

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-10

Artículos

**Implementación de un sistema de bombeo utilizando
una turbina hidráulica sin consumo de energía eléctrica**
**Implementation of a pumping system using a hydraulic
turbine without electric power consumption**

Camilo Andrés Tovar-Trujillo¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6860-9078>

Juan Gonzalo Ardila-Marín², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4461-7195>

Jean Carlos Acosta-Vargas³, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5266-1556>

¹Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia,
ca.andres_08@hotmail.com

²Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, juan.ardila@usco.edu.co

³Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, jean.acosta@usco.edu.co

Autor para correspondencia: Jean Carlos Acosta-Vargas,
jean.acosta@usco.edu.co

Resumen

Debido a la creciente demanda alimenticia en Colombia y el mundo es urgente mecanizar el campo e implementar nuevas tecnologías en el sector agrícola para mejorar la producción. El Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC implementó un sistema de bombeo con energía hidráulica en la finca La Esperanza (Rivera-Huila) para suplir la necesidad hídrica en épocas de estiaje. La bomba transporta 70 m³/día de agua a un reservorio a 32.32 metros de altura para su almacenamiento y distribución, lo que permite obtener suficiente forraje para la ganadería. Se compararon dos sistemas de bombeo: la bomba ZM Maxxi y una electrobomba convencional. Aunque la ZM Maxxi tiene un mayor costo de instalación, la electrobomba tiene un costo anual de consumo de energía eléctrica de 12 146 112 COP (\$USD 2 958). El uso de la ZM Maxxi, que utiliza energía renovable, permite ahorrar este monto anualmente. Tras los estudios económicos y de diseño, se seleccionó la ZM Maxxi y se procedió a su instalación. La bomba entrega 68 570 litros de agua diarios, que benefician la parte alta de la finca y permiten recuperar la inversión a mediano plazo.

Palabras clave: hidráulica, bomba alternativa, energías renovables, sistemas de riego, bombeo.

Abstract

Due to the increasing food demand in Colombia and worldwide, it is imperative to mechanize the agricultural sector and implement new technologies to improve production. The GEOMAAC Engineering Technology Centre has implemented a hydraulic-powered pumping system at La Esperanza farm (Rivera-Huila) to address the water needs

during dry seasons. The pump transports 70 m³/day of water to a reservoir located at 32.32 meters in height for storage and distribution, ensuring sufficient forage for livestock. Two pumping systems were compared: The ZM Maxxi pump and a conventional electric pump. Although the ZM Maxxi has a higher installation cost, the conventional electric pump incurs an annual electricity consumption cost of 12 146 112 COP (\$USD 2 958). The use of the ZM Maxxi, which utilises renewable energy, allows for annual savings of this amount. After conducting economic and design studies, the ZM Maxxi was selected, and its installation was carried out. The pump delivers 68 570 litres of water daily, benefiting the higher areas of La Esperanza farm and allowing the investment to be recouped in the medium term

Keywords: Hydraulics, alternative pump, renewable energies, irrigation systems, pumping.

Recibido: 14/10/2024

Aceptado: 14/03/2025

Publicado *ahead of print*: 31/03/2025

Versión final: 01/11/2025

Introducción

La agricultura ya no se limita a transferir recursos para el fomento de la industrialización por lo que se convierte en un sector capaz de desempeñar funciones importantes para el desarrollo económico (Bermeo-Mayancela, 2022). En Colombia, el sector agropecuario genera cerca del 20 % de empleo en el país, y casi el 50 % en sector rural

(Leibovich & Estrada, 2008). En 2024, se registraron aproximadamente 3.3 millones de trabajadores en el sector agropecuario colombiano (UPRA, 2024). Un plan integrado dirigido al sector deberá tener en cuenta la relación entre la mecanización agrícola y los recursos naturales, donde la máquina interactúa con cada recurso y, a la vez, los recursos entre sí, donde la contaminación de uno afecta al otro (Díaz-Rodríguez, & Pérez-Guerrero, 2007). La tecnología es aplicable en las áreas de agricultura, lo que permite la disminución de tiempo y costes de las diferentes labores agrícolas (Santos, 2018); los productores deben estar abiertos a buenas prácticas agronómicas, tecnológicas y de mecanización (Gras & Hernández, 2016). Sin embargo, no se ha llegado a una utilización total de la maquinaria debido sobre todo al alto valor de los equipos, pues casi todos son importados (Polanco-Puerta, 2007).

En su gran mayoría, en Colombia se capta y distribuye el agua por efecto de la gravedad; en muy pocos casos en el riego se presenta la captación y distribución por medio de bombeo, es decir, que se cuente con un sistema de bombas y un consumo energético para su funcionamiento (Palacio-Castañeda, 2010). En La Esperanza (ubicado en el municipio de Rivera-Huila), perteneciente a la subcuenca de Río Frío, la mayor demanda existente son los cultivos; en orden descendente: cacao, pastos manejados, cultivos transitorios, uso doméstico, cultivos permanentes y el uso pecuario. Para los periodos de junio, julio y agosto no existe agua disponible para satisfacer la demanda del recurso. La finca La Esperanza carece de alternativas para el mejoramiento de sus sistemas de riego para sus cultivos de forraje para ganado, pues en épocas de poca lluvia, el alimento es deficiente para estos animales y en consecuencia los productos derivados de dichos animales no tienen el mismo rendimiento. Dentro de la finca, en su parte alta, hay un reservorio que es alimentado

por afluentes y piscícolas que están muy próximos al predio, que es aprovechada por los cultivos para ganadería, dado que la agricultura de la Finca, en su mayor parte, se encuentra en las partes más bajas de la zona, donde se dispone de una represa que es alimentada por el Río Frío y mantiene un buen nivel permanente. En la Figura 1 se muestra el perfil longitudinal, que va desde la presa hasta el reservorio; tiene una diferencia de altura de 22 metros y una distancia de 652 metros.

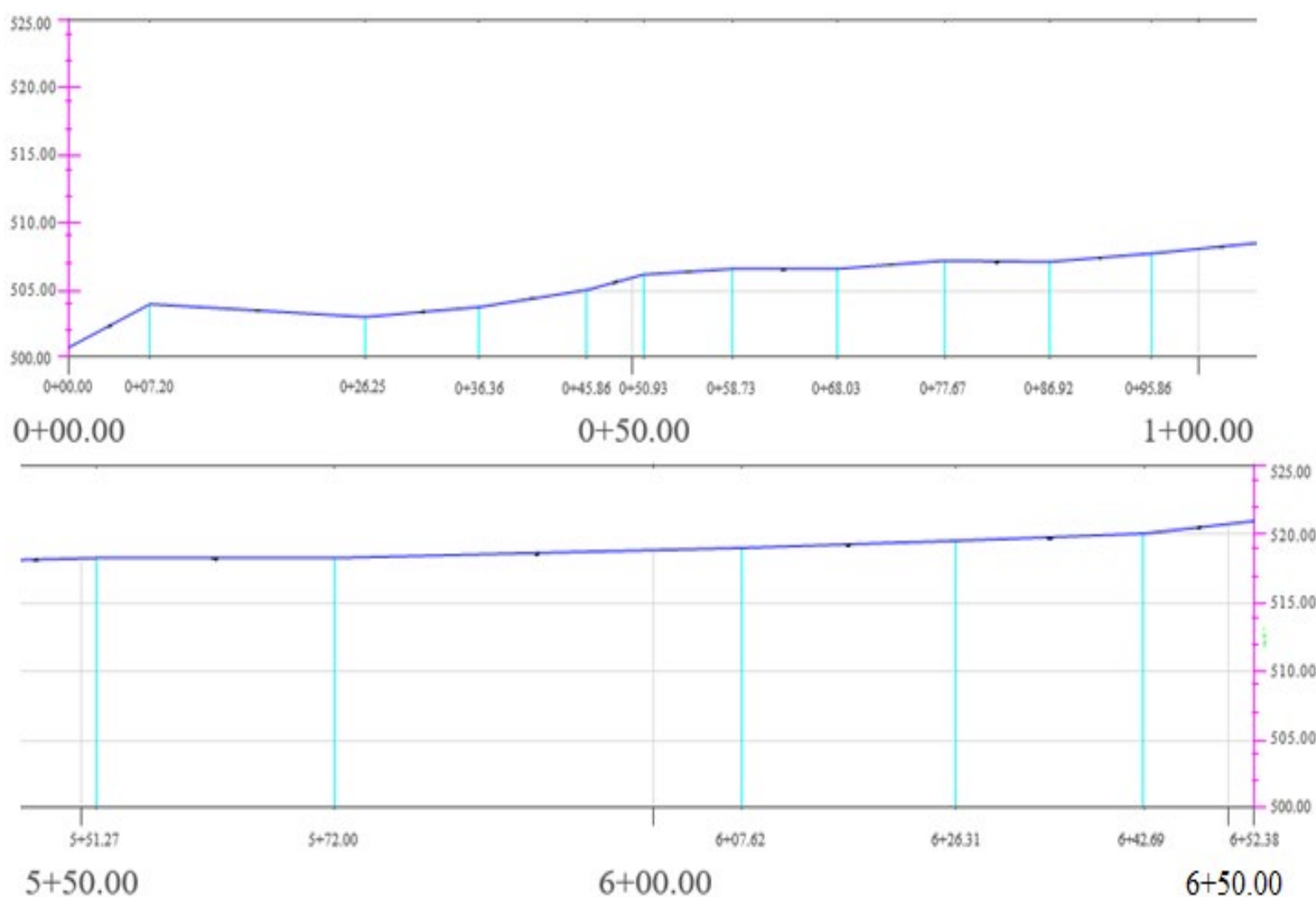


Figura 1. Perfil longitudinal del terreno (tramo de 0 a 100 m y de 550 a 652 m).

