

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

**Estudio energético de una estación de bombeo de agua
potable basado en la evaluación de distintas técnicas que
reduzcan el consumo de energía**

Brayan Andrés Gutiérrez Córdoba

Alejandro Hernández Velásquez

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

Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Asesor

Edwin Herlyt Lopera Mazo

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM

Facultad de Ingenierías

Mecatrónica y Electromecánica

Medellín, Colombia

2022

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

RESUMEN

Este trabajo se basa en la evaluación de distintas técnicas que permiten reducir el consumo de energía en una estación de bombeo para distribución de agua potable en la ciudad de Medellín, con el fin de mejorar su eficiencia y obtener ahorros importantes en el consumo de energía que apalanquen nuevas inversiones sobre el sistema mediante los incentivos logrados por los ahorros, todo esto sin afectar los requerimientos de operación y demanda que exige la estación. Además, se realizó una evaluación económica con la técnica de ahorro que más se ajustó a los requerimientos técnicos actuales del sistema. La modelación matemática y los cálculos se realizaron a partir de la toma de mediciones hidráulicas y eléctricas validadas con equipos especializados y metodologías ampliamente utilizadas en el diagnóstico de sistemas de bombeo.

Las técnicas presentadas en el estado del arte por diferentes autores ofrecen alternativas dentro del alcance de los recursos humanos y tecnológicos con los que se puede lograr los objetivos planteados en este trabajo. Las principales limitantes de cada técnica fueron evaluadas acorde al contexto operativo del sistema de bombeo y la viabilidad económica de las mismas. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran un potencial de ahorro de energía cercano a los 20 MWh/Año y una reducción de 4,1 TCO_{2eq}/año lo cual representa una suma importante en términos de energía y aporte al medio ambiente.

Palabras clave: Estudio energético, ahorro energético, sistema de bombeo, ahorro consumo de energía.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

RECONOCIMIENTOS

Primeramente, queremos agradecer a nuestras familias por su apoyo consistente e incondicional para lograr este importante paso en nuestras vidas, ellos son testigos del arduo trabajo y sacrificio que implica recorrer el camino de la excelencia académica. Estamos seguros de que este sacrificio nos abrirá nuevos desafíos y oportunidades para nuestras vidas.

Igualmente agradecemos a nuestros docentes por su acompañamiento en este proceso, quienes abrieron espacios de concertación y debate que ayudaron a realizar una retrospectiva crítica y valiosa para nuestro crecimiento personal y académico. Agradecemos a nuestra comunidad ITM quien abrió nuevamente sus puertas para recibirnos y emprender un viaje más en la academia.

Agradecemos a Dios todo poderoso quien nos ha colmado de sabiduría para obrar en beneficio de nuestra sociedad y país que necesita profesionales íntegros que construyan progreso.

Nuestros más sinceros agradecimientos compañeros, ustedes también fueron pieza clave del proceso porque aportaron riqueza a nuestro conocimiento académico y como personas, trabajamos colectivamente con apoyo mutuo para enrolarnos sobre el mismo objetivo.

¡No queda más que nuevamente dar infinitas gracias!

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

ACRÓNIMOS

BEP: Best efficient point (punto de mejor eficiencia)

IE1: Motor de eficiencia estándar.

IE2: Motor de eficiencia alta.

IE3: Motor de eficiencia premium.

ROI: Retorno simple de la inversión.

TIR: Tasa interna de retorno.

VAN: Valor presente neto.

CCM: Centro de control de motores.

CRA: Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento.

NPSH: Net positive suction head (cabeza neta de succión).

m.c.a: Metros columna de agua.

MCE: Motor circuit evaluation (equipo analizador de motores).

COP: Pesos colombianos.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO	9
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	24
3.2 PRINCIPALES TÉCNICAS DE AHORRO ENERGÉTICO UTILIZADAS EN SISTEMAS DE BOMBEO	52
3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO TÉCNICA DE MAYOR IMPACTO.....	56
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	70
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	72
REFERENCIAS.....	75
ANEXOS	78

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional e industrial de las ciudades hace que cada vez exista mayor demanda de agua, la tendencia de los sistemas de distribución de agua es que aumente el consumo de energía eléctrica, teniendo en cuenta que en estos negocios se busca trabajar con la mayor eficiencia posible con el fin de que sean sostenibles y puedan atender la demanda del crecimiento poblacional, industrial y económico. La Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento (CRA) establece una eficiencia mínima para sistemas de bombeo del 60 % en Colombia; las empresas distribuidoras que estén por encima de esta media operacional obtendrán incentivos con el fin de apalancar la operación eficiente de sistemas de bombeo. (resolución 287 del 2004).

Para evaluar mejoras en la eficiencia, se deben tener en cuenta las características técnicas de un sistema típico de bombeo para agua potable con base en los siguientes parámetros: contexto de operación de los componentes, vida útil de los equipos, potencia eléctrica consumida, horas de trabajo mensual del conjunto motor bomba, precio de la energía y eficiencia actual de los equipos utilizados, todo esto con el fin de identificar en cuál de estos parámetros se tiene una mayor oportunidad de ahorro energético (Banco Interamericano de Desarrollo, 2011).

Los registros muestran un crecimiento en la demanda de energía que está directamente correlacionado con el aumento del caudal bombeado como consecuencia del crecimiento de población en el sector. Entendiendo la dinámica de estos factores es de vital importancia implementar medidas que reduzcan el consumo de energía con el fin de garantizar la sostenibilidad y competencia del negocio de distribución de agua potable con estrategias y técnicas que reduzcan costos de consumo de energía.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

En este trabajo se aborda un estudio energético con el fin de apalancar nuevas inversiones sustentadas sobre los ahorros que se puedan obtener por la reducción de consumo de energía esto con el fin de reemplazar maquinas con tecnologías de construcción antigua y de baja eficiencia, el sistema de Bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto está bajo la administración de Empresas Públicas de Medellín. Este sistema abastece de agua potable a 303 residencias aproximadamente que están ubicadas en la ciudad de Medellín. La idea es evaluar su desempeño energético con el propósito de encontrar estrategias económicamente viables que mejoren su eficiencia debido a que en la estación de bombeo se busca reducir los costos de energía de cara al aumento de la demanda energética de los últimos 10 años.

Varios autores como (De Almeida, Ferreira, & Duarte, 2014), (de León García Gabriel, Gómez Sarduy Julio R., & Viego Felipe Percy R., 2019), (Singh, Anil Kumar, & Naikan, 2019) y (Torregrossa & Capitanescu, 2019) coinciden en que los ahorros en consumos de energía están asociados a la producción de gases de efecto invernadero (GEI) equivalentes en CO₂. De esta manera, se puede concluir que cualquier ahorro energético puede representar un aporte valioso en la problemática actual del calentamiento global de manera que la gestión adecuada y eficiente de los recursos energéticos desempeñara un papel importante en la lucha contra la reducción del calentamiento global para los años venideros, convirtiéndose en un tema de interés prioritario para la ingeniería, buscando un equilibrio entre la producción y la sostenibilidad del medio ambiente.

Por esta razón, es importante buscar estrategias de fácil implementación que ayuden a mejorar la eficiencia de los sistemas de bombeo para distribución de agua potable con el fin de que sean negocios sostenibles y se generen mejoras continuas en la prestación de los servicios apalancando proyectos de inversión mediante los incentivos obtenidos por ahorros y mejoras en el rendimiento de operación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Objetivo General.

Elaborar un estudio energético en una estación de bombeo de agua potable basado en la evaluación de distintas técnicas que permitan reducir el consumo de energía, validado con mediciones de las variables eléctricas e hidráulicas disponibles.

Objetivos Específicos.

1. Caracterizar la información disponible del contexto operativo y los reportes históricos de consumos de energía de la estación de bombeo objeto de estudio y validar las condiciones de las variables eléctricas e hidráulicas actuales.
2. Clasificar las técnicas utilizadas en sistemas de bombeo orientadas al ahorro de energía según su potencial de factibilidad y viabilidad de implementación.
3. Realizar un análisis económico con los resultados obtenidos con la técnica de mayor viabilidad de implementación.

Para el desarrollo del trabajo fue necesario una serie procedimientos los cuales se abordan de manera ordenada: Capítulo 1, se presenta la introducción donde se hace énfasis en el problema abordado y los objetivos a desarrollar. Capítulo 2, marco teórico donde realiza una revisión literaria sobre las técnicas o tecnologías desarrolladas para mejorar la eficiencia en sistemas de bombeo, también se revisan las consideraciones más relevantes para que la implementación de estas técnicas tenga un retorno de inversión atractivo en términos de costo beneficio. Capítulo 3, se explica la metodología empleada para dar solución al problema planteado, también se expone de manera detallada el cumplimiento de los objetivos. Capítulo 4, esta sección está dedicada al análisis y discusión de resultados apoyada en la recolección de resultados obtenidos en pruebas de campo con las variables hidráulicas y eléctricas disponibles. Capítulo 5, finalmente se presenta las conclusiones, referencias y se proponen mejoras para futuros trabajos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encuentra la teoría relacionada con los sistemas de bombeo así mismo sus características hidráulicas y eléctricas, esto teniendo en cuenta las ecuaciones usadas para evaluar las variables y la respectiva normatividad vinculada al buen desempeño de los equipos para evitar desgastes acelerados, partiendo del rango de mejor eficiencia y el uso de técnicas para disminuir el consumo energético.

2.1 Sistemas de Bombeo

Un sistema de bombeo es un grupo de elementos que permiten el transporte de un fluido desde un punto a otro, el cual también garantiza el almacenamiento temporal del fluido de trabajo. En un sistema típico los elementos se enlazan por medio de tuberías desde el punto de origen (tanque de succión) hasta el punto de destino (tanque de impulsión o descarga) con sus respectivas válvulas tanto en la succión como en la impulsión, donde los elementos que proporcionan la energía necesaria para transportar el fluido son la bomba y el motor. La distribución de potencias en los elementos que proporcionan la energía al sistema de bombeo se presenta de manera individual en la **Ilustración 1**. Cada uno de estos elementos afecta el desempeño global del sistema y por tanto el consumo de energía. (Blanco, Veladre, & Fernandez, 2018)

Ilustración 1

Sistema de bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto



Nota. Sistema de bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto. Fuente: registro fotográfico tomado en visita de campo.

Según (Lima, 2005) existen dos tipos de sistemas de bombeo:

- De cabeza estática: cuando el sistema incluye un tanque de almacenamiento en una cota superior a la del sistema.
- Bombeo a la red: cuando un sistema de bombeo no incluye reservorio y se abastece directamente a una red de tuberías.

