \frac{3600s}{h}} = 0.003125 \frac{m^3}{s} \quad (11)$$

6.2.4 Cálculo de Potencia y Selección de la Bomba Final

Con el caudal y el esfuerzo total definidos, se calcula la potencia que debe tener el motor de la bomba. Para ello, se utiliza la Ecuación de Potencia de la Bomba.

$$P_e = \frac{Q * TDH * \rho * g}{\eta} \quad (12)$$

Donde:

P_e : Potencia eléctrica requerida por el motor (W).

Q: Caudal volumétrico del fluido (m^3/s).

TDH: Cabeza Dinámica Total (m).

ρ : Densidad del fluido ($\sim 1000 \text{ kg/m}^3$ para el agua).

η : Eficiencia combinada del conjunto motor-bomba (adimensional).

La aplicación de esta ecuación es un tema central en el diseño de sistemas de bombeo y se detalla en guías de ingeniería (UPME, 2019) y textos de mecánica de fluidos (Mott & Untener, 2018).

- Cálculo de Potencia Eléctrica (P_e):

Se utiliza una eficiencia (η) del 65%, un valor estándar para esta aplicación.

Adoptar un valor de 65% es una práctica de diseño estándar y prudente. Este valor, respaldado por estudios del sector energético para aplicaciones agrícolas en Colombia (UPME, 2019), asegura

que el cálculo de la potencia requerida tenga un margen de seguridad, garantizando que el motor seleccionado no quede subdimensionado y pueda operar de forma fiable durante toda su vida útil.

En resumen, el 65% es una estimación realista y conservadora del rendimiento del conjunto motor-bomba en condiciones de operación reales, y no la eficiencia máxima teórica de un componente aislado.

$$P_e = \frac{0.003125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 87.3 \text{ m} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \text{ m/s}^2}{0.65} \approx 4.124 \text{ KW} \quad (13)$$

- Selección de la bomba comercial:

La selección de un equipo de bombeo comercial se realiza utilizando como herramienta principal las curvas de rendimiento de la bomba, proporcionadas por el fabricante en sus catálogos técnicos. Este proceso garantiza que el equipo seleccionado opere de manera eficiente y confiable bajo las condiciones específicas calculadas para el sistema.

El primer paso consiste en establecer el punto de operación del sistema, que es el par de valores de caudal (Q) y Cabeza Dinámica Total (TDH) que la bomba debe satisfacer. Según los cálculos de la sección anterior, este punto es:

- Caudal (Q): 11.25 m³/hora
- Cabeza Dinámica Total (TDH): 87.3 metros.

Se procede a consultar catálogos técnicos de bombas sumergibles multietapa. Para este estudio, se utiliza como referencia la documentación técnica de la serie de bombas SP de Grundfos, un estándar en la industria para aplicaciones de bombeo de pozos y captación en fuentes superficiales (Grundfos Holding A/S, 2024).

Figura 8.

Curva de rendimiento típica para una bomba sumergible multietapa. Fuente: Adaptado de Grundfos Holding A/S (2024).

Seleccionar parámetros

Líquido bombeado Agua Cualquier líquido viscoso

Temperatura del líquido durante el funcionamiento * °F

Caudal (Q) m³/h

Altura (H) m

Mains Voltage V

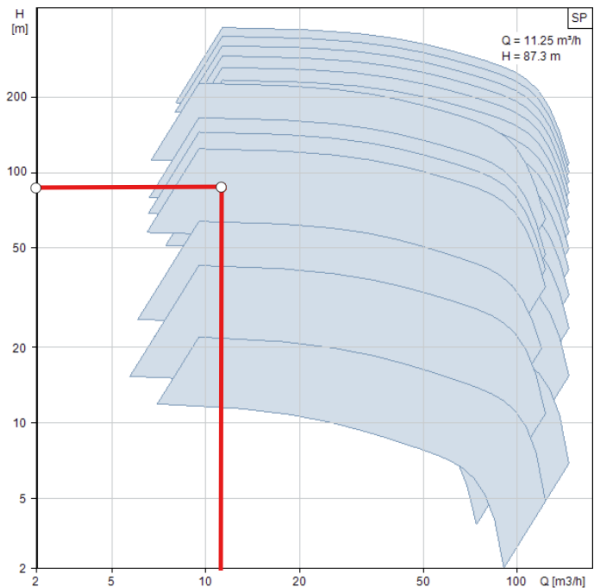
Velocidad variable

Grado de protección

Número de pulsaciones

Selección aplicación.