El aprovechamiento de las aguas de la parte alta y el uso eficiente de ellas es de gran importancia para la producción en el cultivo de forraje para ganado, pero en época seca el reservorio no mantiene el nivel adecuado para el riego en la zona. Partiendo de estos hechos, el problema principal era el bajo aprovechamiento de la parte alta del predio debido a que, en los meses secos, no había suficiente recurso hídrico para la producción de forraje.

En el Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC S.A.S. surgió este proyecto con el objetivo de implementar un sistema bombeo sin consumo de energía eléctrica para la producción de forraje para ganado en la finca La Esperanza, para lo cual fue necesario calcular y seleccionar una bomba hidráulica ZM® apropiada a las condiciones del sitio, a fin de proceder a su instalación, verificar la puesta en marcha del sistema implementado, y demostrar la ventaja que tiene este sistema comparado con otros. La selección de las marcas ZM® para bombeo a partir de energía hidráulica, y Pedrollo® para bombeo convencional con energía eléctrica, busca compararlos, y resulta adecuada y necesaria para el estudio debido a que ambos fabricantes son accesibles en el mercado local, lo que facilita su implementación y mantenimiento. Limitar el análisis a solo dos fabricantes con tecnologías marcadamente diferentes asegura una metodología enfocada y evita diluir los resultados en una comparación demasiado amplia; ello permite profundizar en el análisis de cada sistema, que destaca las ventajas y limitaciones de cada uno dentro del contexto agrícola.

Propósito del proyecto

El proyecto buscó la implementación de un sistema de bombeo sin consumo de energía eléctrica para la producción de forraje para ganado en la finca La Esperanza. Para esto, se propuso calcular y seleccionar la bomba hidráulica ZM® apropiada a las condiciones del sitio, verificar la puesta en marcha del sistema implementado y demostrar la ventaja que tiene ese sistema comparado con una alternativa convencional que sí consumiera energía eléctrica.

En La Esperanza, en épocas de sequía, la producción de forraje para el ganado era mínima; bajo la implementación de este sistema de bombeo hidráulico, que aprovecha la energía hidráulica del caudal saliente de la represa para bombear agua a las zonas superiores sin consumo de energía eléctrica, se logró mejorar la generación agrícola del cultivo, que implicará un aumento en cuanto a rendimientos y longevidad del cultivo; además, incrementará la calidad de vida de los habitantes de la finca. En la Figura 2 se presenta un esquema global del sistema desarrollado en este proyecto, con el que se busca orientar al lector para mejorar su comprensión de las secciones que a continuación describen la metodología de diseño y comparación entre las dos tecnologías descritas, y los resultados y discusión que llevan a las conclusiones del presente estudio.

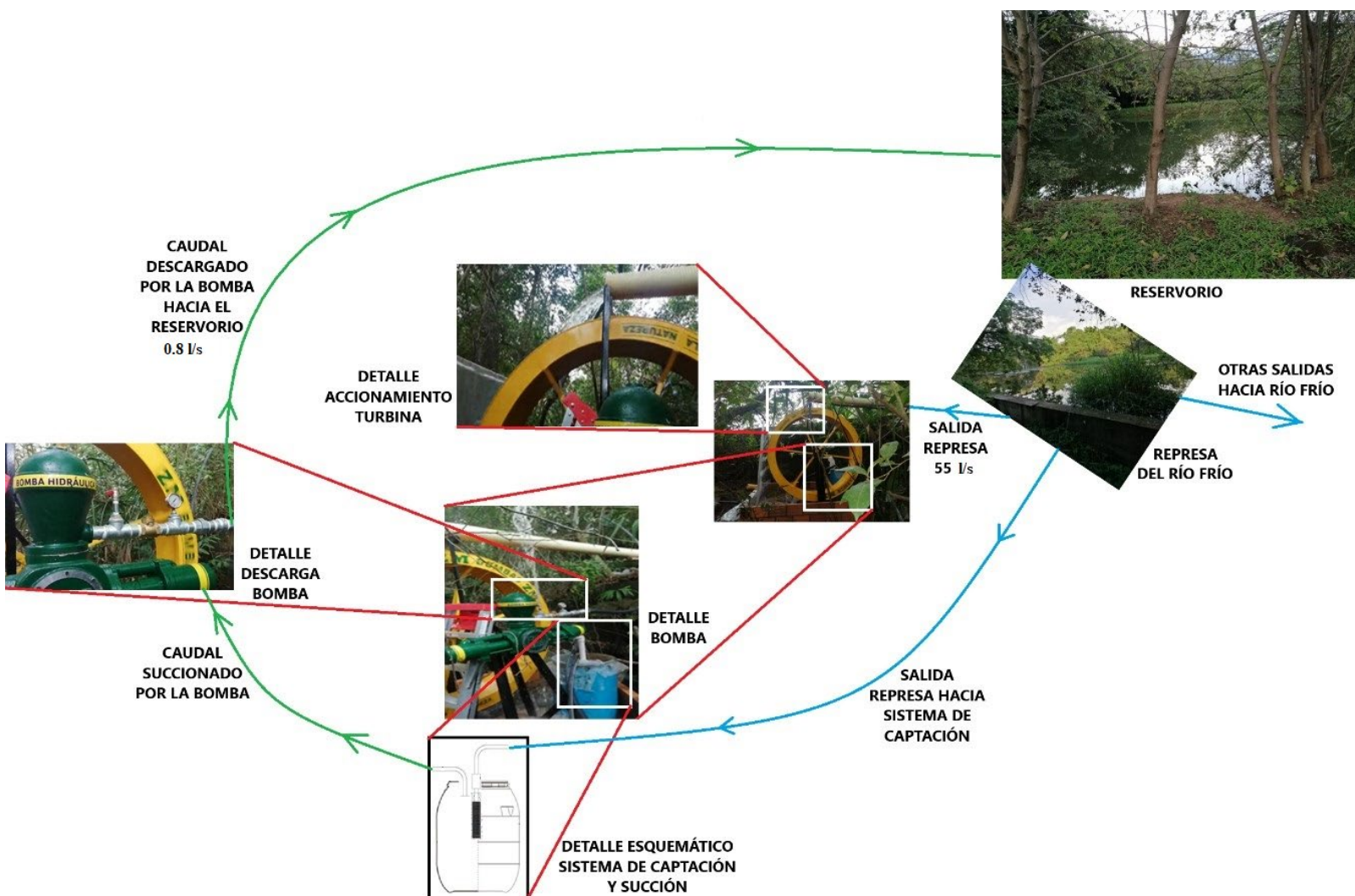


Figura 2. Esquema global del proyecto.

Materiales y métodos

Especificación del problema

La finca La Esperanza se ubica en la vereda Río Frío a unos diez minutos de la ciudad de Neiva, municipio de Rivera, subcuenca de Río Frío, que cubre un área de 62 km² aproximadamente, que representa el 16.7 % del área del municipio de Rivera. En la Figura 3 se aprecia la ubicación del

municipio. Entre los principales ríos están el Río Negro, Río Blanco y la Dinda, que abastecen los acueductos del casco urbano de Rivera y las veredas del Salado, Alto Guadual y Llanitos, así como a la zona rural de las veredas Termopilas, Alto Pedregal y parte del Bajo Pedregal. Según la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), la mayor demanda existente son los cultivos, pero para los periodos de junio, julio y agosto no existe agua disponible para satisfacer la demanda.



Figura 3. Ubicación del municipio de Rivera (arriba); finca La Esperanza y ubicación del proyecto (abajo).

De inicio se hizo el reconocimiento del lugar, con el fin de tener una idea de su ubicación, dimensión y su distribución. El predio es usado para distintas labores de campo, como la ganadería principalmente, crianza equina y para el cultivo de maíz. La finca cuenta también con grandes extensiones boscosas y a través de ella pasa el Río Frío, que abastece de agua para las distintas labores agrícolas de la zona. Mediante el *software* Google Earth y las indicaciones dadas por los propietarios del predio, se logró obtener la ubicación exacta de la zona, además de sus limitaciones para después hacer el levantamiento topográfico.

En la Figura 3 se demarcan los límites de la finca y se define, en el punto denotado como "Bomba Pelton", la ubicación de la salida de la represa que provee un caudal de 55 l/s, que accionará la rueda hidráulica para bombear el recurso hídrico hacia el "Reservorio", que es alimentado por afluentes y piscícolas que están muy próximos al predio, pero que en época seca no mantiene el nivel adecuado para el riego en la zona. La Figura 3 muestra el trazado de la línea de conducción de agua desde la represa de la parte baja hasta el reservorio. La topografía del terreno se tomó con la ayuda de un dron EVO II Pro 6K suministrado por la empresa Huésped. Se consiguió crear un mapa de alta resolución con los detalles cartográficos y con ello se corroboró la información suministrada. El mapa elaborado puede apreciarse en la Figura 4. Se identificaron con exactitud las zonas para el cultivo del maíz, zonas boscosas, potreros, reservorio, represa, ubicación de la finca e incluso vías de acceso. La información más relevante se reporta en la Tabla 1. Al obtener toda la información de campo gracias al levantamiento, se procedió con los trabajos de digitalización y procesamientos de datos. Con el apoyo del *software* ArcGIS® se realizaron los mapas de planimetría, curvas de nivel, modelo de elevación digital y un ortomosaico del predio.