Los sistemas de bombeo también se pueden clasificar según su demanda como:

- De caudal constante: son sistemas que requieren un caudal específico y este se mantiene en el tiempo que opere la bomba manteniéndose constante a lo largo de su funcionamiento.
- De caudal variable: son sistemas que trabajan a demanda de los procesos donde la producción es variable.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

La mayoría de los sistemas de bombeo de distribución de agua potable son de cabeza estática y caudal constante además funcionan con bombas rotodinámicas que convierten la carga de velocidad en cabeza de presión a la descarga de la bomba. Una de las leyes con la que se puede describir el comportamiento del flujo es conocida como la ecuación general de la energía, está dada por la ecuación (1):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

Donde:

P_1 = Presión en el punto 1 (Pa)

γ = Peso específico del fluido (N/m³)

V_1 = Velocidad en el punto 1 (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

z_1 = Altura 1 en el punto de referencia donde se quiere iniciar a evaluar el sistema (m)

h_A = Carga útil entregada al fluido por la bomba (m)

h_R = Carga extraída del fluido por la turbina (m)

h_L = Pérdida de carga entre los puntos 1 y 2, debido a todos los componentes del sistema de tubería distintos a bomba y turbina. (m)

P_2 = Presión en el punto (Pa)

V_2 = Velocidad en el punto 2 donde se está evaluando el sistema (m/s)

z_2 = Altura 2 punto al cual se quiere llegar o evaluar (m)

De la ecuación (1) se puede concluir que la energía de una sección del fluido se aumenta con la energía adicionada por bombas (h_A), se disminuye por el retiro de energía por medio de turbinas o motores (h_R); y también es afectada siempre por las pérdidas de energía derivadas a la fricción

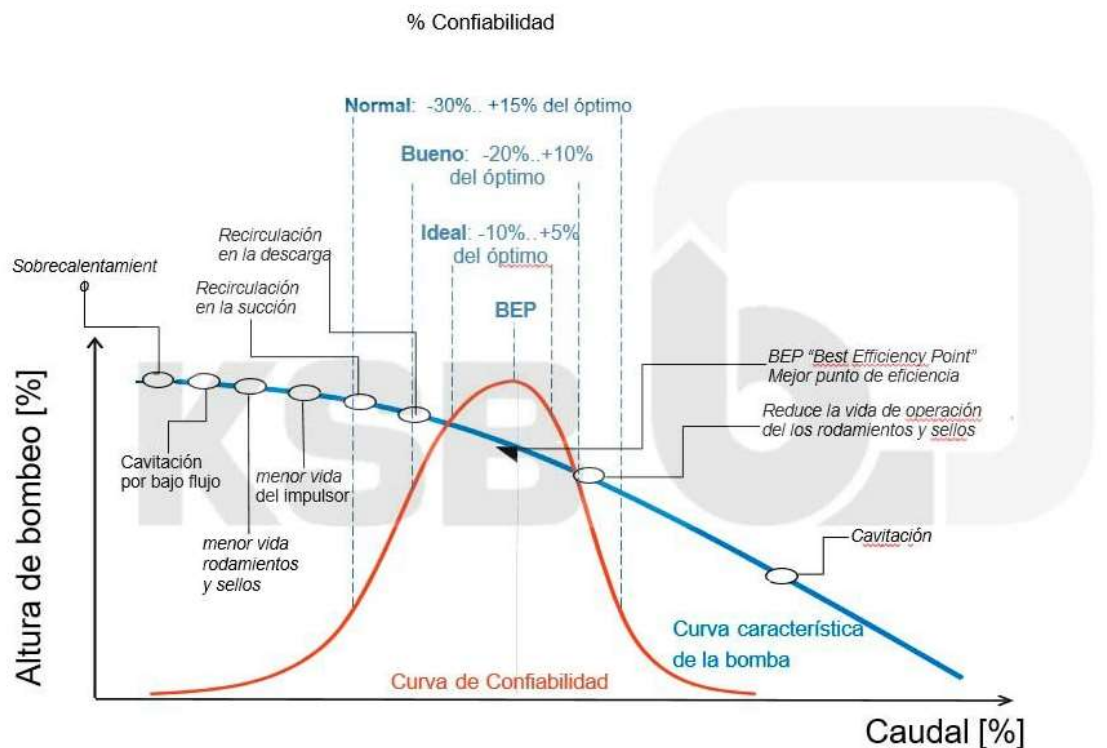
a accesorios secundarios en el conducto. Para el caso de estudio la h_R se desprecia por la condición a evaluar (Mott, R. L., Untener, 2015).

2.2 Variables que afectan el desempeño energético en sistemas de bombeo

La bomba se construye idealmente para que trabaje en su punto de máxima eficiencia llamado BEP (Best Efficient Point), ver **Ilustración 2**, el cual es el punto de mejor desempeño entre las variables que intervienen en la bomba como: presión, caudal y consumo de potencia, se sugiere desde la normatividad que este tipo de equipos trabaje en un rango de operación alrededor del BEP que se encuentra entre el -30% a la izquierda y en +20% a la derecha del BEP (Hydraulic Institute, 2011).

Ilustración 2

Curva confiabilidad bomba



Nota. Curva confiabilidad bombas. Tomado de KSB México

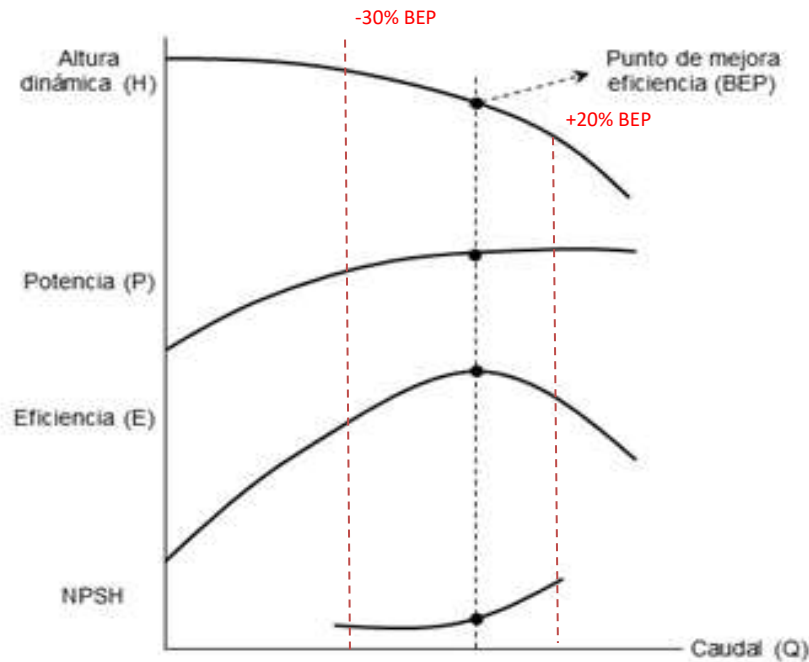
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Si se garantizan los rangos establecidos, el sistema de bombeo se encontrará dentro de la franja de trabajo que optimiza el desempeño de la bomba y extiende la vida útil del equipo; trabajar cerca de este punto evitará daños prematuros en los componentes de la bomba. Estar por fuera de este rango de operación tiene consecuencias perjudiciales que comprometen directamente indicadores de disponibilidad y confiabilidad de los equipos, dado que observando de manera global si el punto de operación de la bomba se encuentra inferior al -30% del BEP se presenta: aumento de temperatura en los componentes, cavitación a bajo caudal, vibraciones, vida de rodamientos corta, desgaste acelerado del rodete o impulsor, recirculación del fluido y si por el contrario está operando en un punto superior al 15% del BEP la bomba presenta: vibraciones, vida de rodamientos, cavitación, en algunos casos se da inestabilidad e incertidumbre si está operando fuera de la curva suministrada por el fabricante.

Para monitorear el desempeño hidráulico de la bomba se requiere de las curvas del sistema, estas son una representación gráfica de parámetros como: altura dinámica, potencia y eficiencia que varían en función del caudal, estas variables permiten tener una buena estimación del desempeño actual de la bomba, en la **Ilustración 3** se puede observar una curva típica con las variables mencionadas (Roger & Andrade, 2018).

Ilustración 3

Curvas características del desempeño de una bomba centrífuga



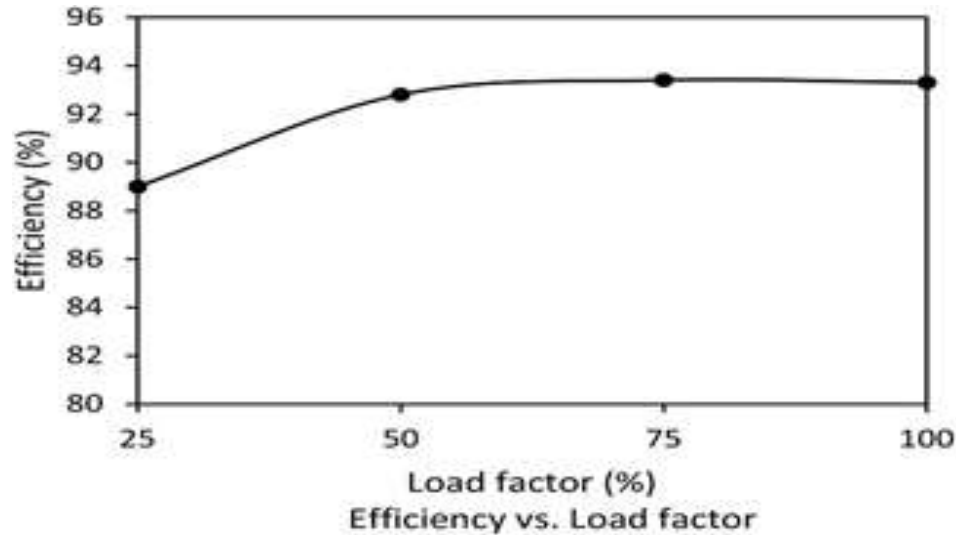
Nota: La grafica representa las curvas de desempeño de una bomba centrífuga identificando el BEP. Adaptado de (Roger, Andrade, 2018).

Las razones más comunes de que la bomba opere por fuera de los rangos son: malos dimensionamientos de los elementos del sistema de bombeo, desgaste de la bomba debido a su operación, obstrucción de las tuberías y cambios en los requerimientos del sistema.

Otro componente importante dentro del sistema de bombeo es el motor eléctrico, este, al igual que la bomba, presenta un mejor desempeño en un rango de operación como se muestra en la **Ilustración 4**. Tanto para los motores de eficiencia estándar como para alta eficiencia el punto de mejor eficiencia suele estar cerca del 75 % de la carga total, siendo relativamente plano hasta el 100 % del punto de carga nominal (Trianni, Cagno, & Accordini, 2019a).

Ilustración 4

Curva característica desempeño de motor según su carga



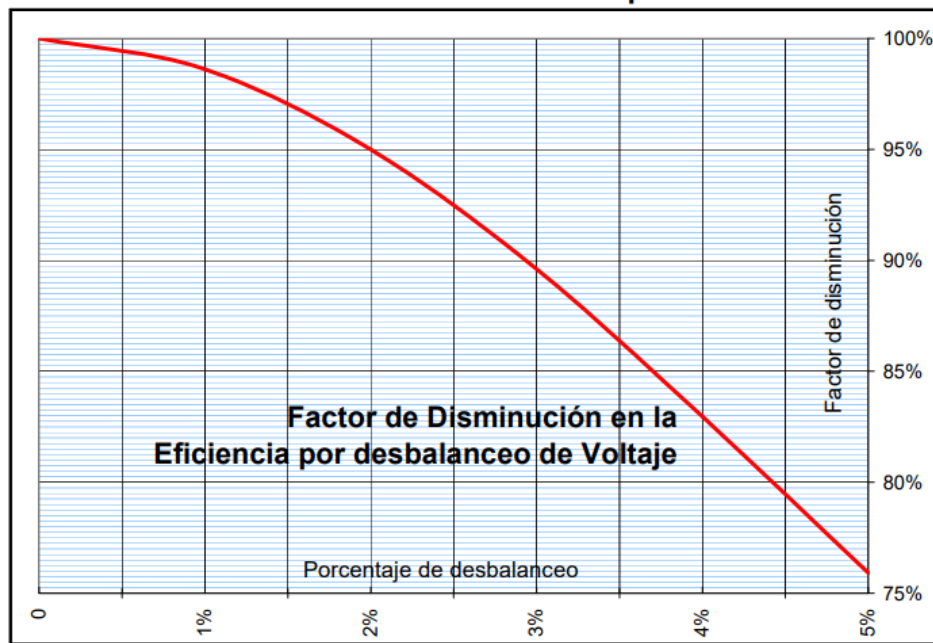
Nota. En la ilustración se muestra la curva característica del desempeño de un motor según su carga. Tomado de (Trianni et al., 2019a).

Por esta razón, el correcto dimensionamiento de un motor puede permitir mejoras sustanciales en términos de ahorro y rendimiento. En la industria, la mayoría de los motores tienen un dimensionamiento incorrecto (Gómez et al., 2022). Un motor puede presentar baja eficiencia si el voltaje de placa del motor no coincide con el voltaje nominal de suministro del sistema. Una discrepancia entre estos dos voltajes produce una disminución en la eficiencia del motor y mayores temperaturas de operación (Trianni, Cagno, & Accordini, 2019b).

Otra de las razones comunes por las cuales un motor puede tener baja eficiencia son problemas asociados a la tensión, un desequilibrio del 3 % en la tensión de alimentación puede reducir la eficiencia del motor hasta en un 10 % como se puede ver en la **Ilustración 5** (Motors and Generator Section, 2009).