Usa las curvas de trabajo para encontrar una entrada de tamaño válida



Al realizar este análisis, se identifica que el punto de operación de la finca se ajusta al perfil de rendimiento del modelo Grundfos SP 17-14. La curva de este modelo muestra que para entregar un caudal de 11.25 m³/h, puede vencer una TDH cercana a los 87.3 m.

Figura 9.

Bomba Grundfos SP 17-14 N.º 12a00014



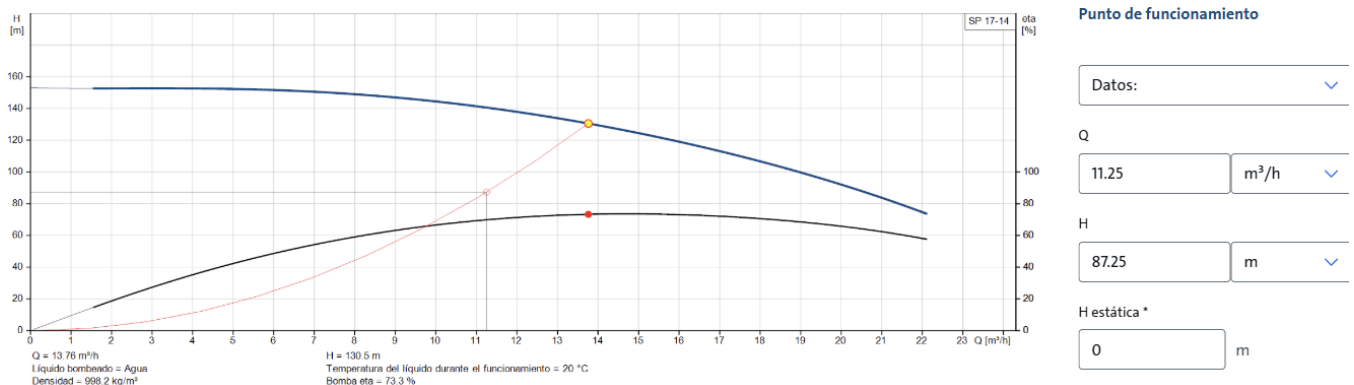
Bomba de agotamiento sumergible, apta para el bombeo de agua limpia. Se puede instalar en vertical u horizontal. Todos los componentes de acero están fabricados en acero inoxidable (EN 1.4301; AISI 304) para garantizar la máxima resistencia a la corrosión.

- Determinación de la Potencia del Motor.

Una vez identificado el modelo de la bomba (la parte hidráulica), el catálogo indica la potencia de motor requerida para operar en ese punto. Para el punto de operación calculado, la potencia requerida es de (4.12 kW). Dado que los motores eléctricos se fabrican en potencias estándar, se selecciona el tamaño comercial inmediatamente superior para asegurar un funcionamiento sin sobrecargas.

Figura 10.

Curva de Rendimiento de la Bomba Seleccionada (Grundfos SP 17-14) y Punto de Operación del Sistema.