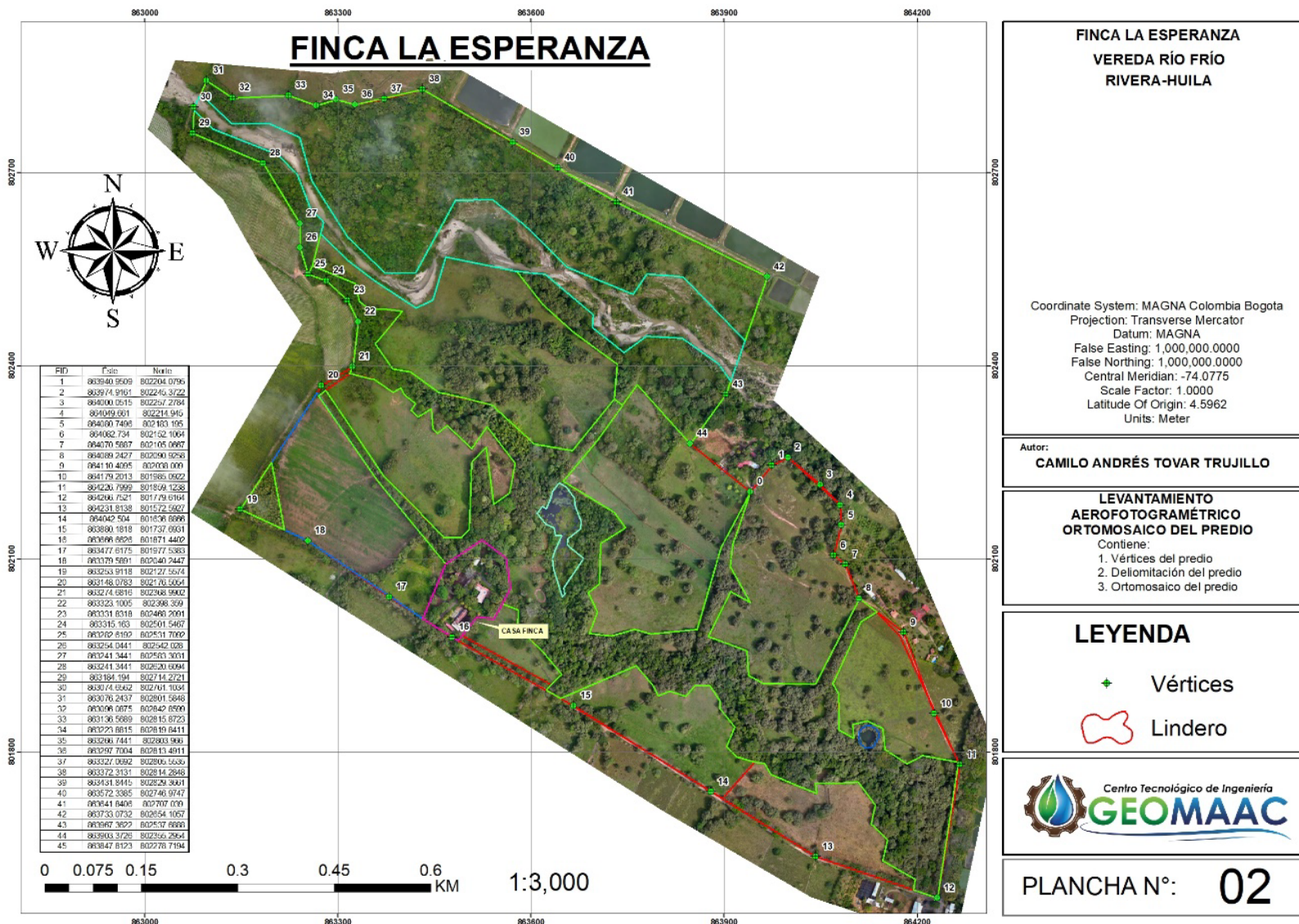


Figura 4. Mapa detallado de la finca La Esperanza.

Tabla 1. Datos topográficos y cartográficos relevantes de la finca La Esperanza.

Coordenadas		Altura máxima del predio	Altura mínima del predio
86.3503,75 E	80.2051,30 N	611 msnm*	468 msnm

*metros sobre el nivel del mar.

Bomba hidráulica ZM

El trabajo que se realiza por medio de la bomba hidráulica ZM utiliza la energía cinética y potencial de un caudal del agua que mueve una turbina (rueda) para aprovechar esa energía (Figura 5). El movimiento o energía es trasladado a un eje, que hace girar una bomba, la cual absorbe el agua para luego ser impulsada. No requiere de energía convencional como electricidad o derivados del petróleo (Guaña-Quilumba & Quishpe-Sacancela, 2018).



Figura 5. Bomba ZM Maxxi. Fuente: ZM Bombas (2020).

La bomba ZM Maxxi es una bomba alternativa de doble efecto que aprovecha la energía hidráulica producida por el impulso del agua en los cajones de una rueda metálica, este peso del agua hace que la rueda gire y mediante el uso de un punto excéntrico (3) (Figura 6) en un disco metálico (1), se produce el movimiento de dos pistones (4), que en términos prácticos funcionan como jeringas succionando e impulsando el agua a través de las válvulas de retención (7 y 8), las que permiten el paso a la cápsula de aire o caballete (9), y de este a la tuberías de bombeo.

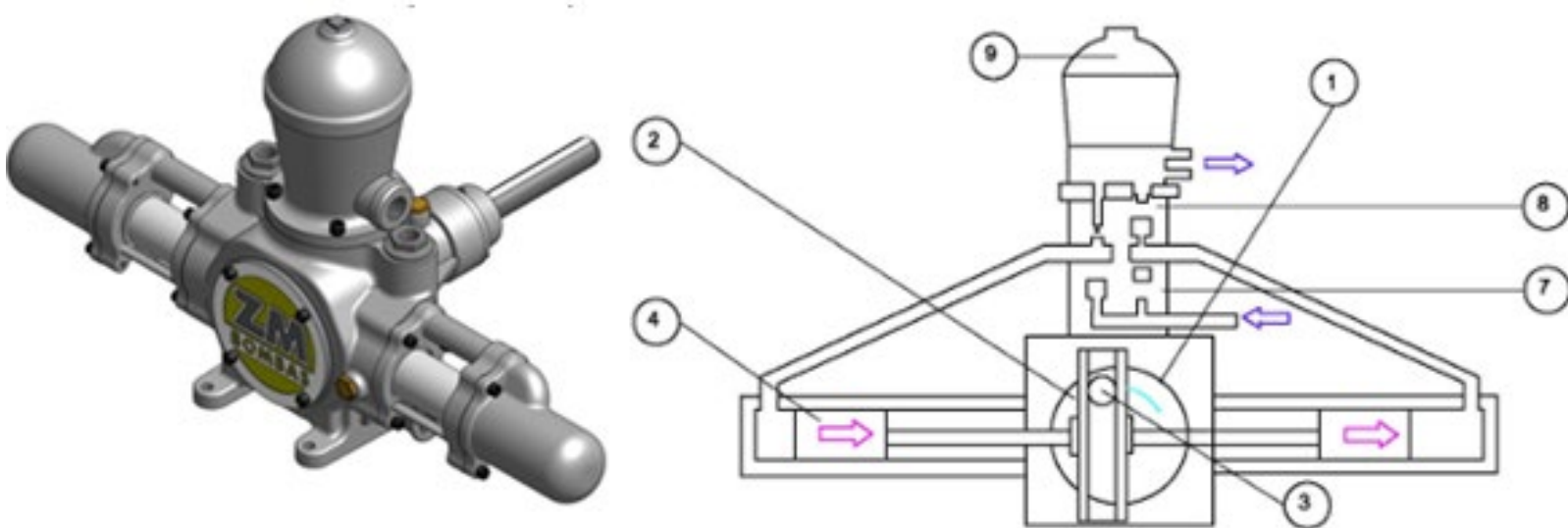


Figura 6. Corte transversal Bomba ZM Maxxi. Fuente: ZM Bombas (2020).

Electrobomba con rodete periférico

Ahora se presenta la bomba periférica (Figura 7) como la alternativa a considerar en el presente proyecto, pues una de las metas es demostrar la viabilidad y conveniencia del uso de la bomba con fuente de energía

hidráulica; las electrobombas de rodete periférico son similares a las bombas centrífugas, con la diferencia de que en este tipo de bomba el líquido no ingresa al cuerpo axialmente sino periféricamente como la descarga (1); ya en el cuerpo es impulsado desde la entrada (succión) hasta la salida (descarga) por medio de los álabes del rodete (2) a velocidades muy altas dentro del canal anular (3), donde este gira tras realizar un recorrido de casi 360°. El cuerpo de la bomba está acoplado en dirección axial al motor eléctrico, pero el acople (4) aloja en su interior un sello (5) que impide el paso del fluido al motor, lo que evita cortocircuitos. El rodete recibe potencia mecánica del rotor del motor eléctrico a través del eje (6), que gira con suficiente libertad apoyándose en cojinetes de rodamientos rígidos de bolas (7) que están sellados y en su interior se encuentran lubricados con grasa. El rotor de jaula de ardilla y sus laminados giran por inducción electromagnética persiguiendo el campo magnético giratorio ocasionado en el devanado del estátor (8) por la corriente eléctrica que es alimentada por las borneras en la parte superior del motor de la electrobomba, y que se consume y determina el coste de operación que será analizado más adelante para realizar la comparación tecno-económica entre las dos tecnologías en el presente estudio.