Ilustración 5

Curva % disminución desempeño del motor vs % desbalance de tensión



Nota. El gráfico representa la curva % disminución desempeño del motor vs % desbalance de tensión. Tomado de (*Motors and Generator Section, 2009*).

El cálculo de desequilibrio debe realizarse con la norma ANSI C84.1-2006, tal y como se muestra a continuación.

Desbalance de voltaje para un sistema polifásico expresado en porcentaje se debe calcular de la siguiente forma con la ecuación (2):

$$\% \text{ desbalance de voltaje} = 100 \times \frac{(\text{Max. Desviación del promedio en V})}{\text{Promedio de Voltaje}} \quad (2)$$

Ejemplo: Con el voltaje fase a fase de 230, 232 y 225 su promedio es 229; la máxima desviación para el promedio es 4; entonces el porcentaje de desbalance es:

$$100 ((x 4)) / (229) = 1,75 \%$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

2.3 Prácticas para mejorar el desempeño en sistemas de bombeo

En la búsqueda de mejorar la eficiencia en sistemas de bombeo se tienen diferentes estrategias según las características de este, para este estudio se eligieron 3 estrategias de mayor impacto en el ahorro energético, las cuales se explican a continuación:

2.3.1 Uso de variadores de velocidad como estrategia para mejorar la eficiencia

Los ahorros de electricidad en los sistemas de bombeo dependen en gran medida de la carga estática. Cuanto mayor sea la cabeza estática de un sistema, menor será el ahorro potencial de electricidad con el control de velocidad porque la mayor parte de la energía se requerirá para superar la diferencia de presión (Zuberi, Tijdink, & Patel, 2017). Dado esto, los ahorros potenciales de electricidad son mayores en sistemas cerrados sin cabezal estático. Por lo que las variaciones de velocidad en sistemas de cabeza estática se deben analizar detenidamente sin afectar los requerimientos de demanda de caudal necesarios para que el sistema opere en condiciones normales. Por otro lado, es importante mencionar que la implementación de variadores de velocidad puede ser viable en bombeos que se puedan tener un aprovechamiento hidráulico, es decir, donde en la succión se tiene una presión proveniente de un bombeo que este llenando el tanque de donde se esté succionando el agua o de una columna de agua superior a la del tanque de succión que este conectada directamente a la succión de las motobombas, siempre teniendo en cuenta las características de las bombas y las recomendaciones de los fabricantes. De esta manera, el trabajo que requiere hacer el motor sería inferior dado que la cabeza dinámica es inferior a la originalmente planteada, se tendría subfrecuenciado las motobombas generando un ahorro proporcionado por la energía cinética y potencial del agua en la tubería de succión. Teniendo en cuenta que el tipo de bombeo evaluado succiona directamente de un tanque de la planta de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

tratamiento de agua potable San Cristóbal y que es un sistema de cabeza fija no es posible tener las condiciones antes mencionadas.

Un indicador clave de desempeño utilizado para evaluar la gestión de la energía en sistemas de bombeo es conocido como el factor kWh/m³, donde este representa la energía específica consumida por unidad de volumen de líquido transportado. Los autores (Lam, Kenway, & Lant, 2017) realizaron una comparación entre sistemas de bombeo en diferentes ciudades de Norte América y este indicador les permitió discernir en cuales instalaciones se consumía más energía teniendo el mismo volumen de agua transportado en condiciones similares operación y bajo este enfoque ejecutar acciones que permitieran gestionar el uso racional de la energía.

2.3.2 Sustitución de motores para mejorar su eficiencia

En sistemas de bombeo usados para el transporte de agua en acueductos se pueden encontrar motores de baja eficiencia o motores con un dimensionamiento mayor a la carga requerida para el accionamiento de la bomba (UPME, 2018). La norma (ISO_25178-2:2012, 2003) establece una caracterización de los motores según su eficiencia como: eficiencia estándar (IE1), eficiencia alta (IE2) y eficiencia premium (IE3). Los autores (De Almeida et al., 2014) sugieren que sustituir motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia pueden mejorar el rendimiento de un proceso industrial en cuanto reducción de consumo de energía, como consecuencia de este ahorro se puede lograr un aporte al medio ambiente con la disminución de emisiones equivalentes de CO₂.

Bajo esta premisa, la regulación colombiana mediante el Decreto 41012 del 2018 Artículo 12, establece que en el país no se pueden comercializar motores con una eficiencia inferior a la categoría IE2 (Ministerio De Minas Y Energía, 2015), esto con el objeto de promover el uso racional de la energía en el país. No obstante, para reemplazar un motor se debe analizar la

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

viabilidad técnica y económica. Los autores (De Almeida et al., 2014) y (Gómez et al., 2022) coinciden en que este método funciona muy bien si se tiene información detallada y medidas de campo que permitan realizar un estudio económico. (Donolo, Chiacchiera, Pezzani, Lifschitz, & De Angelo, 2020) sugieren que este análisis no se debe basar solamente en el indicador financiero ROI (retorno simple de la inversión), sino que se deben considerar dos indicadores más: Valor Presente Neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR), en la investigación realizada por los autores exponen el caso del reemplazo de un motor con retorno de inversión de 3 años; sin embargo, los indicadores financieros VAN y TIR sugirieron que la inversión era inviable desde el punto de vista financiero, en este estudio el VAN da como resultado un valor negativo, lo que implica que la suma de los recursos generados por el reemplazo del motor no alcanza para suplir la inversión inicial y tampoco lograr la rentabilidad mínima exigida aunque el tiempo de pago de la inversión parecía atractivo debido a que la tarifa de electricidad en el país de donde se realizó el estudio es variable en algunas franjas horarias el valor del ahorro era poco significativo.

El cálculo de los indicadores financieros puede realizarse con las siguientes formulaciones (Ríos, 2014).

Valor Presente Neto (VAN).

$$VAN = -I_0 + \frac{\sum_{n=0}^n f_{v,n}}{(1+r)^n} \quad (3)$$

Donde:

- n: número de años de la inversión (expectativa de vida del equipo).
- r: tasa de descuento, rentabilidad mínima esperada o depreciación del activo.
- $\sum f_{v,n}$: Sumatoria de ingresos y egresos que se perciben durante el tiempo n.
- I_0 : Inversión Inicial.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tasa Interna de Retorno (TIR).

$$TIR = -I_0 + \frac{\sum_{n=0}^n f_{v,n}}{(1+r)^n} = 0 \quad (4)$$

La TIR es la tasa de descuento a la cual el VAN = 0, se debe hallar por un método de iteración escogiendo una tasa de descuento (r_1) para la cual del VAN sea menor a 0 y una tasa (r_2) para que el valor del VAN sea mayor a 0, después se aplica la siguiente formula.

$$TIR = (r_2) + \frac{VAN(+)}{VAN(+)+VAN(-)} \times (r_1 - r_2) \quad (5)$$

Donde:

- r_2 : tasa de descuento para la cual el valor de VAN es mayor a 0
- r_1 : tasa de descuento para la cual el valor de VAN es menor a 0
- VAN (-): Valor Presente con una tasa seleccionada para que su valor fuese < 0
- VAN (+): Valor Presente con una tasa seleccionada para que su valor fuese > 0

Los autores (de León García Gabriel et al., 2019) realizaron un estudio de factibilidad económica para la sustitución de 26 motores de eficiencia estándar (IE1) por motores de eficiencia premium (IE3) en una planta azucarera, en este trabajo pudieron concluir que hay dos factores de peso que tienen un gran impacto sobre la evaluación económica que son: el tiempo en horas de trabajo del motor y el porcentaje de carga. En la evaluación realizada pudieron demostrar un ahorro de casi 33 MWh/año en reemplazo de motores subcargados.

La sustitución completa del conjunto motor y bomba es solo recomendable cuando la evaluación de ahorros identificados en la sustitución del motor resulte sustancial, un 5 % de ahorro se puede considerar un valor bajo para realizar la sustitución solamente del motor, en ese caso se

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

debe optar por la sustitución del conjunto bomba-motor, dado que el potencial de ahorro se asegura en ambos componentes y la medida puede ser sumamente rentable (Banco Interamericano de Desarrollo, 2011).

2.3.3 Uso de energías alternativas para mejorar la eficiencia en sistemas de bombeo

Una alternativa que se viene perfeccionando a lo largo de los años, especialmente en zonas aisladas, para obtener ahorros energéticos en los sistemas de bombeo, es la implementación de energía fotovoltaica. Los rangos de caudal para la implementación están entre 20 y 50 m³/día y alturas entre 20 y 70 m. Para que estos sistemas sean viables no se recomienda utilizar almacenamiento de energía con baterías, en su lugar se puede incluir un variador de velocidad, el cual recibe la energía de los paneles en corriente directa y pasa a la etapa inversora para generar corriente alterna y controlar la velocidad del conjunto motor bomba. Según los ahorros obtenidos en consumo de energía, estos pueden ser del 30 %. Sin embargo, esta tecnología tiene varias limitaciones y no es recomendable para sistemas que requieran un caudal constante, pues esta es sensible en extremo a las condiciones climáticas y varía la tasa de volumen de líquido transportado casi en función de la radiación incidente directa del sol (Abella, Miguel & Chenlo, 2005).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

3. METODOLOGÍA

En la implementación del diagnóstico energético en el sistema de bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto, inicialmente se realizó una visita técnica a la instalación donde se tomó la información técnica de los equipos y el contexto operativo actual del sistema de bombeo, también se revisó la información disponible en las bases de datos, las pruebas históricas de eficiencia, los manuales de operación, las pruebas de línea base de los equipos y las curvas de funcionamiento suministradas por los fabricantes.

Luego se verificó el punto de operación en el que se encuentran trabajando las bombas actualmente y se construyó su curva de desempeño mediante una prueba experimental. Para esto, se realizó una prueba de campo que consiste en la instalación de manómetros en la succión e impulsión de las bombas, después de instalados los instrumentos de presión se opera una sola bomba con la válvula de impulsión totalmente abierta y se registraron los datos de caudal, presión y potencia eléctrica consumida. Este proceso se repitió, pero regulando la válvula a un 75% del caudal y así sucesivamente se fue construyendo la curva tomando los puntos reduciendo el caudal en pasos de 25% hasta llegar a 0% o punto de *Shutt off*, tomando como mínimo 5 puntos. De esta manera se evaluó el desempeño actual del conjunto motor bomba y se compararon los resultados con la curva de diseño. Este mismo procedimiento se repite con la bomba restante.

Para evaluar el desempeño actual de los motores eléctricos que proporcionan energía en forma de rotación a la bomba, se utilizó un equipo analizador de redes, referencia FLUKE 435-II y un equipo de pruebas especializado de motores MCE (*Motor Circuit Evaluation*). Teniendo en cuenta la potencia en el eje del motor (potencia transferida a la bomba) con respecto a la potencia de entrada (energía eléctrica consumida) esta relación es conocida como la eficiencia del motor y se

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

puede calcular a partir de los datos medidos en campo, el perfil de carga de la estación de bombeo se monitorea durante un día completo con un medidor de energía ION 750, clase 0.2s. Toda la información recolectada en campo y en la literatura consultada en el estado del arte fue el principal insumo para construir una evaluación financiera que determino el costo beneficio de implementar alguna de las técnicas encontradas para reducir los consumos de energía en la estación de bombeo con el concepto técnico favorable previamente estudiado. Una vez realizado el diagnóstico energético de los principales componentes que proporcionan energía al sistema de bombeo, se revisó la opción que no afectara los requerimientos de caudal en el suministro de demanda actual y que tuviera los mayores beneficios económicos de retorno en la inversión. Para esto, se evaluó las metodologías para disminuir el consumo energético como: cambio de componentes en la bomba, incorporación de tecnologías de energía renovable y cambio de equipos con baja eficiencia.