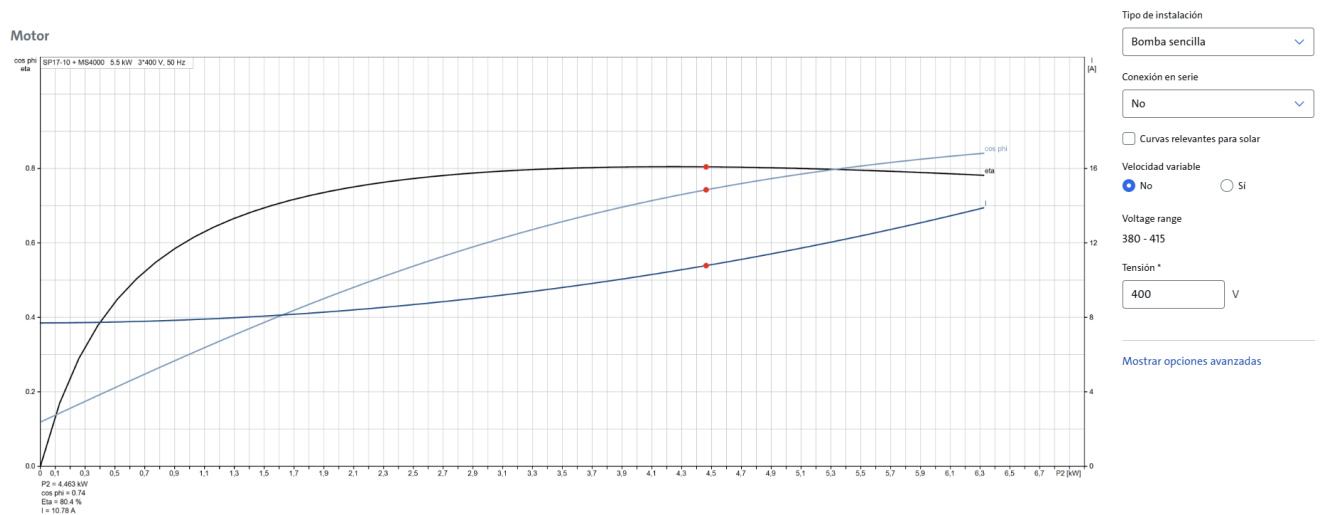


Este análisis garantiza que el componente que consume la electricidad lo haga de la manera más eficiente posible, un aspecto crítico en un sistema alimentado por energía solar. Para este fin, se examinan las curvas de rendimiento del motor de referencia, el modelo Grundfos MS4000 de 5.5 kW (7.5 HP), que corresponde a la potencia comercial estándar superior a la requerida. La

Figura 9 muestra las curvas características de dicho motor, describiendo su comportamiento eléctrico y mecánico bajo diferentes cargas de trabajo.

Figura 11.

Curvas de Rendimiento del Motor Eléctrico Sumergible (Grundfos MS4000, 5.5 kW). Fuente: Adaptado de Grundfos Holding A/S (2024).



El gráfico presenta tres curvas clave en función de la potencia mecánica que el motor entrega en su eje (eje horizontal, en kW):

Curva de Eficiencia (η - Línea Negra): Representa el porcentaje de la potencia eléctrica consumida que se convierte efectivamente en potencia mecánica útil. El valor se lee en el eje vertical izquierdo. Un valor más alto indica menores pérdidas de energía en forma de calor.

Curva del Factor de Potencia ($\cos \phi$ - Línea Azul Superior): Mide la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica de la red o del inversor. Un valor cercano a 1 indica un aprovechamiento óptimo. Se lee en el eje vertical izquierdo.

Curva de Corriente (I - Línea Azul Inferior): Muestra la corriente eléctrica (en Amperios) que el motor demanda en función de la carga de trabajo. Se lee en el eje vertical derecho y es crucial para el dimensionamiento de cables y protecciones eléctricas.

Basado en el análisis anterior, el equipo de bombeo seleccionado para la Finca San José de Nazareth se especifica de la siguiente manera:

- Tipo: Bomba sumergible centrífuga multietapa.
- Modelo de Referencia: Grundfos SP 17-14 o un equivalente técnico de otro fabricante.
- Motor Requerido: Motor eléctrico sumergible de 7.5 HP de potencia, trifásico a 220 VAC.

6.3 Sistema de iluminación: Para la seguridad y operatividad nocturna en corrales.

El sistema de iluminación es un componente esencial para la finca, diseñado para cumplir con dos funciones principales: garantizar la seguridad de los activos durante la noche y proveer la operatividad necesaria para el manejo del ganado en horas sin luz solar.

6.3.1 Justificación y Requerimientos Lumínicos

La instalación de un sistema de iluminación en las áreas de corrales, bebederos y comederos se justifica por los siguientes motivos:

- Seguridad: Una iluminación adecuada disuade el hurto de ganado (abigeato) y la presencia de depredadores, protegiendo la inversión de la finca.
- Operatividad Nocturna: Permite al personal realizar labores de supervisión, tratamientos veterinarios de emergencia o manejo de animales fuera del horario diurno de forma segura y eficiente.