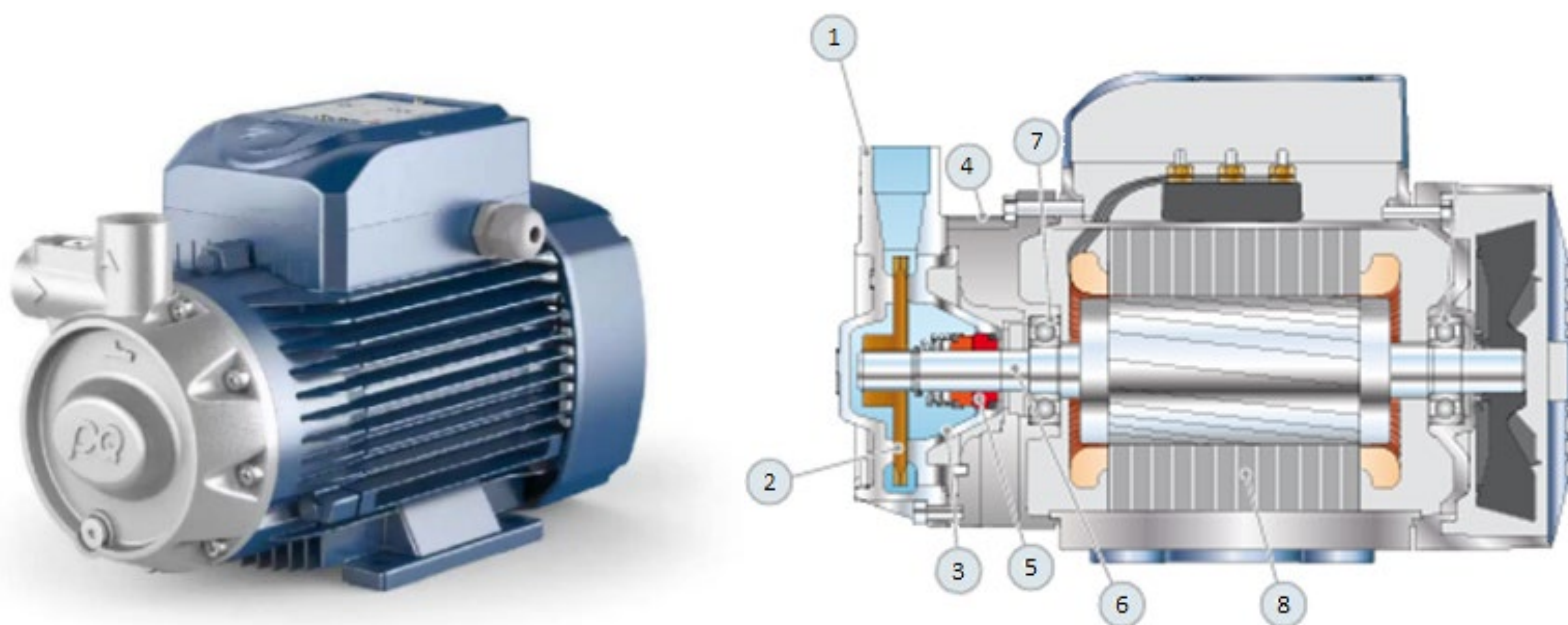


Figura 7. Electrobomba periférica Pedrollo® con corte transversal.
Fuente: Pedrollo (2023).

Selección de la bomba ZM

Para el cálculo y selección de la bomba ZM se requirió en primera medida establecer cuáles son las necesidades, pues con base en las necesidades se dimensionan el diámetro de la tubería, pérdidas y altura máxima de descarga. La diferencia de altura de 22 m y la distancia a la cual se debe llevar el agua es de 688 m, que se definieron por medio del levantamiento topográfico; además, el caudal que de 70 m³/día. Una vez definido lo anterior, se consultó el manual técnico del fabricante sugerido por la empresa. El modelo de la bomba se define a partir de la valoración de la altura y el caudal en el catálogo del fabricante, que se ajusten a las condiciones establecidas. De acuerdo con esto, ya elegido el modelo de la

bomba a usar, se procede a establecer el modo de regulación que mejor se ajuste a las condiciones del sistema de abastecimiento, es decir a la curva consigna que se muestra en la Figura 8. Teniendo clara la bomba a emplear, se dirigió a la tabla de diámetro y ancho de la rueda, que será la encargada del accionamiento de todo el sistema.

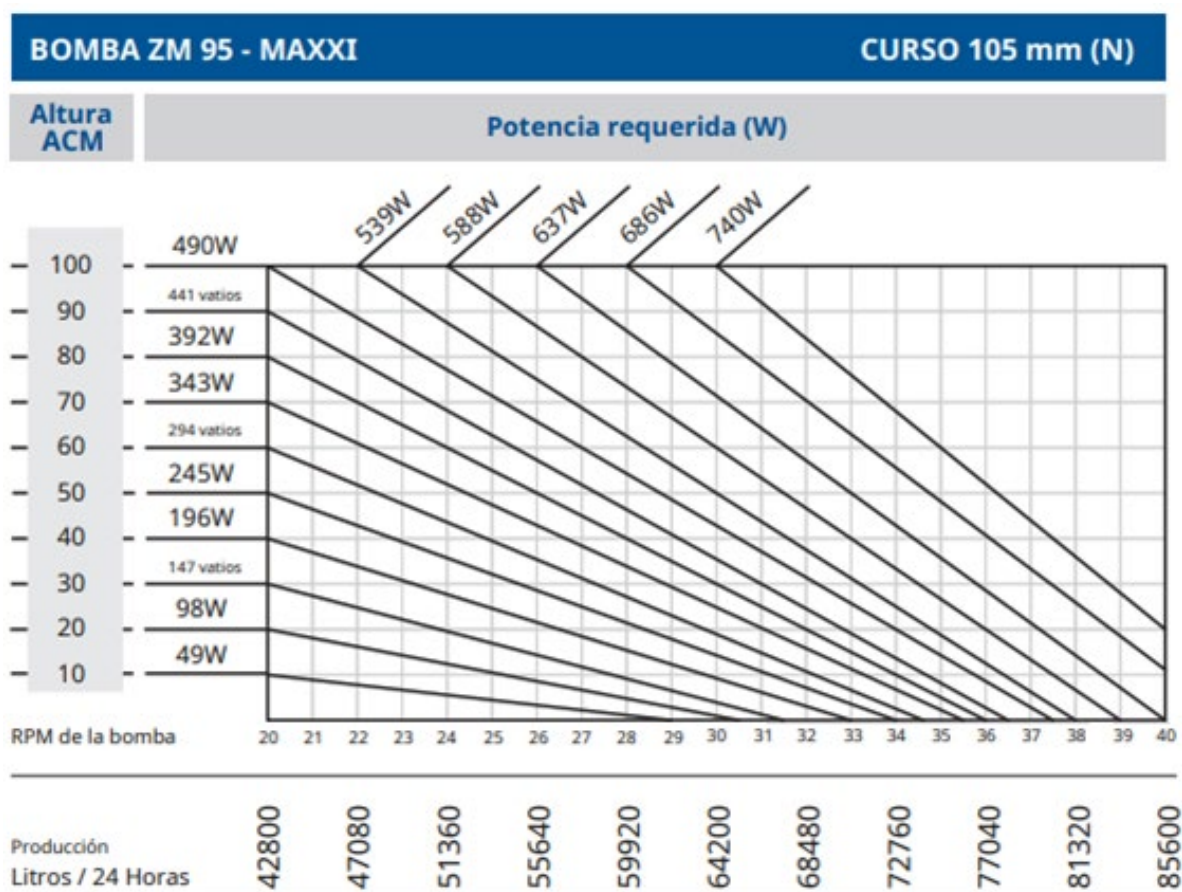


Figura 8. Curva consigna de bomba ZM 95 MAXXI. Fuente: ZM Bombas (2020).

Después, con la ayuda del *software* ArcGIS®, se procedió con la elaboración del plano de trazado de la tubería de descarga (línea de

conducción), a fin de conocer por dónde se llevará la línea de conducción y su longitud exacta, que será importante tener claro a la hora de realizar los cálculos, instalación y elaboración del presupuesto. Para finalizar se realizó el presupuesto, que se dividió en seis capítulos, levantamiento aerofotogramétrico, adecuación del terreno, placa de concreto, red hidráulica, sistema de bombeo y costos indirectos.

Diseño, selección y montaje del conjunto con accesorios

Para iniciar con la instalación del sistema se seleccionó un lugar que fuera de sencillo acceso, accesible captación de agua sobre la rueda y fácil succión de agua a ser bombeada; se adecuó el terreno con una limpieza del lugar, y remoción de todo tipo de vegetación y escombros que podrían interferir en la instalación y funcionamiento del sistema. Posteriormente fue necesario construir una placa de concreto para el soporte de todo el montaje. La Norma ACI351.3R-04 "Foundations for Dynamic Equipment", establece tipos de cimentaciones para maquinarias. En el caso de la aplicación actual, el tipo de estructura más adecuado es la cimentación tipo bloque (Arias, Olaya, & Ardila, 2021). El criterio utilizado para el dimensionamiento de la placa de hormigón es de la relación de masas, el cual indica que se propone una cimentación cuyo peso sea de 3 a 5 veces el peso de la maquinaria (Chávez-Schaw, 2014). La placa fue hecha en función de las dimensiones y el peso de la bomba, que es de unos 300 kg; la placa es de 3 x 3 m, con un espesor de 10 cm, que sería el equivalente a un volumen de 0.9 m³ de concreto y tendría un peso aproximado de 2 100 kg. Una vez curado el concreto, se fijó el caballete

sobre la base de albañilería, la bomba sobre el caballete y finalmente la rueda sobre el eje de la bomba (Figura 9).