El principal componente para avalar la técnica es la que más se ajustó a los requerimientos operativos de la demanda que se debe mantener disponible para la prestación del servicio. Entendiendo esto, no se pudo modificar los requerimientos de caudal y presión. La evaluación económica se realizó con un mínimo de tres indicadores financieros: VAN, TIR Y ROI.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

En esta sección se presentan los datos encontrados para el sistema de bombeo San Cristóbal, los cuales fueron obtenidos de la base de datos técnica de gestión documental de las Empresas Públicas de Medellín. En esta documentación técnica se encuentra información precisa acerca del dimensionamiento, equipos utilizados, caudal, presiones y consumo de energía.

La estación de bombeo San Cristóbal fue instalada hace aproximadamente 26 años y actualmente cuenta con un caudal bombeado de 14.370 m³ al mes y un consumo de potencia eléctrica mensual promedio de 15.600 kWh. El bombeo cuenta con dos motobombas conformadas por un motor eléctrico asíncrono jaula de ardilla y una bomba centrífuga multietapas como se pueden apreciar en la **Ilustración 6**. En la **Tabla 1** se presentan los datos técnicos de los principales equipos del sistema de bombeo. Las motobombas se encuentran dispuestas en un arreglo en paralelo, la forma de operar el sistema de bombeo está basado en la demanda promedio en el tanque de destino (tanque Pedregal Alto), esto para garantizar siempre un nivel de agua establecido, para mantener el abastecimiento de agua en la zona de cobertura; desde el centro de control acueducto se enciende una de las motobombas quedando la restante como respaldo. Cabe aclarar que el sistema está diseñado solo para operar con una bomba a la vez y que cuenta con su respectivo bloqueo eléctrico y enclavamiento mecánico para evitar una sobrecarga en el sistema eléctrico e hidráulico. La bomba que opera succiona desde un tanque con un volumen de 2.910 m³ hasta otro reservorio con una diferencia de altura de 240 m y con un volumen de 307 m³. En la **Ilustración 7** y la **Ilustración 8** se presentan los principales elementos mecánicos y eléctricos, respectivamente, que componen el sistema de bombeo.

Ilustración 6

Cuarto de bombas



Nota. En la imagen se puede apreciar la disposición actual de las motobombas. Fuente: registro fotográfico tomado en visita de campo.

Tabla 1

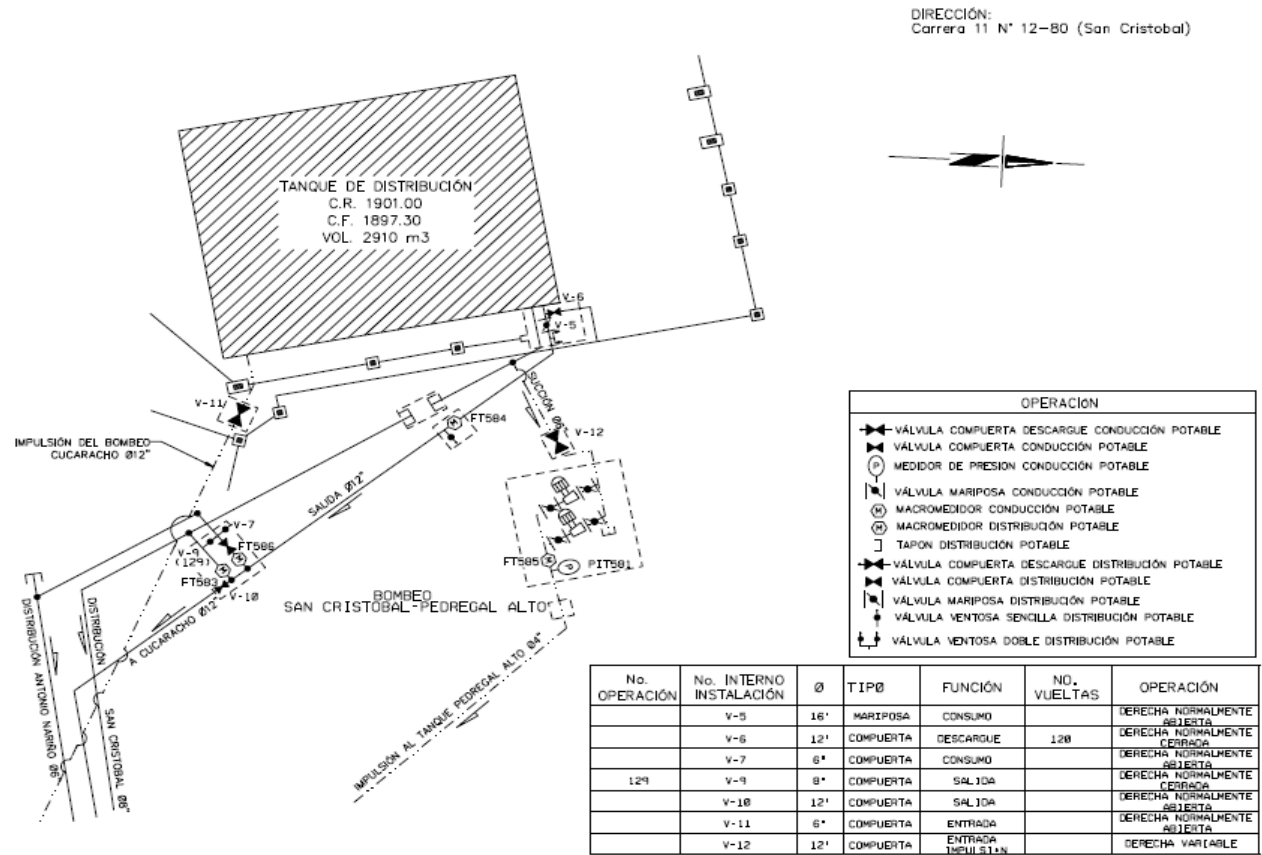
Características motobombas

Características motobombas			
Motor		Bomba Multietapa	
Marca	Siemens	Marca	KSB
Potencia	75 HP	Caudal	43,20 m ³ /h
Voltaje	220 V	Cabeza	240 m
Corriente	188 A	Velocidad	3.500 RPM
Factor de potencia	0,92		

Nota: En la tabla se encuentran las características de las motobombas que actualmente se encuentran en el bombeo San Cristóbal.

Ilustración 7

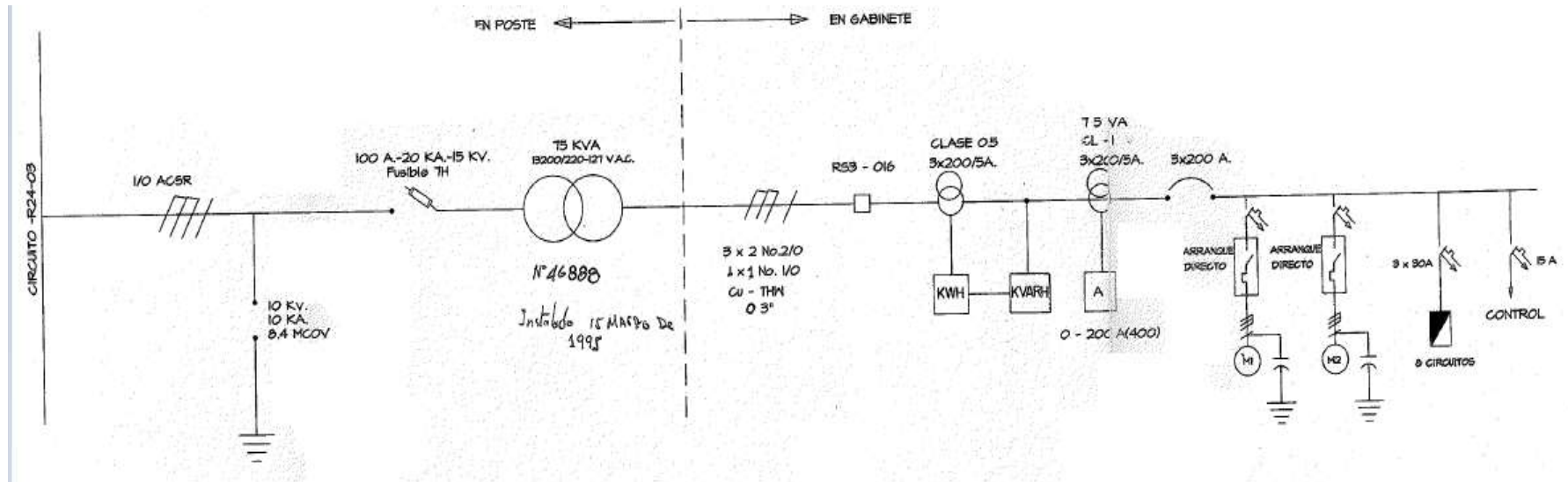
Localización sistema de bombeo



Nota. En la imagen se representa una vista de planta del sistema de bombeo y su localización. Tomado de la base de datos documentos EPM bombeo San Cristóbal

Ilustración 8

Diagrama unifilar



Nota: La imagen representa el diagrama unifilar de la estación de bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto. Tomado de la base de datos documentos EPM bombeo San Cristóbal.

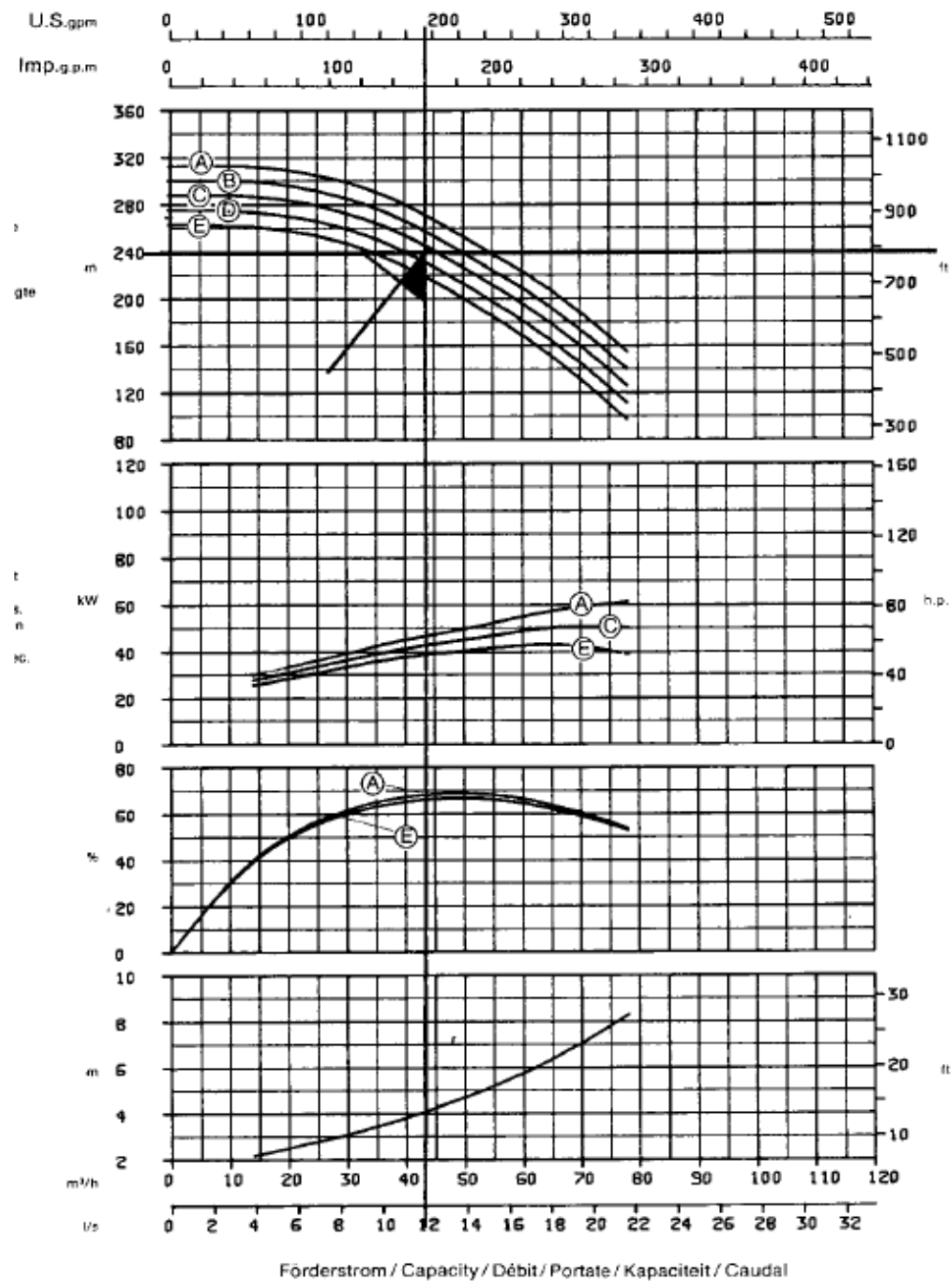
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

La **Ilustración 9** está dividida en 4 segmentos, donde en la parte superior se detallan las curvas de fábrica de la bomba con los diferentes diámetros de impulsores que se adaptan a la referencia de bomba detallando caudal y presión. Seguido se encuentra la potencia eléctrica requerida en el eje de la bomba según el diámetro del impulsor. En la tercera parte de la gráfica esta la curva de eficiencia de la bomba según el caudal y la presión de trabajo. Por último, en la parte inferior, está la cabeza neta de succión requerida (NPSHr). Tal como se observa, se traza una línea vertical en el requerimiento de caudal y presión del sistema de bombeo diseñado para esta instalación, es de esta manera que se hace la elección de la bomba y la potencia eléctrica requerida.