- Bienestar Animal: Reduce el estrés y el riesgo de lesiones en los novillos al facilitar su movimiento y acceso al agua y al alimento durante la noche.

Para asegurar una visibilidad adecuada sin generar un exceso de luz que pueda perturbar a los animales, se establece un nivel de iluminancia objetivo.

De acuerdo con las recomendaciones de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos y Biológicos (ASABE), para áreas de manejo de ganado y corrales al aire libre, se recomienda un nivel de iluminación de entre 20 y 50 lux (lumen por metro cuadrado) (ASABE, 2018).

6.3.2 Parámetros de cálculo.

Para cumplir con los requerimientos lumínicos de manera eficiente, se definieron la tecnología, la cantidad de luminarias y el tiempo de operación.

- Tecnología Seleccionada: Se optó por el uso de reflectores con tecnología LED (Diodo Emisor de Luz). Esta elección se alinea con el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia (RETILAP, 2016), que promueve el uso de fuentes de alta eficacia energética. Los LED ofrecen la mayor eficiencia (lúmenes por vatio), una vida útil superior a las 50,000 horas y una alta resistencia a las condiciones de intemperie (vibración, humedad y polvo).
- Selección de luminarias y cantidad: Para cubrir el área del corral principal y los bebederos centrales, se determinó la instalación de 10 reflectores LED de 50 Watts cada uno, con un grado de protección IP65 que garantiza su hermeticidad contra polvo y chorros de agua.

$$Potencia\ total\ instalada\ (P_{luz}) = 10\ reflectores * \frac{50W}{reflector} = 500w \quad (14)$$

- Horas de operación (t_{luz}): El sistema operará únicamente durante la noche. Dada la ubicación de la finca en Palmar, Santander (cercana a la línea ecuatorial), la duración de la noche es relativamente constante durante todo el año.

Los datos históricos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2023) indican un promedio de aproximadamente 12 horas de oscuridad diarias en la región. Por lo tanto, se establece un tiempo de operación de 12 horas por día.

6.3.3 Memoria de Cálculo del Consumo Energético.

El consumo de energía diario del sistema de iluminación (E_{luz}) se calcula multiplicando la potencia total instalada por el tiempo de operación.

$$E_{luz} = P_{luz} * t_{luz} = 500w * \frac{12h}{dia} = \frac{6000Wh}{dia} \quad (15)$$

El consumo energético del sistema de iluminación es de 6.0 kWh/día.

6.4 Selección del Generador Solar Fotovoltaico.

El generador solar fotovoltaico es el componente encargado de convertir la energía solar en energía eléctrica para abastecer la totalidad de la demanda de la finca. Su correcto dimensionamiento es crucial para garantizar la autonomía y fiabilidad del sistema.

6.4.1 Determinación del Recurso Solar Disponible

Se dimensiona el campo solar, es decir, se cuantifica la cantidad de energía solar disponible en la ubicación del proyecto. Este recurso se mide en Horas Sol Pico (HSP), que representa el número de horas equivalentes al día en que la irradiancia solar alcanza su valor máximo estándar de 1,000 W/m². Para obtener un dato preciso y fiable, se utilizó la herramienta de simulación

fotovoltaica PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), desarrollada por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea.

Ubicación exacta, Palmar, Santander, Colombia (Latitud: 6.4° N, Longitud: 73.2° W).

El análisis para esta ubicación, considerando un sistema de inclinación fija óptima, arroja un promedio anual de 4.2 HSP. Este valor se utilizará como base para todos los cálculos de generación energética.

6.4.2 Cálculo de la Potencia Fotovoltaica Requerida (Potencia Pico)

La potencia pico (P_{pico} o kWp) es la potencia nominal total que el campo de paneles solares debe tener para generar la energía diaria requerida (15.5 kWh), compensando las pérdidas del sistema y añadiendo un margen de seguridad.

- Ecuación de dimensionamiento

$$P_{pico} = \frac{E_{diaria} * f_{seguridad}}{HSP * \eta_{sistema}} \quad (16)$$

Donde:

E_{diaria} : Energía diaria requerida (15.5 kWh/día).