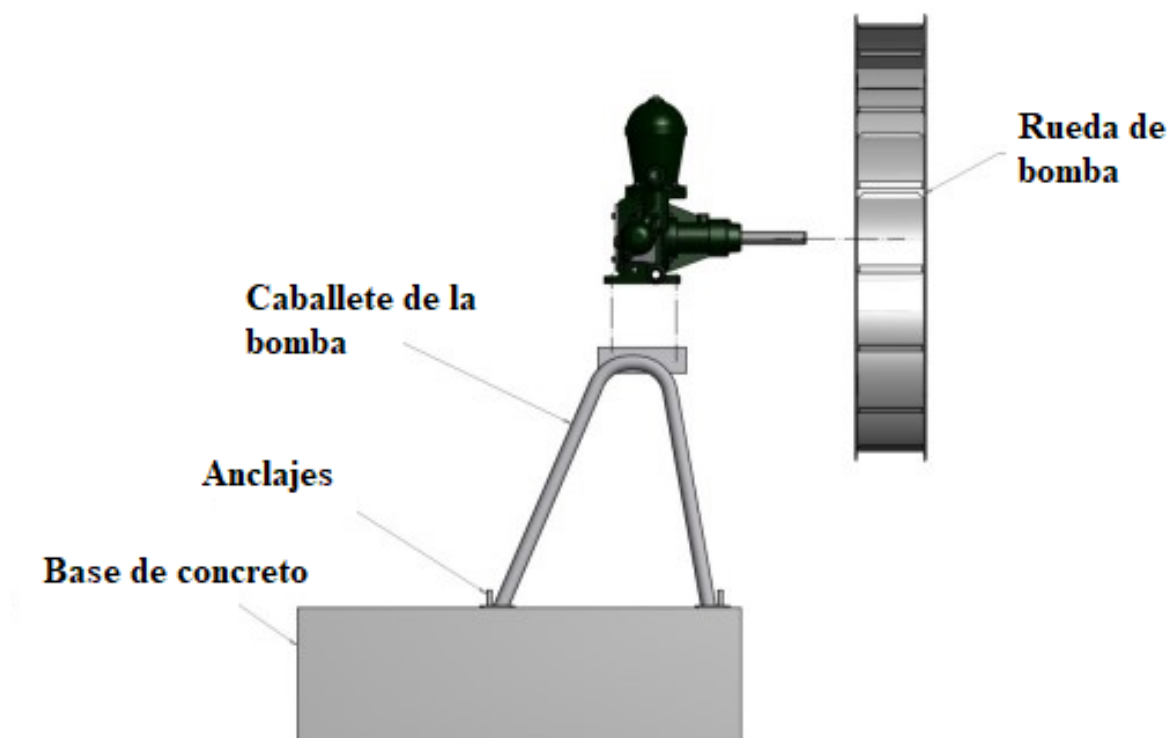


Figura 9. Recomendaciones básicas para el montaje del conjunto de bomba hidráulica ZM®. Fuente: ZM Bombas (2020).

Sistema de captación y succión de agua

Para el sistema de captación se colocó una manguera que lleva por gravedad el agua de la represa a un depósito; en este caso, un tambor plástico de un volumen de 200 litros, pues es la cantidad mínima requerida para un funcionamiento de succión adecuado. Como el agua a ser captada está por encima del nivel de la bomba, el tambor plástico se instaló a unos 50 cm por debajo del nivel de la bomba. Unas de las

consideraciones que se tuvieron en este punto fue la instalación de una malla a la entrada de la manguera de captación y de la tubería que descarga el agua para el accionamiento de la rueda debido a que la represa presenta un alto contenido de algas y demás materiales en suspensión. Esto, a fin de entregar una mejor calidad de agua al sistema y evitar taponamientos que pudieran perjudicar el funcionamiento y la vida útil del mismo.

Sistema de accionamiento de la rueda

Para obtener un mayor potencial hidráulico fue necesario efectuar el sistema de alimentación de la rueda observando algunos puntos fundamentales recomendados por ZM Bombas (2020), como puede apreciarse en la Figura 10: (1) que la tubería de suministro o descarga de agua quedara situada a unos 10 cm por encima de la rueda y (2) el posicionamiento del tubo hasta, aproximadamente, el centro de la rueda (3), con una inclinación de 3 a 5 % de la longitud (4), y que la distancia de la rueda hasta la placa de concreto fuera de unos 10 cm.

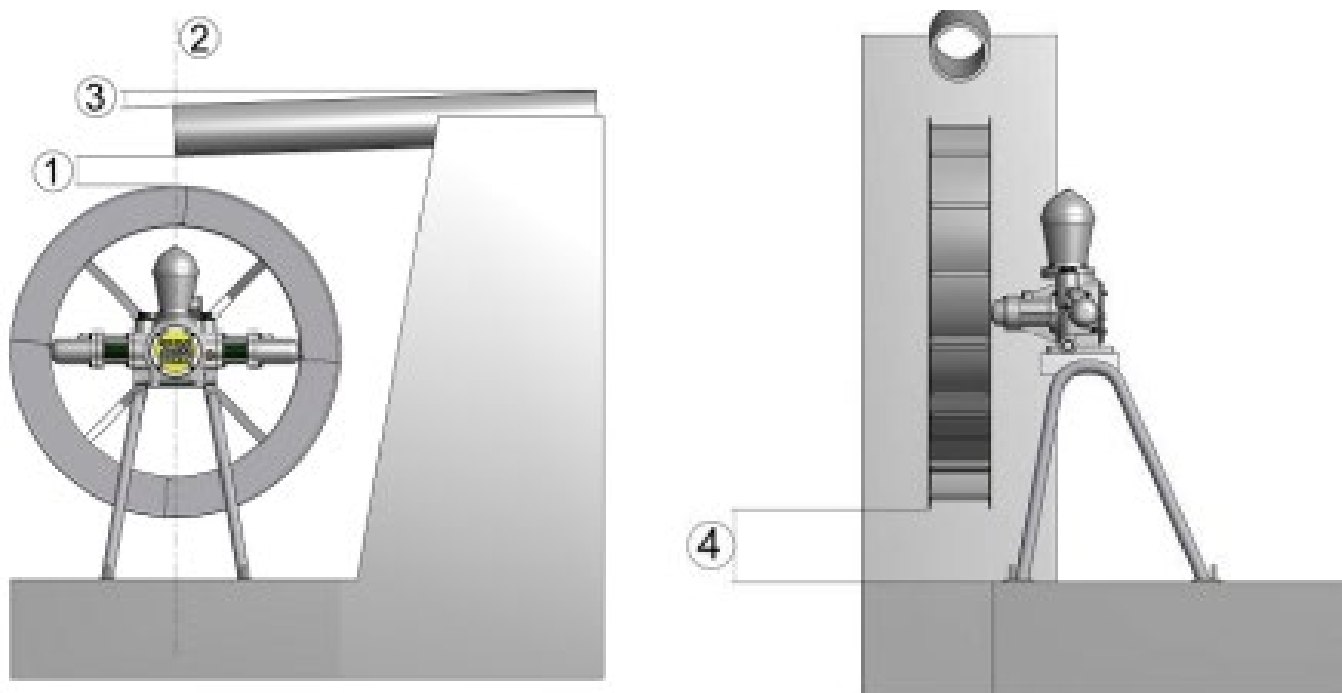


Figura 10. Sistema de accionamiento bomba ZM. Fuente: ZM Bombas (2020).

Sistema de descarga

Para la instalación de la tubería de descarga se fijó la bomba con la salida hacia donde se colocó la tubería; además se instaló un manómetro, una válvula de bola y una válvula de retención (válvula check) al inicio de la tubería de descarga, para retener el agua que está en la tubería, con el propósito de evitar un giro contrario de las hélices cuando no esté funcionando o se requiera hacer algún tipo de mantenimiento.

Como se determinó que la línea de descarga es de manguera de polietileno, se utilizó un diámetro mayor al arrojado en los cálculos (ver la sección de Resultados) al inicio de la tubería, en función de las enmiendas internas de la manguera que son de menor diámetro.

Una vez puesta la manguera hasta el reservorio, se verificó por medio de aforo que el caudal a ser bombeado llegara hasta su destino; una vez que se comprobó, se detuvo el sistema para finalizar el proceso de instalación y se enterró la manguera de conducción a unos 30 cm de profundidad aproximadamente, para que no interviniera con las labores agrícolas.

Puesta en marcha

Previo a la puesta en punto del sistema, se hizo el cebado de la bomba, que consistió en introducir agua por la válvula de purga con el objetivo de sacar el aire en el interior de la bomba y de la línea de succión para una mejor eficacia al momento de bombear el agua y evitar la cavitación. Luego se verificó que la línea de captación no tuviera taponamiento debido a los materiales en suspensión y algas presentes en la represa, y que el depósito de agua (tambor plástico) se encontrara al nivel requerido para un óptimo funcionamiento de succión.