Para el caso de estudio, el diseñador eligió la bomba para trabajar en el BEP en un punto operativo con un caudal de 43,2 m³/h o 12 l/s y una presión de 240 m.c.a acoplado a un motor de 75 HP o 56 kW, de acuerdo con los datos reportados en la **Tabla 1**. Cabe aclarar que las dos motobombas son de iguales características.

Ilustración 9

Curva de fábrica bomba KSB



Nota. En el grafico se representan las curvas características de la bomba instalada en el bombeo San Cristóbal-Pedregal Alto. Tomado de la base de datos documentos EPM bombeo San Cristóbal

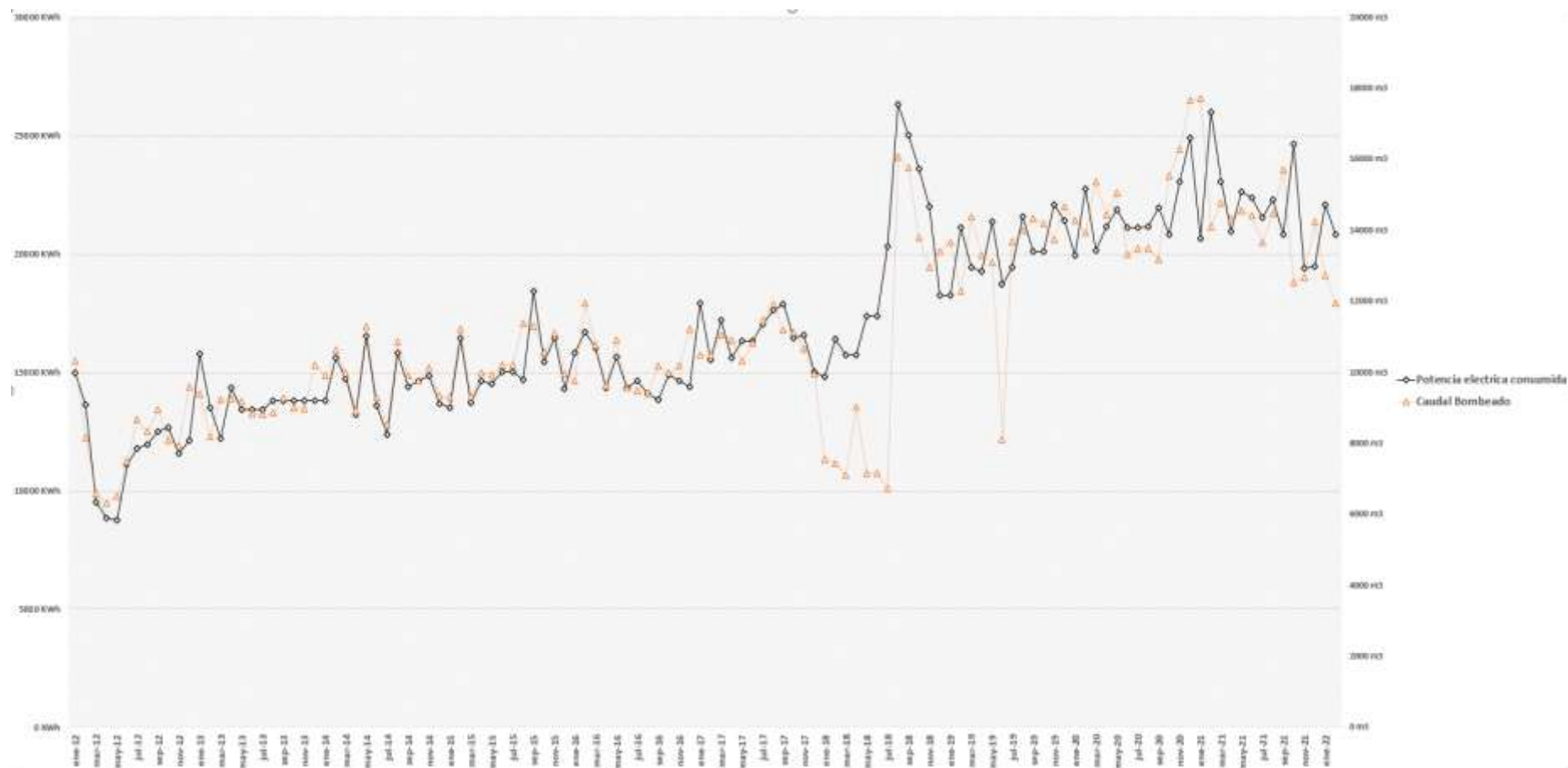
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

En la información disponible se encuentran los caudales bombeados, consumos y precios de la energía para un periodo de 10 años, este insumo sirve para conocer el comportamiento en el tiempo de la demanda de energía con el fin de identificar los principales factores que influyen en el incremento del consumo de energía eléctrica. Estos datos están representados en la **Ilustración 10**.

Esta información fue valiosa para evidenciar comportamiento en el tiempo y para el análisis desarrollado. identificarse identificó que en este sistema de bombeo con el paso del tiempo se viene incrementando su factor de utilización, lo que hace pertinente una revisión para ver las posibilidades de reducción de consumo energético en el sistema de bombeo.

Ilustración 10

Curva comportamiento consumo energía y caudal últimos 10 años

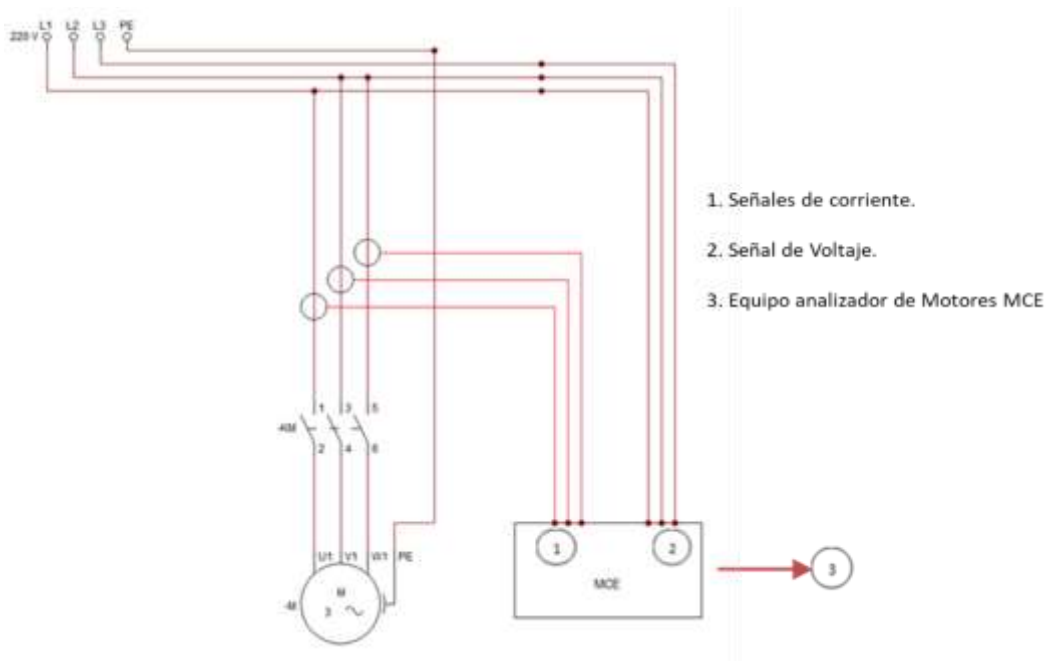


Nota: En el grafico se muestran los consumos de energía y el caudal de agua bombeado con este en un periodo de 10 años.

Las medidas de las variables eléctricas se realizan tomando las señales de corriente y voltaje de cada fase del motor, teniendo en cuenta los puntos señalados en la **Ilustración 11**.

Ilustración 11

Diagrama punto de conexión medida de variables eléctricas



Nota. En la gráfica se representa los puntos de conexión de las señales de voltaje y corriente para la toma de medidas con el equipo analizador de motores MCE.

Para la medición se utiliza un equipo analizador de motores MCE (*Motor Circuit Evaluation*), donde se presentan los datos de las principales variables eléctricas del motor, con el fin de obtener el punto de operación actual y el porcentaje de carga del equipo. En la **Tabla 2** y la **Tabla 3** se muestran los resultados de los datos obtenidos para el motor 1 y en la **Tabla 4** y la **Tabla 5**, los resultados de los datos obtenidos para el motor 2.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 2

Prueba de potencia eléctrica en el motor 1

Resultados potencia prueba eléctrica motor 1 tomada con el MCE				
Variable	kW	kVAR	kVA	Factor de potencia
Fase 1	13,68	9,10	16,43	0,83
Fase 2	13,69	9,14	16,46	0,83
Fase 3	13,54	8,95	16,23	0,84
Total	40,90	27,21	49,12	0,83

Nota: En la tabla se muestran los datos obtenidos en la prueba de potencia tomada con el MCE

Tabla 3

Prueba eléctrica en el motor 1

Resultados de la prueba eléctrica motor 1 tomada con el MCE	
Variable	Magnitud
Corriente 1	125,36 A
Corriente 2	125,70 A
Corriente 3	126,75 A
Voltaje 1-2	226,49 V
Voltaje 2-3	224,41 V
Voltaje 1-3	224,70 V

Nota: En la tabla se muestran los datos obtenidos en la prueba de eléctrica tomada con el MCE.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 4

Prueba de potencia eléctrica motor 2

Resultados potencia prueba eléctrica motor 2 tomada con el MCE				
Variable	kW	kVAR	kVA	Factor de potencia
Fase 1	14,49	8,83	16,96	0,85
Fase 2	15,18	8,41	17,36	0,88
Fase 3	14,88	8,94	17,36	0,86
Total	44,54	26,18	51,68	0,86

Nota: En la tabla se muestran los datos obtenidos en la prueba de potencia tomada con el MCE

Tabla 5

Prueba eléctrica en el motor 2

Resultados de la prueba eléctrica motor 2 tomada con el MCE	
Variable	Magnitud
Corriente 1	130,73 A
Corriente 2	134,30 A
Corriente 3	136,42 A
Voltaje 1-2	224,29 V
Voltaje 2-3	222,29 V
Voltaje 1-3	222,46 V

Nota: En la tabla se muestran los datos obtenidos en la prueba de eléctrica tomada con el MCE.