$f_{seguridad}$: Factor de seguridad (adimensional). Se adopta un valor de 1.25 para sobredimensionar el sistema en un 25%, garantizando la generación de energía suficiente incluso en días de baja radiación (nublados).

HSP: Horas Sol Pico (4.2 h).

$\eta_{sistema}$: Eficiencia global del sistema (adimensional). Representa las pérdidas de energía en el cableado, el controlador de carga, el inversor y por la temperatura de los paneles. Se adopta

un valor de 0,80 (80%), un estándar conservador en diseños de ingeniería fotovoltaica (Häberlin, 2012).

$$P_{pico} = \frac{15.5 \frac{kWh}{dia} * 1.25}{4.2 h * 0.80} = \frac{19.375 \frac{kWh}{dia}}{3.36 h} = 5.77 kWp$$

Se requiere un campo solar con una potencia instalada de aproximadamente 5.8 kWp. Para fines comerciales y de diseño, se redondea a la siguiente capacidad estándar superior, definiendo un objetivo de 6.0 kWp.

6.4.3 Selección de la Tecnología y Número de Paneles

- Selección de tecnología:

Se elige paneles solares de silicio monocristalino con tecnología PERC (Passivated Emitter and Rear Cell).

Esta tecnología ofrece actualmente la mejor combinación de alta eficiencia (superior al 21%), buen rendimiento en condiciones de alta temperatura (un bajo coeficiente de temperatura) y una larga vida útil, siendo el estándar para instalaciones de alta calidad (Fraunhofer ISE, 2024).

- Selección de módulo:

La selección del equipo de generación se centra en módulos de alta potencia para optimizar el diseño del sistema. Se ha seleccionado un panel solar comercial de 550 Wp con tecnología monocristalina PERC.

Esta decisión se fundamenta en tres criterios técnicos y económicos. Primero, los módulos con potencias superiores a 500 Wp representan el estándar tecnológico del mercado para la fecha del estudio, lo que garantiza el acceso a la mayor eficiencia y disponibilidad (IRENA, 2025). Segundo, el uso de paneles de mayor potencia optimiza el área de instalación, permitiendo generar

la potencia requerida (6.0 kWp) en una superficie menor y reduciendo el impacto en el uso del suelo de la finca. Tercero, y de manera crucial, la reducción del número total de paneles instalados disminuye significativamente los costos asociados al "Balance del Sistema" (BOS), que incluyen estructuras de montaje, cableado y mano de obra, optimizando así la inversión inicial del proyecto (NREL, 2024).

- Cálculo de numero de paneles

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = \frac{\text{Potencia pico total requerida}}{\text{potencia nominal del panel}} \quad (17)$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = \frac{6000 \text{ Wp}}{550 \frac{\text{Wp}}{\text{panel}}} = 10.91 \text{ panel}$$

Dado que los paneles son unidades discretas, el número se redondea al entero superior.

El generador fotovoltaico estará compuesto por 11 paneles solares de 550 Wp, resultando en una potencia pico total instalada de 6050 Wp (6.05 kWp).

7. Costos y beneficios de las energías alternativas propuestas

La metodología consiste en la estimación de costos, desglosando el proyecto en sus cuatro subsistemas principales: (1) Suministro de Energía, (2) Bombeo de Agua, (3) Cercado Eléctrico, y (4) Iluminación. Para cada subsistema, se detallan y justifican los costos de sus componentes basándose en un sondeo de mercado en Colombia (Q4 2025). Finalmente, se realiza un análisis de viabilidad financiera comparando la solución propuesta con una alternativa tradicional basada en un generador diésel.

7.1 Subsistema suministro energía (sistema fotovoltaico)

Este subsistema, diseñado para una demanda de 15,5 kWh/día, es el corazón del proyecto.

Su costo se detalla a continuación

Tabla 2.

Costo del subsistema de suministro de energía.