Una vez hecho lo anterior, se puso en marcha el sistema, dejando caer agua por la tubería de descarga encargada del accionamiento de la rueda de la bomba, constatando que el caudal que manejaba fuera el especificado en el manual de 55 l/s por medio de aforo; después se confirmó que la rueda girara a 33 revoluciones por minuto (rpm) y se finalizó comprobando el caudal entregado al reservorio por la línea de conducción, siendo de 0.81 l/s hallado mediante aforo volumétrico, el necesario para cumplir con los requerimientos hechos por el propietario de 70 m³/día.

Costos de montaje del sistema

En la Tabla 2 se presenta el modelo de bomba hidráulica marca ZM Maxxi, que fue seleccionado en este proyecto, como se mostrará más adelante, con su caracterización.

Tabla 2. Características de la bomba hidráulica ZM 95Maxxi.

Modelo	Altura manométrica máx.	Caudal altura máx.	Altura manométrica mín.	Caudal altura mín.	Temperatura	Vida útil
ZM 95 Maxxi	130 m	85 600 l/día	10 m	42 800 l/día	0-60 °C	30 años

Fuente: ZM Bombas (2020).

En la Tabla 3 se presenta el modelo alternativo escogido para la comparación tecno-económica: la electrobomba de la marca Pedrollo.

Tabla 3. Características electrobomba Pedrollo PQ3000.

Modelo	Potencia	Tensión	Consumo	Frecuencia	Altura manométrica máx.	Caudal altura máx.	Altura manométrica mín.	Caudal altura mín.	Temperatura	Vida útil
PQ3000	3 Hp	220 V	14.2 Amp	60 Hz	180 m	7 200 l/día	0-50 m	72 000 l/día	0-90°C	20 años

Fuente: Pedrollo (2023).

Se evaluaron los costos entre las dos posibles alternativas de bombeo a implementar: bomba ZM 95 Maxxi y electrobomba Pedrollo PQ3000; se tuvo en cuenta la instalación de la red hidráulica, construcción

de la cimentación y mano de obra; para la bomba Pedrollo se hizo necesario la suma del coste de llevar la energía hasta la represa, donde consideraron montaje de postes, trenzado (cableado), herraje y medidor (contador).

Además de los costos de toda la instalación de cada una de las bombas, se tuvo en cuenta la depreciación de cada una de ellas anualmente al momento de la selección. Para la depreciación anual, se utilizó la Ecuación (1) de depreciación lineal:

$$Da = Vi/Vu \quad (1)$$

Da = depreciación anual

Vi = valor inicial del equipo

Vu = vida útil en años

Para los costos de mantenimiento de las bombas se consideraron tareas básicas de limpieza, lubricación, ajustes e inspección visual, a fin de evitar o mitigar las consecuencias de los fallos de los equipos, con lo cual se lograron prevenir las incidencias antes de que ocurrieran. En el caso de la bomba ZM, los costes de mantenimiento preventivo corresponden al cambio de aceite, sustitución de los empaques, lubricación de rodamientos y limpiezas de las válvulas. Para la bomba Pedrollo, el costo de mantenimiento hace referencia a la sustitución y lubricación de empaques o sello mecánico, lubricación de rodamientos y mano de obra. Según recomendaciones dadas por los distribuidores, es necesario realizar mantenimiento cada seis meses para cada una de las

bombas y así mantener la conservación de los equipos, para garantizar un buen funcionamiento y fiabilidad, además de evitar gastos de acciones correctivas.

Resultados

Cálculos para selección de la bomba

Definición de la necesidad. Según se describió en la sección anterior, se determinó que se requería un caudal de agua de 70 000 l/día desde la represa hasta el reservorio, con una diferencia de altura vertical de 22 m y una longitud del tubo de represión estimada en 688 m. Con base en los datos anteriores se dimensionan el diámetro de la tubería, pérdidas y altura máxima de descarga.

Selección del diámetro de la tubería

Se consideró el caudal deseado, así:

$$70\,000\text{ l/día} = 2916.6\text{ l/hora} = 2.916\text{ m}^3/\text{hora}$$

De la Tabla 4 de pérdidas de carga, se establece que, para un caudal mínimo de 2.916 m³/h, aproximado a 3 m³/h, resulta apropiado seleccionar un diámetro de tubería de 1 ½", dado que las pérdidas pueden equivaler al 1.5 % de la longitud de tubería de plástico a través de la cual se conduce el fluido, lo cual se consideró pertinente.

Tabla 4. Cuadro de pérdidas de carga en 100 m de tubería.

Caudal (m ³ /h)	Diámetro (in)		
	1.1/4"	1.1/2"	2"
2.0	2.10	0.7	0.25
2.5	3.10	1.10	0.37
3.0	4.20	1.50	0.5
3.5	5.50	1.95	0.68
4.0	7.00	2.50	0.85

Fuente: ZM Bombas (2020).

Cálculo de la altura de elevación

Se consideró la altura perdida, así:

$$\frac{688 \text{ m}(1,5)}{100} = 10,32 \text{ m}$$

Entonces, la altura total en metros de columna de agua (MCA) se calcula como la suma de la altura de desnivel vertical más la altura perdida, así:

$$22 \text{ m} + 10.32 \text{ m} = 32.32 \text{ m}$$

Selección del modelo de la bomba

Se verificaron los datos de las curvas características en el catálogo y, tal como se mencionó en la sección anterior (Figura 8), se consideró apropiada la bomba ZM95 (N), configurada con un curso de 105 mm para una altura MCA (metros columna de agua) de 32.32 m y una producción de 70 000 l/día, tal que, como puede apreciarse en la Figura 11, requerirá una potencia aproximada entre 539 y 588 W proveniente de su rueda motriz, girando a unos 33 rpm.

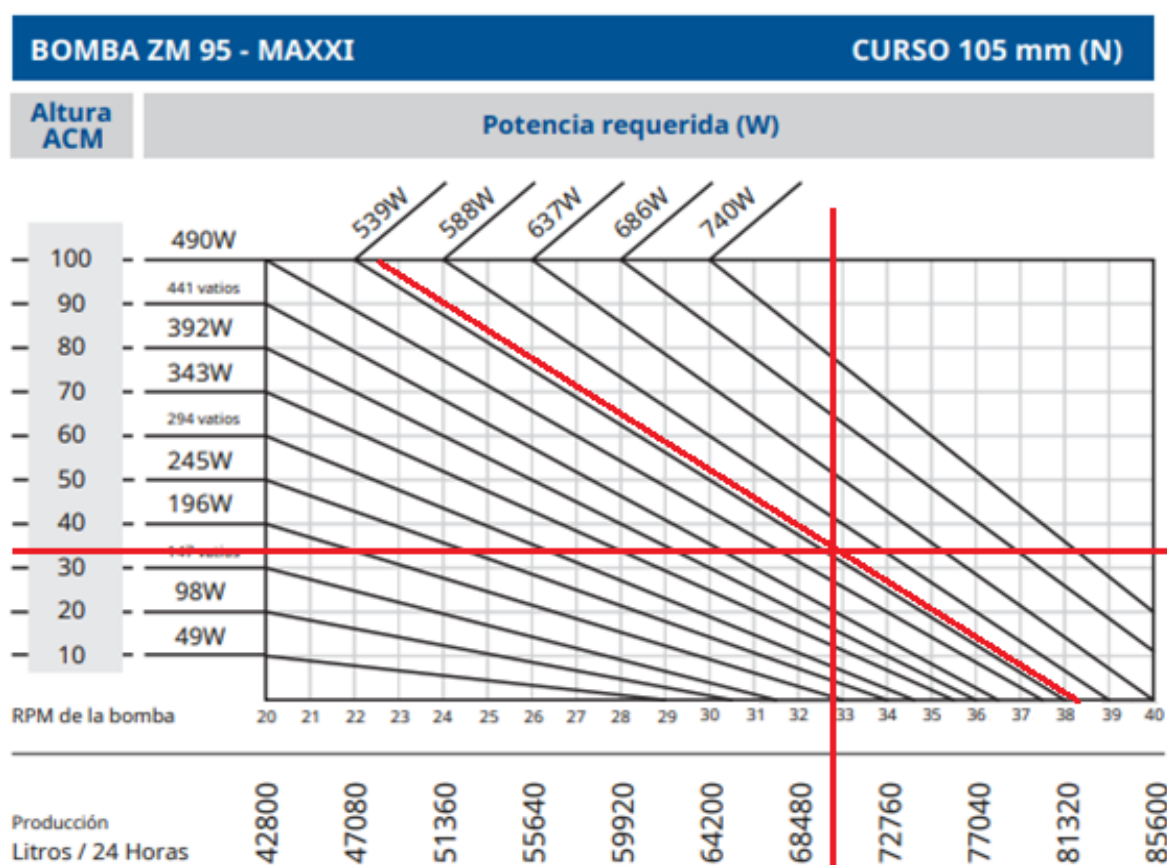


Figura 11. Curva característica de bomba ZM 95 MAXXI. Fuente: ZM Bombas (2020).

Selección de la rueda motriz

El modelo de la rueda fue determinado por la potencia requerida máxima de 588 W. Lo que a su vez dependerá del caudal del agua disponible para la rueda que —como se describió en la sección anterior mediante medición por aforo volumétrico— es de 55 l/s. En este caso, con una rueda de 2 m de diámetro con 0.35 m de ancho se podría disponer de una potencia útil de 593 W con el caudal disponible en la salida de la represa (Tabla 5).