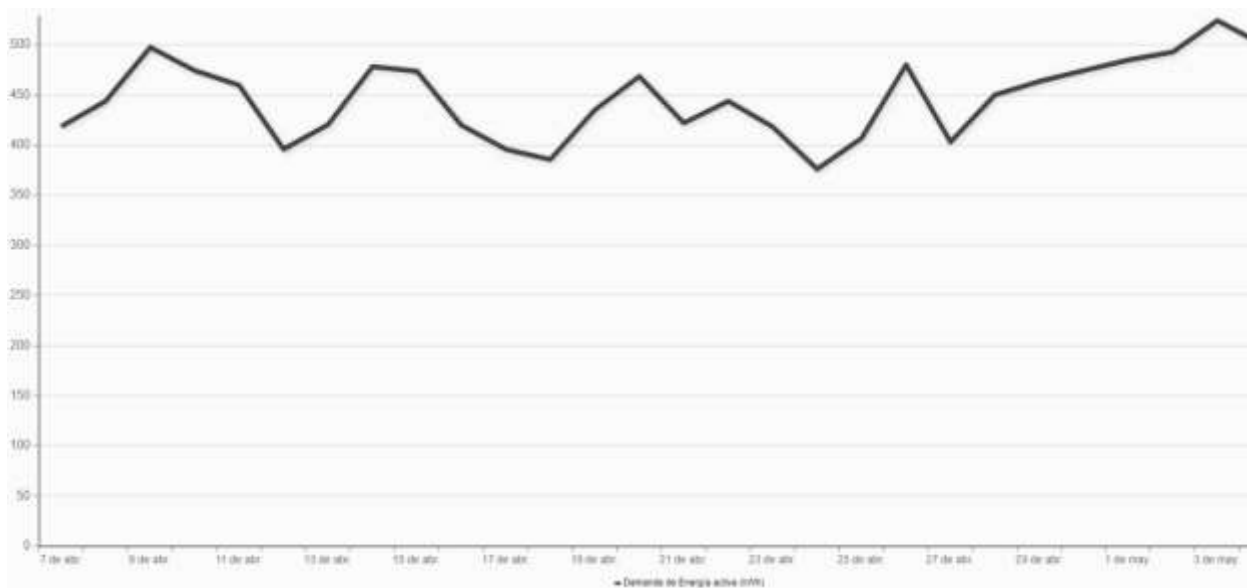
Cada motor demanda cerca de 45 kW con una corriente de 130 amperios.

Después de conocer los valores de operación para cada motor se estima la curva de demanda de energía diaria de la estación de bombeo. Para estimar la curva presentada en la **Ilustración 12**

se utilizó un analizador de calidad de potencia ION referencia 750 del fabricante *Schneider Electric* con clase de precisión 0.2 s, conectado al barraje principal de distribución del centro control de motores (CCM), según el esquema de conexión en la **Ilustración 13** usado para la toma las medidas.

Ilustración 12

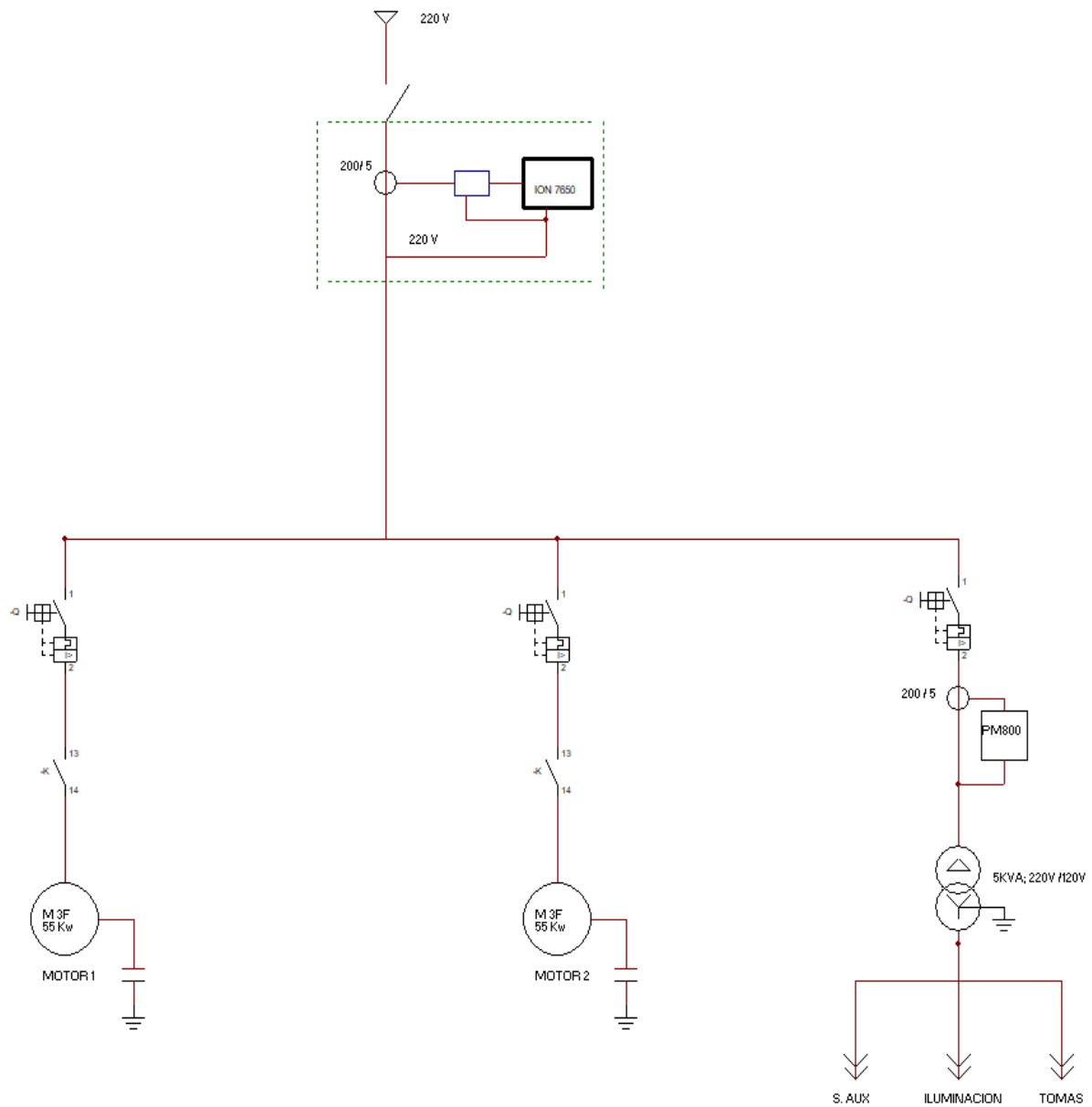
Curva demanda diaria sistema de bombeo San Cristóbal - Pedregal Alto



Nota. En el grafico se muestra la demanda diaria de potencia, tomada desde el 7 de abril al 3 de mayo del presente año.

Ilustración 13

Esquema de conexión punto de medida ION



Nota. En el diagrama se muestra el punto de conexión del ION

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Con esta información se puede concluir que los motores utilizados para accionar las bombas trabajan entre 10 y 12,5 horas diarias, lo que equivale a un promedio de 375 horas al mensuales y manteniendo un consumo de 500 kWh por día casi estable durante el mes. Con base en las mediciones de campo tomadas con el MCE se puede concluir que los motores se encuentran cargados al 66 % de su capacidad nominal.

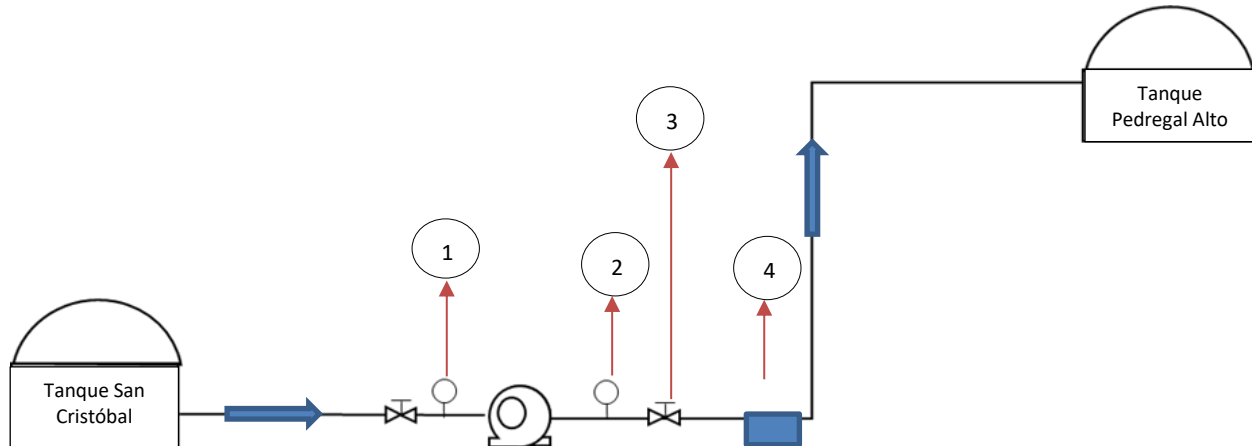
Para obtener un diagnóstico general de la condición actual del sistema de bombeo, se realiza una serie de mediciones que consisten en obtener información de las principales variables hidráulicas y eléctricas con la finalidad de conocer el punto de operación actual de la bomba respecto a la línea base que corresponde a los datos que reportan los diseños y las curvas suministradas por el fabricante.

Para la medición de las variables hidráulicas conforme a la **Ilustración 14**, se requiere mínimo de los siguientes elementos:

1. Manómetro de succión de la bomba.
2. Manómetro descarga de la bomba.
3. Válvula para regular la descarga de la bomba.
4. Medidor de Caudal.

Ilustración 14

Esquema general del montaje de instrumentos de medición



Nota. En la imagen se muestra el esquema de conexión para la toma de medidas hidráulicas presión y caudal y el sentido de flujo.

Esta medición se debe realizar para cada una de las bombas, trabajando solo una de las dos y quedando la restante apagada. De acuerdo con (UPME, 2018) y (Hydraulic Institute, 2011) la idea es reconstruir o caracterizar la curva de la bomba que está consignada en el diseño y realizar una comparación respecto al punto actual de operación. Para esto se utiliza el arreglo de elementos que se muestra en la **Ilustración 14**. Seguidamente se toman idealmente 5 puntos de operación en función del caudal, regulándolo escalonadamente en porciones del 25 % aproximadamente de la siguiente forma:

Punto 1 = 100% Caudal (Q), punto 2= 75% Q, Punto 3= 50% Q, Punto 4 = 25%,

Punto 5 = 0 % Q.

Se maneja teniendo en cuenta el caudal dado que el tipo de válvula que tienen instaladas en la impulsión o descarga de las motobombas son de tipo mariposa las cuales no son recomendadas

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

para hacer regulaciones dado que son diseñadas para ser usadas como válvulas de corte o de paso de flujo.

Para cada punto y bomba se debe registrar los siguientes datos:

- Presión de succión y descarga.
- Caudal.
- Potencia eléctrica.
- Velocidad de eje.
- Diferencia de altura entre manómetros.
- Nivel tanque de succión.

Teniendo en cuenta la información anterior y las recomendaciones encontradas en el estado del arte, se realizaron las respectivas mediciones de campo con el fin de validar las condiciones actuales y compararlas con las pruebas de diseño del fabricante para las dos motobombas en la estación de bombeo. En las **Tabla 6**, **Tabla 7** y **Tabla 8** se consignaron los valores de las variables de los puntos dados por catálogo por el fabricante y las tomadas en campo, respectivamente para cada motobomba.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 6

Curva original de las motobombas 1 y 2 a 3580 rpm (60Hz)

Q (l/s)	H (m)
0,00	303,41
4,09	302,89
6,14	295,04
8,18	286,67
10,23	272,02
12,27	251,10
14,32	237,50
16,37	209,25

Nota. En la tabla se muestran los datos de la curva original de la bomba. Tomados de la **Ilustración 9**.

Tabla 7

Datos de las pruebas de la motobomba 1, abril 25 de 2022 - 60 Hz

Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	Caudal (l/s)	Presión succión (m.c.a)	Presión impulsión (m.c.a)	h (m)	Nivel de tanque succión (m)
3564	40.9	8.2	1.5	264.3	0.15	2.7
3567	39.9	6.0	1.8	280.5	0.15	2.7
3563	33.6	3.1	2.1	290.0	0.15	2.7
3581	26.1	0	2.3	293.8	0.15	2.7

Nota. En la tabla se consignan los valores de las variables registradas en la prueba de eficiencia.