Subsistema paneles solares				
Componente	Especificación (Opción optimizada)	Cantidad	Costo unitario (COP)	Costo total (COP)
Paneles solares	550 Wp, Monocristalino PERC, Tier 1	11	\$780,000,00	\$8,580,000,00
Baterías (AGM)	Ciclo Profundo AGM, 12V, 200 Ah	24	\$1,500,000,00	\$36,000,000,00
Inversor híbrido	10 kW, 48V, salida 220V trifásica	1	\$11,500,000,00	\$11,500,000,00
Subtotal			\$56,080,000,00	

Nota. Esta tabla relaciona las cantidades, componentes y su coste unitario y total para el subsistema de suministro de agua

7.1.1. Subsistema de Bombeo de Agua

Incluye la bomba seleccionada de 7.5 HP y toda la infraestructura necesaria para llevar el agua desde el río hasta el tanque de almacenamiento.

Tabla 3.

Costo subsistema de bombeo de agua.

Subsistema de bombeo de agua				
Componente	Especificación (Opción optimizada)	Cantidad	Costo unitario (COP)	Costo total
Conjunto motor-bomba	Sumergible multietapa, 7.5 HP, 220V trifásico	1	\$ 13,000,000,00	\$ 13,000,000,00

Tubería y accesorios	Tubería PVC 2" (490m), cables, válvulas	1 lote	\$ 18,750,000,00	\$ 18,750,000,00
Subtotal			\$ 31,750,000,00	

Nota. Esta tabla detalla las cantidades, componente y su coste unitario y total para un subsistema de bombeo de agua.

7.1.2. Subsistema de cercado eléctrico

Presupuesto para la instalación de 3,450 metros de cerca eléctrica perimetral y divisoria.

Tabla 4.

Presupuesto para la instalación de 3,450 m de cerca.

Subsistema de cercado eléctrico				
Componente	Especificación (Opción optimizada)	Cantidad	Costo unitario (COP)	Costo total
Energizador (impulsor)	12V DC, 4 Joules, bajo impedimento	1	\$1,200,000,00	\$1,200,000,00
Alambre conductor	Acero galvanizado, Calibre 12	1 rollo(3500m)	\$1,400,000,00	\$1,400,000,00
Postes de madera	Eucalipto inmunizado, 2m x 10cm	175	\$30,000,00	\$5,250,000,00
Subtotal			\$7,850,000,00	

Nota. Esta tabla muestra las cantidades, componentes y su coste unitario y total para el subsistema de cercado eléctrico,

7.1.3. Subsistema de iluminación

Costo de los materiales para la iluminación de corrales y áreas estratégicas.

Tabla 5.

Costo de los materiales de iluminación

Subsistema de iluminación				
Componente	Especificación (Opción optimizada)	Cantidad	Costo unitario (COP)	Costo total
Luminarias	Reflector LED, 50 W, Multivoltaje, IP65	10	\$85,000,00	\$850,000,00
Cableado	Cable rencauchetado para exterior, 2x12 AWG	100 m	\$5,500,00	\$550,000,00
Tablero y protecciones	Interruptor, termomagnético 10A, caja estanca	1 lote	\$150,000,00	\$150,000,00
Subtotal			\$1,550,000,00	

Nota. Esta tabla presenta las cantidades, componentes y su coste unitario y total para un subsistema de iluminación

7.1.4. Consolidación del CAPEX Total del Proyecto (total gastos capitales)

Tabla 6.

Consolidades de los gastos capitales.

Subsistema	Inversión (COP)
Paneles solares, baterías	\$56,080,000,00
Bombeo de agua	\$31,750,000,00
Cercado eléctrico e iluminación	\$9,400,000,00
Ingeniería e instalación (15%)	\$14,584,500,00
Inversión total	\$111,814,500,00

Nota. Esta tabla expone los costos de inversión total para la implementación de este proyecto.

El 15% es una estimación estandarizada y aceptada en la industria para cubrir todo el "saber-hacer" y el trabajo físico necesario para convertir una lista de equipos en un proyecto funcional, seguro y garantizado.

El análisis de costos de inversión (CAPEX) para el proyecto integral de modernización y electrificación de la finca arroja una inversión total de \$111,814,500 COP. El componente principal de esta inversión es el Subsistema de Suministro de Energía, que representa el 63% del costo total, seguido por el Subsistema de Bombeo de Agua con un 26%. Los subsistemas de Cercado Eléctrico e Iluminación constituyen el 11% restante. Esta inversión inicial establece la base para un sistema energético autónomo y de bajos costos operativos a largo plazo.