Tabla 5. Selección de diámetro de rueda.

Caudal (l/s)	Diámetro de rueda (m)			Ancho de la rueda (cm)
	2.00	1.80	1.50	
	Potencia útil (W)			
60.0	647	588	500	35
57.5	620	564	480	
55.0	593	539	458	
52.5	566	515	435	
50.0	539	490	415	



Fuente: ZM Bombas (2020).

Comparación de alternativas para validación del diseño

Para la elección del mejor sistema de bombeo mediante la comparación entre la bomba hidráulica y una electrobomba como alternativa convencional económica en inversión inicial se realizó la evaluación de costes. En la Tabla 6 se muestran los costos de las dos posibles alternativas de bombeo a implementar: bomba ZM 95 Maxxi y electrobomba Pedrollo PQ3000. La inversión inicial se especifica en la siguiente sección del presente artículo; el coste de instalación de la alternativa ZM 95 Maxxi se corresponde con la Introducción, Materiales y métodos, Resultados y Discusión del presupuesto; mientras que el coste del equipo y los accesorios que es necesario comprar para su puesta en marcha se detallan en los Resultados. Es importante aclarar que estos valores consideran, además, los gastos indirectos, que alcanzan un 20 % de cada inversión; esto también se detalla en la siguiente sección.

Tabla 6. Comparación económica de los sistemas de bombeo.

Alternativa de bombeo	Inversión inicial		Coste de operación		
	Coste del equipo + accesorios (Resultados)	Coste de instalación (Introducción, Materiales y métodos, Resultados y Discusión)	Coste consumo eléctrico anual	Mantenimiento preventivo anual	Depreciación anual
Bomba ZM 95 Maxxi	COP 29.360.520	COP 8.637.378	COP 0	COP 430.000	COP 788.333,3
	USD 7.155	USD 2.105	USD 0	USD 105	USD 192
Electrobomba Pedrollo PQ3000	COP 2.900.000	COP 20.500.000	COP 12.146.112	COP 300.000	COP 145.000
	USD 706	USD 4.994	USD 2.959	USD 73	USD 35

Cabe destacar que aunque los costos de la bomba ZM 95 Maxxi son muy elevados a corto plazo en comparación con el otro método de bombeo, a largo plazo se compensaría con la poca mano de obra requerida para su operación, y con el no uso de algún tipo de energía o combustible para su funcionamiento debido a que aprovecha la energía renovable disponible en el lugar. Por su parte, el costo de inversión inicial de la bomba Pedrollo PQ3000 se incrementa notoriamente si se considera, dentro del gasto de instalación, la alimentación de energía eléctrica proveniente de la red local hasta el sitio de la represa, tal como se explicó en la sección de metodología de comparación de alternativas.

Ambas inversiones se recuperarían como resultado del incremento en la producción pecuaria de la zona alta de la finca, pero vale la pena resaltar, a partir de los datos reportados en la Tabla 6, que si se considerara solamente el ahorro en el costo de consumo de energía eléctrica como si fuera un ingreso, el tiempo de retorno de la inversión en la bomba ZM 95 Maxxi sería de tres años y tres meses, lo que se considera un tiempo de recuperación corto.

Presupuesto para instalación de bomba hidráulica ZM

El presupuesto se secciona en cinco capítulos, que corresponden a cada una de las actividades que se debían realizar en su respectivo orden; para estimar el gasto de todo el montaje se tomaron en cuenta los costos de los equipos, materiales y de mano de obra que se requerirían para ejecutar cada una de ellas.

- **Capítulo 1. Introducción:** hace referencia al levantamiento aerofotogramétrico, estudio topográfico a realizarse por medio de dron, hecho para obtener toda la información del terreno en cuanto a su

caracterización: límites, cerramientos, distribución, vías de acceso, áreas, curvas de nivel, etcétera. Valor de 3 550 000 COP (865 USD).

- **Capítulo 2, Materiales y métodos:** adecuación del terreno; se realizaron dos actividades correspondientes a la limpieza y nivelación del terreno, donde se removió toda la vegetación y escombros alrededor de la zona de instalación de la bomba, y se niveló el suelo debido a las irregularidades que presentaba. Valor de 84 950 COP (21 USD).

- **Capítulo 3, Resultados:** placa de concreto. Se desglosa con el uso de arena, cemento y triturado, además de la mano de obra, calculados para la fundición de una placa con dimensiones de 3 x 3 m, con 10 cm de espesor. Valor de 612 865 COP (149 USD).

- **Capítulo 4, Discusión:** red hidráulica, se utilizaron rollos de manguera de polietileno de 1½", con una longitud de 90 metros. Para este capítulo se tuvo en cuenta un ítem de mano de obra que hace referencia a la excavación e instalación manual de la manguera sobre una hendidura de 20 cm de ancho por 50 cm de profundidad, con una longitud de 688 M. Valor de 2 950 000 COP (719 USD).

- **Capítulo 5, Conclusiones:** sistema de bombeo. En esta sección se tuvieron en cuenta todos los accesorios que derivan de la bomba hacia la tubería de succión y conducción (manómetro, llave de paso, válvula de pie, abrazaderas, acople rápido, macho PVC 1½", codo 1½", tubo de 1½", tee galvanizado de 1½", buje reductor galvanizado, llave de paso galvanizada, válvula check, tubería de aguas negras de 10"), teniendo en cuenta, además, los precios de la bomba, rueda y tambor plástico. Valor de 24 467 100 COP (5.960 USD) para un valor subtotal directo de 31 664 915 COP (7 714 USD).

A esto también se agregó un apartado dedicado a los costos indirectos, correspondientes a los gastos administrativos (5 %), imprevistos (5 %) y de utilidad (10 %), lo que da como resultado un costo total de 37 997 898 COP (9 257 USD) de la ejecución de todo el proyecto.

Instalación del sistema de bombeo hidráulico

Montaje del conjunto

Para el montaje de la bomba se tuvieron en cuenta varios aspectos para un funcionamiento sin interrupciones. Se eligió un lugar cercano a la represa de fácil acceso, donde la vegetación permitiera la operación del equipo y en donde se facilitara la captación del agua que acciona el sistema; dicho montaje puede apreciarse en la Figura 12. Una vez hecho el montaje de la bomba, rueda y caballete sobre la base de albañilería que se aprecia, fue necesaria la instalación de barras de acero angulares soldadas sobre el caballete para soportar la tubería de 10" encargada del accionamiento del sistema (Figura 12) debido a que la tubería no se podía mantener suspendida en equilibrio por su propio peso y el agua que necesita transportar. Esta tubería se ubicó a 10 cm aproximadamente de la rueda y sobre el eje de ésta, con una ligera pendiente, atendiendo las recomendaciones presentadas en la Figura 9, lo que permitió la caída de agua por gravedad y garantizar el mayor potencial hidráulico.



Figura 12. Montaje del conjunto de la Bomba ZM 95 MAXXI (izquierda); tubería de accionamiento del sistema (derecha).

Sistema de captación y succión de agua

La captación del sistema está compuesta por: (1) tambor plástico de 200 litros; (2 y 3) válvula de pie roscada con filtro, que permite el paso del agua en una dirección, evitando el descebado de la bomba; esta válvula es de bronce, lo que garantiza una mayor resistencia a la corrosión y una mayor vida útil, y (4) tubería de alimentación de agua. En la Figura 13 se puede observar el montaje de la succión de agua del sistema de bombeo. En este punto fue necesario hacer uso de una malla que va por encima del tambor plástico, para evitar que los desprendimientos de hojas y ramas cayeran directamente al agua captada y perjudicaran la calidad del caudal a ser succionado. Gracias al nivel de la represa que se encuentra a unos 2 m por encima del cuerpo de bomba se garantiza el llenado del tambor plástico alimentado por una tubería por medio de la gravedad;

una vez lleno el tambor, el agua se desborda retomando de nuevo su cauce, y se garantiza su nivel.

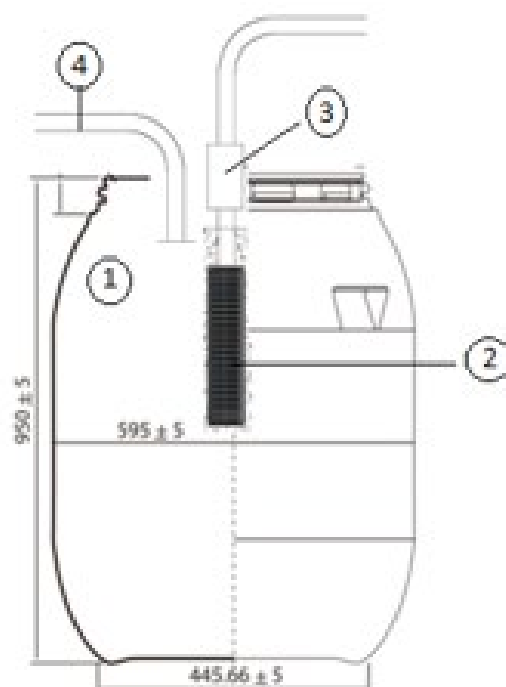


Figura 13. Composición del sistema de captación y succión.