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 8

Datos de las pruebas de la motobomba 2, abril 25 de 2022 - 60 Hz

Velocidad eje (rpm)	Potencia (kW)	Caudal (l/s)	Presión succión (m.c.a)	Presión impulsión (m.c.a)	h (m)	Nivel de tanque succión (m)
3578	44.5	8.1	0.6	263.2	0.05	2.7
3579	41.4	6.3	1.0	271.8	0.05	2.7
3584	34.1	3.0	1.8	280.3	0.05	2.7
3588	28.1	0	2.1	285.4	0.05	2.7

Nota. En la tabla se consignan los valores de las variables registradas en la prueba de eficiencia.

Datos tomados en campo:

rpm: Revoluciones por minuto

Q: Caudal en litros por segundo [l/s].

Pd: Presión descarga en metros columna de agua [m.c.a.]

Ps: Presión de succión en metros columna de agua [m.c.a.]

h: Diferencia de altura entre manómetros [m].

Nivel de tanque succión [m].

Ecuaciones:

- Altura estática:

$$H_{Estática} = (P_d - P_s), \text{ Motobomba apagada} \quad (6)$$

- Factor perdidas en la tubería para calculo teórico del sistema:

$$\text{Factor } K = (P_d - P_s)/Q^2, \text{ Motobomba en funcionamiento} \quad (7)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Altura total teórica ($H_{T. Teórica}$):

$$H_{T. Teórica} = H_{Estática} + (K * Q^2) \quad (8)$$

Tabla 9

Datos del sistema hidráulico actual para motobomba 1

Dato	Caudal (l/s)	Presión (m)
H. Estática	0	178,4
Motobomba 1	8,20	263,60
Factor K	1,27	

Nota. En la tabla se muestran los datos tomados en la prueba de eficiencia seguido del cálculo del factor K haciendo uso de la ecuación (7)

Tabla 10

Datos del sistema hidráulico actual para motobomba 2

Dato	Caudal (l/s)	Presión (m)
H. Estática	0	178,4
Motobomba 2	8,10	263,29
Factor K	1,29	

Nota: En la tabla se muestran los datos tomados en la prueba de eficiencia seguido del cálculo del factor K haciendo uso de la ecuación (7).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 11

Curva sistema general

HT. Teórica	Q
178,40	0
183,52	2
198,88	4
224,48	6
260,32	8
282,08	9
293,92	9,5
306,40	10

Nota. En la tabla se muestran los datos calculados para el sistema haciendo uso de la presión estática tomada en campo y el factor K calculado, dando valores de caudal ascendente e ingresando los datos en la ecuación (8)

Tabla 12

Datos adicionales del sistema de bombeo

Dato	Valor
Área succión (m ²)	0,0015
Área impulsión (m ²)	0,0013
η_{motor}	0,83
rpm (operativa)	3580
rpm (nominal)	3540
Área succión general (m ²)	0,0030
Área impulsión general (m ²)	0,0020

Nota. En la tabla se presentan datos adicionales de características del sistema de bombeo en estudio.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Velocidad del fluido en la impulsión:

$$V_{Impulsión} = (Q[l/s] / 1000) * A_{Impulsión} [m^2] \quad (9)$$

- Velocidad del fluido en la succión:

$$V_{Succión} = (Q[l/s] / 1000) / (A_{Succión} [m^2]) \quad (10)$$

- Altura

$$h_v = (V_{Impulsión}^2 - V_{Succión}^2) / (2 * g) \quad (11)$$

- Altura total:

$$H_T = P_{Impulsión} + h - P_{Succión} + h_v \quad (12)$$

- Potencia hidráulica:

$$PH = \gamma * (Q[l/s]/1000) * H_T \quad (13)$$

- Potencia en eje del motor (BHP):

$$BHP = PE / \eta_{Motor} \quad (14)$$

- Eficiencia bomba (η_{Bomba}):

$$\eta_{Bomba} = Q * H_T / (102 * PE) \quad (15)$$

- Factor consumo de kWh/m³

$$Factor kWh/m^3 = PE / (Q * 3,6) \quad (16)$$

Con los datos obtenidos en campo se pueden construir las curvas que describen el punto de operación actual de las bombas, este es donde se intercepta la curva de la bomba con la curva del sistema actual (Mott, R. L., Untener, 2015).

La curva de la bomba original se construye con 5 puntos seleccionados desde la información presentada en los diseños, las curvas actuales de las bombas se grafican con los 5 datos propuestos

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

en el procedimiento para las pruebas de campo y, por último, la curva del sistema debe construirse de manera teórica utilizando las ecuaciones: (6), (7), (8) y (9).

En las **Tabla 13**, **Tabla 14** se muestran los datos recopilados en la prueba realizada en campo donde se obtuvieron las variables hidráulicas y eléctricas más los respectivos cálculos haciendo uso de las ecuaciones: (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15) y (16) para la motobomba 1 y 2 respectivamente.

Tabla 13

Calculo motobomba 1 a 60 Hz

Apertura Válvula (%)	Q (l/s)	Pd (m)	Ps (m)	Vd (m/s)	Vs (m/s)	h (m)	hv (m)	Ht (m)	PH (kW)	PE (kW)	BHP	η (bomba)	Factor kWh/m ³
100%	8,20	264,30	1,50	6,47	5,39	0,15	0,65	263,60	21,18	40,90	33,947	62,4%	1,386
73%	6,00	280,50	1,80	4,74	3,95	0,15	0,35	279,20	16,42	39,90	33,117	49,6%	1,847
38%	3,10	290,00	2,10	2,45	2,04	0,15	0,09	288,14	8,75	33,60	27,888	31,4%	3,011
0%	0,00	293,80	2,30	0,00	0,00	0,15	0,00	291,65	0,00	26,10	21,663	0,0%	0

Tabla 14

Calculo motobomba 2 a 60 Hz

Apertura Válvula (%)	Q (l/s)	Pd (m)	Ps (m)	Vd (m/s)	Vs (m/s)	h (m)	hv (m)	Ht (m)	PH (kW)	PE (kW)	BHP	η (bomba)	Factor kWh/m ³
100%	8,10	263,20	0,60	6,39	5,33	0,05	0,64	263,29	20,90	44,54	36,9682	50,6%	1,527
78%	6,30	271,80	1,00	4,97	4,14	0,05	0,39	271,24	16,75	41,40	34,362	43,6%	1,825
37%	3,00	280,30	1,80	2,37	1,97	0,05	0,09	278,64	8,19	34,10	28,303	25,9%	3,157
0%	0,00	285,40	2,10	0,00	0,00	0,05	0,00	283,35	0,00	28,10	23,323	0,0%	

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

En el caso de la construcción de curva de eficiencia del motor se mide con un analizador de redes FLUKE 435-II y con la función analizador de motores propia del equipo se toma la eficiencia para varios puntos de carga como se ilustra en la **Tabla 15**. esta variación de carga se puede lograr estrangulando la válvula de descarga de la bomba.

Tabla 15

Eficiencia a diferentes % de carga

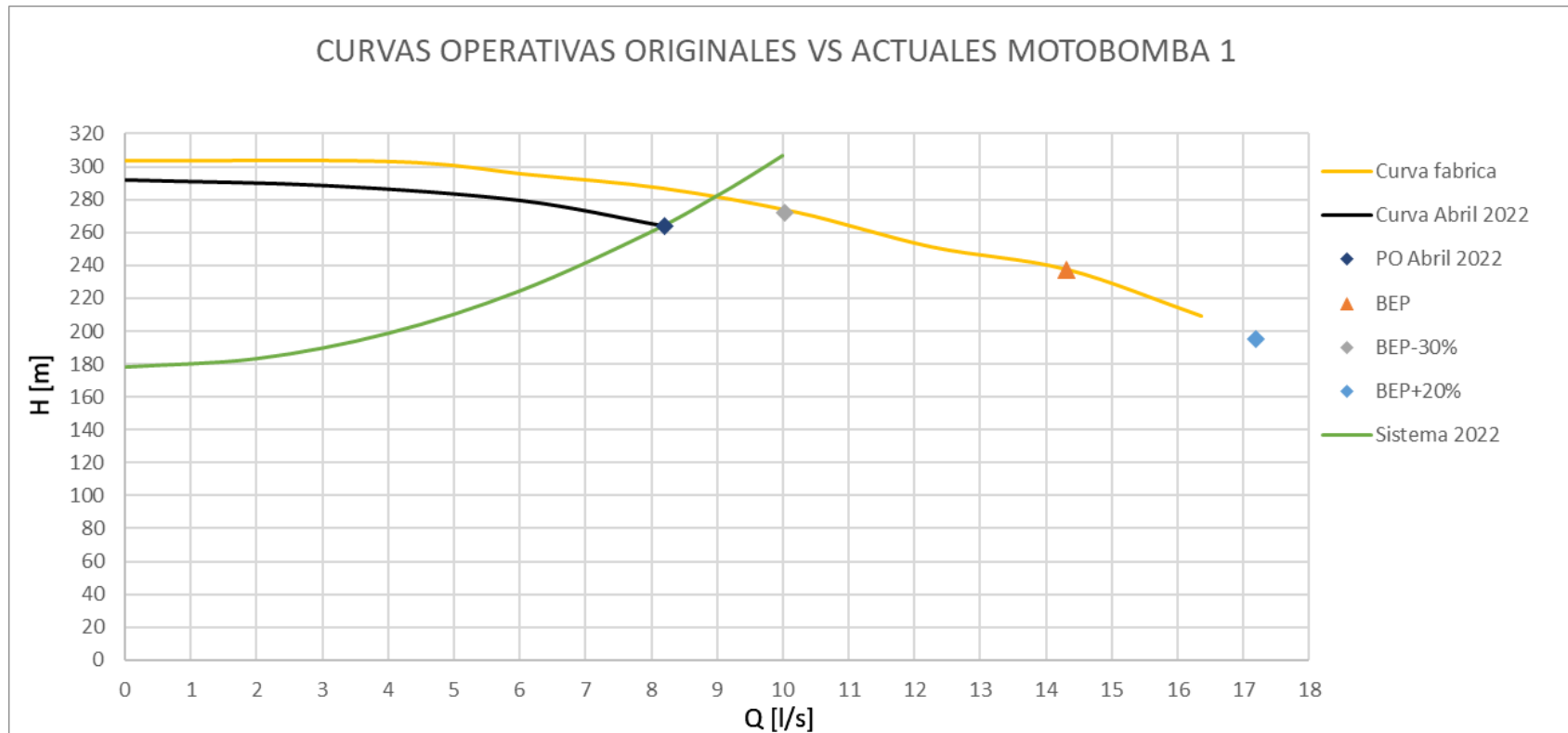
Factor de carga [%]	Eficiencia Motor Estándar [%]
0	0
10	45,6
20	66,6
30	77
40	80,8
50	81,8
60	82
70	82,2
80	82,3
90	81,9
100	80,3

Nota. En la tabla se describen los valores porcentaje de eficiencia del motor según el factor de carga asociado en el caso de estudio a la bomba.

A continuación, se grafica la curva original de la bomba los datos se encuentran detallados en la **Tabla 6** y las variables obtenidas en campo de caudal (Q) y presión (m.c.a) para la motobomba 1 la **Tabla 7** y en la **Tabla 8** los datos de la motobomba 2 adicional a esto se grafica el sistema que se puede ver en la **Tabla 11** comparado con el BEP original y los rangos aceptables.