7.2. Análisis Comparativo con Otras Fuentes de Energía Renovable.

Con el fin de validar la selección del sistema solar fotovoltaico como la solución óptima para la Finca San José de Nazareth, se realiza una evaluación comparativa detallada frente a otras tres tecnologías de energía renovable con potencial de aplicación en el entorno rural y ganadero: la eólica, y la hidráulica.

7.2.1. Análisis energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se establece como la alternativa más viable para el proyecto. Su principal fortaleza radica en la alta y predecible disponibilidad del recurso solar en la región de Palmar, Santander, con un promedio anual de 4.2 Horas Sol Pico (HSP), lo que garantiza una generación de energía constante y fiable durante todo el año (PVGIS, 2024). La tecnología es modular, lo que permite un diseño a la medida y futuras ampliaciones de manera sencilla. A nivel operativo, su complejidad es prácticamente nula, ya que el sistema es automatizado y su mantenimiento es mínimo. Económicamente, aunque representa una inversión inicial media, su

costo de operación casi cero y su larga vida útil la convierten en la opción con el menor costo nivelado de energía (LCOE) a largo plazo.

7.2.2. Análisis energía eólica

La viabilidad de la energía eólica depende directamente de la velocidad y constancia del viento. Para la ubicación del proyecto, esta alternativa fue descartada por un recurso eólico insuficiente. Según el Atlas Eólico de Colombia (UPME, 2015), la zona del proyecto presenta velocidades de viento promedio anuales muy por debajo de los 4.5 m/s requeridos para que una turbina de pequeña escala opere de manera eficiente y rentable. La baja densidad energética y la intermitencia del viento en la región no permitirían satisfacer de forma fiable la demanda de la finca, especialmente el pico de potencia de la bomba, haciendo de esta una inversión técnicamente inviable y económicamente injustificada.

7.2.3. Análisis energía hidráulica

A pesar de la presencia del Río Suárez como fuente de agua continua, la implementación de un sistema micro hidráulico se descartó debido a dos barreras principales: la alta complejidad técnica y una inversión inicial prohibitiva. Un sistema de este tipo requeriría de importantes obras civiles, como una bocatoma y una larga tubería de carga, para crear el desnivel (caída) necesario para generar potencia. Estas obras, además de su elevado costo, conllevan la necesidad de realizar estudios hidrológicos detallados y tramitar permisos ambientales complejos ante la autoridad competente. Aunque la energía micro hidráulica podría ofrecer una generación constante (24/7), el costo y la complejidad de su instalación la sitúan fuera del alcance práctico y económico de este proyecto de factibilidad.

8. Conclusiones

El presente trabajo de grado se desarrolló con el propósito de diseñar una solución energética sostenible y económicamente viable para la modernización de la Finca San José de Nazareth, abordando la problemática de la falta de un suministro eléctrico confiable en el sector rural. A través de un análisis de ingeniería detallado y una evaluación comparativa rigurosa, se ha demostrado que es factible implementar un sistema autónomo basado en energías renovables que no solo satisface las necesidades operativas de la finca, sino que también mejora su rentabilidad y reduce su impacto ambiental, cumpliendo así con la justificación inicial del proyecto.

En respuesta a los objetivos específicos planteados, se obtuvieron los siguientes resultados lógicos y cuantificables. Primero, se realizó la caracterización energética integral de la finca, determinando una demanda diaria de 15.5 kWh y una potencia pico de 4.7 kW. El análisis cualitativo identificó al sistema de bombeo de agua como la carga más crítica, lo que se confirmó cuantitativamente al representar el 58% del consumo total. Segundo, se calculó y diseñó cada uno de los subsistemas requeridos para la operación de 50 novillos, desde el cercado eléctrico hasta los sistemas de iluminación y confort animal, obteniendo un perfil de carga detallado que sirvió como base para el diseño del suministro de energía. Finalmente, la comparación de alternativas energéticas concluyó de manera inequívoca que un sistema solar fotovoltaico es la opción más eficiente y sostenible.