Sistema de descarga

Para empezar con la instalación de la tubería o línea de descarga, se tomaron los siguientes accesorios: válvula de bola en latón de 1½", válvula check de cortina en bronce de 1½" y un manómetro de 240 psi horizontal de 1½"; se les agregó cinta teflón alrededor del niple de cada uno, para lograr un mejor empalme y evitar fugas de agua; este ensamble se evidencia en la Figura 14. Posteriormente, una vez puestos los accesorios que salen del ariete, se utilizó una manguera de polietileno con un diámetro mayor al obtenido en los cálculos de diseño, siendo éste de

un diámetro de 2", con base en las enmiendas internas de la manguera, que es de menor diámetro y no permitía el empalme con los accesorios; esta manguera solo se instaló al inicio en un tramo de 10 m, donde luego, por medio de una unión de tubería, se redujo el diámetro de la manguera al seleccionado anteriormente en el diseño de 1½".



Figura 14. Puesta de accesorios de la tubería de descarga.

Puesta en marcha

Terminado todo el proceso de instalación, se comprobó que los datos teóricos que se obtuvieron mediante los cálculos realizados guardaran una relación con los datos obtenidos con la puesta en marcha de la bomba. Para lo anterior se usó el método de aforo volumétrico, procedimiento que se efectuó a la salida de la tubería de descarga (línea de conducción), y

en el que se emplearon herramientas de medición convencionales, como balde de volumen conocido (10 litros) y un cronómetro. En la Tabla 7 se presentan los resultados de los aforos realizados.

Tabla 7. Tiempo promedio de aforo volumétrico.

Volumen (l)	Tiempo (s)
10	12
10	13
10	13
10	12
10	14
10	12
10	12
10	13
10	12
10	13
Promedio: 12.6	

Conocido el volumen y tiempo de llenado del balde, se calculó el caudal mediante la Ecuación (2):

$$Q = V/t \quad (2)$$

Donde:

Q = caudal (l/s; m³/h; m³/día)

V = volumen (l; m³)

t = tiempo (s; h; día)

$$Q = \frac{10 \text{ l}}{12.6 \text{ s}} = 0.7936 \text{ l/s}$$

$$0.7936 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 2\,857.14 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 2.857 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 68.57 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Dando como resultado un caudal promedio de 0.7936 l/s, el equivalente a 68.57 m³/día; este resultado es ligeramente menor al exigido por el propietario de 70 m³/día, pero está dentro de un margen de lo aceptable para poder satisfacer las necesidades de llenado del reservorio para su posterior uso en el riego para la producción de forraje para ganado.

Discusión

El sistema de bombeo implementado con la bomba ZM Maxxi demostró ser una solución eficiente y sostenible para satisfacer las necesidades hídricas de la finca La Esperanza durante épocas de sequía. Este sistema, basado en el aprovechamiento de energía hidráulica, cumplió con el objetivo de bombear un caudal promedio de 68.57 m³/día a un reservorio ubicado a 22 metros de altura y a 688 metros de distancia, sin incurrir en costos de consumo eléctrico. Aunque la inversión inicial del sistema ZM Maxxi es mayor, si se compara con la electrobomba Pedrollo PQ3000, su costo operativo es prácticamente nulo debido a la eliminación del

consumo eléctrico. Esto resulta en un tiempo de recuperación de la inversión de solo tres años y tres meses, lo que valida su viabilidad económica en escenarios agrícolas con acceso limitado a la red eléctrica.

Los resultados obtenidos se alinean con estudios previos sobre sistemas de bombeo que emplean energías renovables. Por ejemplo, Guaña-Quilumba y Quishpe-Sacancela (2018) reportaron la implementación de un sistema similar que impulsaba agua a 700 metros de distancia utilizando una bomba hidráulica; destaca también una significativa reducción de gastos operativos y una vida útil prolongada. Sin embargo, el presente estudio introduce una optimización adicional, al reducir pérdidas de carga mediante una adecuada selección del diámetro de tubería y un diseño específico del sistema de captación, lo cual garantiza un caudal estable incluso en condiciones de máxima exigencia.

En contraste, la electrobomba convencional analizada en este estudio presenta ventajas en costos iniciales (Pedrollo, 2023). Sin embargo, su dependencia de la energía eléctrica y los gastos asociados con su operación anuales —que ascienden a 12 146 112 COP (2 958 USD)— limitan su competitividad en el largo plazo. Además, la vida útil de esta alternativa, estimada en 20 años, es significativamente inferior a la de la bomba ZM Maxxi, que alcanza los 30 años, según datos del fabricante y experiencias previas (ZM Bombas, 2020).

El sistema ZM Maxxi no solo representa una solución económica, sino también ambientalmente sostenible, al emplear una fuente de energía renovable. Estudios como los de Arias *et al.* (2021) subrayan la importancia de implementar tecnologías hidráulicas en áreas rurales para reducir emisiones de carbono asociadas con el uso de combustibles fósiles y mejorar la autonomía energética de las comunidades. En este contexto, el presente proyecto contribuye de forma significativa con el desarrollo

sostenible del sector agrícola y muestra que la inversión en tecnología hidráulica puede ser un catalizador para la productividad rural y la resiliencia frente al cambio climático.

Conclusiones

La implementación del sistema de bombeo ZM Maxxi cumplió con los objetivos de disponer de agua en un reservorio en la parte alta de la finca para la producción de forraje mediante un sistema de bombeo sin consumo de energía eléctrica; fue el más económico y sostenible en el tiempo.

La bomba hidráulica ZM Maxxi demostró ser una solución efectiva para transportar casi 70 m³ de agua por día a un reservorio situado a 22 metros de altura y 688 metros de distancia, sin incurrir en costos de energía eléctrica. Este sistema contribuyó de manera significativa a mejorar el abastecimiento hídrico de la parte alta de la finca La Esperanza durante las épocas de sequía.

Comparado con una electrobomba convencional, el sistema de bombeo ZM Maxxi ofrece un ahorro anual de COP 12 146 112 (2 958 USD) al no requerir electricidad para su operación, lo que resulta en una recuperación de la inversión a mediano plazo.

Aunque el gasto inicial de instalación del sistema con la bomba ZM Maxxi fue mayor que el de una electrobomba COP 37 997 898 (9 255 USD) frente a COP 23 400 000 (5 699 USD), los costos operativos del sistema ZM Maxxi son significativamente menores, al eliminar el consumo energético y reducir los gastos de mantenimiento, lo que lo convierte en la opción más viable a largo plazo.

El sistema implementado tiene un caudal de entrega de 68 570 litros de agua por día, lo que cumple con las necesidades de riego para la producción de forraje para el ganado en la finca; ello mejora la sostenibilidad de las actividades ganaderas en la zona.

La bomba ZM Maxxi tiene una vida útil estimada de 30 años y supera a la electrobomba, que tiene una vida útil de 20 años, lo que resalta aún más la rentabilidad a largo plazo del sistema de bombeo seleccionado.

Agradecimientos

Agradecimientos al Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC y a la Universidad Surcolombiana por su invaluable colaboración en este proyecto. Su apoyo y recursos han sido fundamentales para la realización de la presente investigación.

Referencias

- Arias, L., Olaya, F., & Ardila, J. G. (2021). Caracterización y redimensionamiento de sistema de bombeo de agua para cultivos acuícolas en finca el Rubí en Aipe-Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 25, 72. DOI: 10.25054/22161325.2780
- Bermeo-Mayancela, E. E. (2022). *Estrategias de mercado para pequeños productores agrícolas de las comunidades indígenas de la organización Tukayta del cantón Cañar* (Bachelor's thesis). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

- Chávez-Schaw, J. M. (2014). *Análisis y diseño de cimentaciones para turbinas hidráulicas en hidroeléctricas medianas* (Doctoral dissertation). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Díaz-Rodríguez, N., & Pérez-Guerrero, J. N. (2007). Metodología para evaluar el impacto de la maquinaria agrícola sobre los recursos naturales del medio ambiente. *Ciencias Holguín*, 13(2), 1-12.
- Gras, C., & Hernández, V. (2016). Modelos de desarrollo e innovación tecnológica: una revolución conservadora. *Mundo Agrario*, 17(36), 1-37.
- Guaña-Quilumba, F. R., & Quishpe-Sacancela, E. V. (2018). *Diseño e implementación de un sistema para impulsar agua desde una vertiente hasta un tanque de distribución a 700 m de distancia mediante un sistema de bombeo* (Master's thesis). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- Leibovich, J., & Estrada, L. (2008). *Competitividad del sector agropecuario colombiano basado en el estudio: diagnóstico y recomendaciones de política para mejorar la competitividad del sector agropecuario colombiano*. Bogotá, Colombia: Consejo Privado de Competitividad.
- Palacio-Castañeda, N. (2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia* (Bachelor's thesis). Universidad de Antioquia, Colombia.
- Pedrollo. (2023). *Pedrollo, Catálogo general*. Recuperado de https://www.pedrollo.com.co/public/allegati/PK_ES_60Hz.pdf

- Polanco-Puerta, M. F. (2007). *Maquinaria y mecanización agrícola*. Bogotá, Colombia: Universidad Abierta y a Distancia.
- Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(14), 25-32. DOI: 10.29018/issn.2588-1000vol2iss14.2018pp25-32
- UPRA, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2024). *Población ocupada del sector agropecuario aumentó 147.685 personas durante diciembre de 2024*. Recuperado de <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/>
- ZM Bombas. (2020). *Hidrometalurgia ZM limitado*. Recuperado de www.zmombas.com.br