Las contribuciones de este trabajo trascienden el ámbito local de la finca. A nivel regional, este proyecto se constituye como un modelo técnico y económico replicable para cientos de explotaciones ganaderas en Santander y otras zonas no interconectadas de Colombia, ofreciendo un plan detallado para mejorar la productividad y la competitividad del sector agrícola. A nivel

nacional, esta investigación aporta una solución práctica y validada a los objetivos de transición energética, seguridad alimentaria y desarrollo rural sostenible, demostrando cómo la ingeniería mecánica puede aplicarse para fortalecer la economía del campo y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, en línea con las políticas de desarrollo del país.

La toma de datos, aunque precisa, se basó en herramientas de georreferenciación satelital (Google Earth, 2024) para la topografía y en bases de datos climatológicas para el recurso solar (PVGIS, 2024); si bien estos métodos son estándar para estudios de factibilidad, una validación en campo con equipos de topografía y piranómetros podría refinar aún más los resultados. De igual manera, el perfil de demanda energética se calculó sobre un modelo operativo estandarizado, por lo que variaciones en la rutina de la finca podrían generar desviaciones en el consumo real. Finalmente, el análisis de costos (CAPEX) es una fotografía del mercado en un momento específico, estando sujeto a la volatilidad de los precios de los equipos y la tasa de cambio. Estas limitaciones definen el alcance del presente trabajo como un diseño de ingeniería de alta precisión, recomendándose la verificación en sitio y la actualización de cotizaciones en la fase de ejecución del proyecto.

9. Recomendaciones

Implementar la Solución Fotovoltaica: Se recomienda la ejecución del proyecto de electrificación mediante el sistema solar fotovoltaico diseñado, ya que representa la alternativa más rentable, sostenible y técnicamente robusta a largo plazo para la Finca San José de Nazareth.

Verificar Parámetros Críticos en Campo: Antes de la adquisición final de los equipos, es crucial realizar una validación topográfica en sitio para confirmar la altura estática de 63.4 metros.

Aunque los datos satelitales son fiables para la factibilidad, una medición en terreno eliminará cualquier margen de error en el parámetro más sensible del diseño.

Establecer un Plan de Mantenimiento Preventivo: Para garantizar la longevidad y el rendimiento del sistema, se debe crear un cronograma de mantenimiento que incluya la limpieza semestral de los paneles solares, la inspección visual anual de las conexiones de las baterías y la verificación del estado del inversor y las protecciones eléctricas.

Capacitar al Personal de la Finca: Es fundamental que el personal encargado reciba una capacitación básica sobre el funcionamiento y monitoreo del sistema fotovoltaico. Esto debe incluir la interpretación de indicadores, el procedimiento de apagado de emergencia y la identificación de alarmas para reportar anomalías de manera oportuna.

Instalar un Sistema de Monitoreo Remoto: Se recomienda fuertemente la inclusión de un sistema de monitoreo en el inversor. Esto permitirá registrar en tiempo real la generación y el consumo de energía, comparar el rendimiento real con el teórico de este estudio y diagnosticar fallas de manera remota, optimizando la gestión del sistema.

Referencias Bibliográficas

- ASABE. (2018). ANSI/ASABE EP344.4: Lighting systems for agricultural facilities. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Datamars Livestock. (2024). Speedrite 3000 Unigizer - Technical Specifications and User Manual. Recuperado el 18 de septiembre de 2025,
- FAO. (2011). *Agua para la ganadería: Guía de buenas prácticas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- IDEAM. (2023). Boletín Agroclimático Mensual - Región Andina. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2023). Atlas Interactivo y Climatológico de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). Renewable power generation costs in 2024. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Livestock Industries. *Journal of Dairy Science*, 86(E-Suppl.), E52-E77.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP). República de Colombia.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2018). *Mecánica de Fluidos* (7ª ed.). Pearson Educación.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). Solar PV system cost benchmark: Q1 2024. U.S. Department of Energy.
- Pavco Wavin. (2022). Manual Técnico de Tuberías de Presión de PVC.
- RETILAP. (2016). Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

Speedrite. (2024). Ficha Técnica Energizador Modelo 3000. Datamars Livestock.

St-Pierre, N. R., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic Losses from Heat Stress by US

UPME. (2019). Estudio de Potencial y Eficiencia Energética en Sistemas de Bombeo Agrícola.

Unidad de Planeación Minero Energética.