Ilustración 15

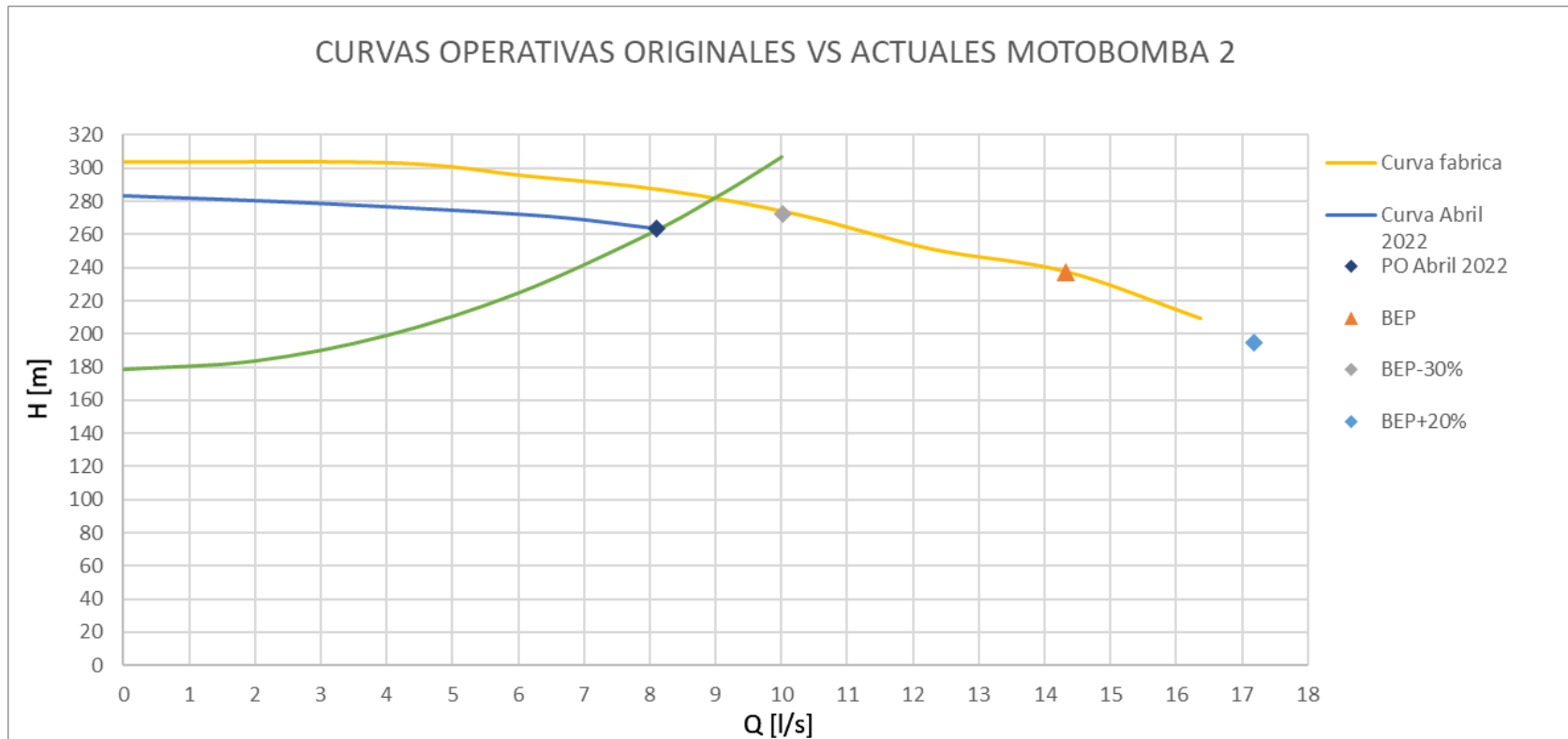
Curvas operativas motobomba 1



Nota. En el grafico se detallan las curvas operativas de la motobomba 1 orinal vs la actual, el sistema actual y el BEP con el rango permisible.

Ilustración 16

Curvas operativas motobomba 2



Nota. En el grafico se detallan las curvas operativas de la motobomba 2 orinal vs la actual, el sistema actual y el BEP con el rango permisible.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

En base a la información de variables eléctricas e hidráulicas obtenidas y de las **Ilustración 15** e

Ilustración 16 se puede concluir lo siguiente:

- Los motores trabajan al 70 % de la carga máxima, este rango de operación se puede considerar susceptible de mejora desde el punto de vista del desempeño, ya que los motores presentan un mejor rendimiento en valores del 75 % al 100 % de su carga nominal (Trianni et al., 2019a).
- No se evidencian desbalances importantes en la tensión de suministro.
- No existe una discrepancia relevante entre la tensión nominal del equipo y la disponible en la red de alimentación eléctrica.
- El factor de utilización para los motores de la estación de bombeo supera el 50% de las horas posibles de operación en el mes.
- El punto actual de operación de las bombas se ubica en -42 % del punto de mayor eficiencia BEP. Este rango de operación es inaceptable tanto desde el punto de vista del desempeño como el de la vida útil de los equipos.
- Las curvas de actuales de las bombas presentan una caída en la presión respecto a la curva de línea base, esto evidencia desgastes en los componentes internos de la bomba.
- La condición actual de la curva del sistema obliga a que las bombas operen muy a la izquierda del punto BEP, esto se debe a un alto grado de colmatación en las tuberías de descarga que restringen el caudal aumentando las pérdidas hidráulicas, teniendo en cuenta que estas tuberías tienen 26 años de antigüedad.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Con base en lo que describen los autores (Lam et al., 2017), el conjunto motor bomba con mejor desempeño del indicador KPI Factor kW/m^3 es la motobomba 1 con un factor = 1.38 kW/m^3 comparada con la motobomba 2 con un factor = 1.52 kW/m^3 . Esto quiere decir que la bomba 2 requiere más energía para transportar casi el mismo volumen de fluido.
- Analizando los datos medidos en campo se puede concluir de manera general que el sistema no opera en un punto aceptable de desempeño.

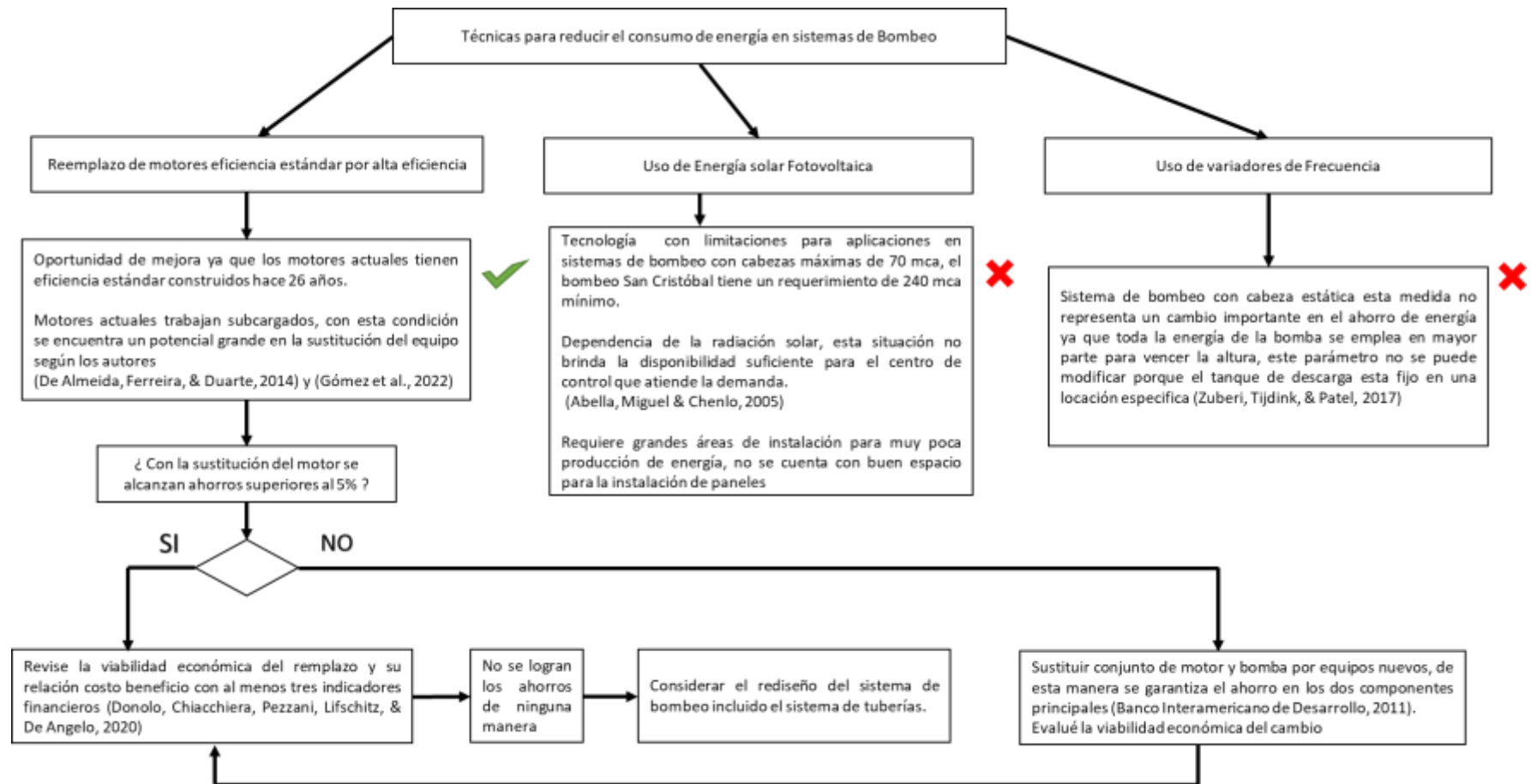
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

3.2 PRINCIPALES TÉCNICAS DE AHORRO ENERGÉTICO UTILIZADAS EN SISTEMAS DE BOMBEO

En esta sección se presentan las técnicas encontradas en el estado del arte que permiten obtener ahorros particularmente en sistemas de bombeo, en la **Ilustración 17** se realiza un análisis de viabilidad para la implementación de cada técnica teniendo en cuenta las principales ventajas y limitaciones.

Ilustración 17

Evaluación técnica



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

En la revisión literaria se encuentran tres técnicas con un buen potencial de ahorro energético como se evidencia en la **Ilustración 17**; sin embargo, dos de ellas presentan un conflicto asociado al contexto operativo del sistema, por lo que desde el punto de vista técnico son inviables, ya que la distribución de agua potable hacia el sector tiene unas proyecciones de demanda establecidas y cambiarlas afectaría la prestación del servicio.

Si bien la implementación de variadores de velocidad son una técnica altamente reconocida y aplicada en sistemas de bombeo como medio para lograr ahorros energéticos, en sistemas de cabeza estática no se logran ahorros potenciales. En el caso del sistema de bombeo de San Cristóbal la cabeza estática o diferencia de alturas entre los tanques es de 240 m.c.a. Por esta razón, la mayor parte de la energía se requiere para superar la altura entre los puntos mencionados de manera que la variación del caudal no tiene un impacto importante en el ahorro de energía.

Igualmente, el uso de energía fotovoltaica tiene una dependencia directa de la radiación incidente del sol la cual condiciona la operación del sistema a factores externos y altamente dinámicos afectando la prestación del servicio adicionalmente según los autores (Abella, Miguel & Chenlo, 2005) esta tecnología solo esta madurada para sistemas de bombeo con cabeza estática máxima de 70 metros de columna de agua y caudales de 20 m³/h; rangos típicos para sistemas de bombeo de riego y distribución de agua potable para no más de 5 personas. Además, esta tecnología requiere de una gran área disponible para la instalación de paneles fotovoltaicos que se termina convirtiendo en un factor determinante para que la aplicación de la tecnología sea técnicamente inviable en el caso del bombeo Pedregal Alto, ya que no se cuenta con espacio disponible en área para instalar paneles fotovoltaicos.

Por esta razón, y con base en las limitaciones encontradas para aplicar las dos técnicas anteriormente mencionadas, la técnica con mayor viabilidad y facilidad de implementación, sin

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

afectar de manera drástica la operación del sistema, es la sustitución de los motores de eficiencia estándar por alta eficiencia. En caso de obtener menos del 5 % de ahorro en consumo de energía, la mejor práctica sería sustituir el motor y la bomba con el fin de garantizar ahorros en los dos componentes que proporcionan energía al sistema y afectan de manera global su eficiencia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO TÉCNICA DE MAYOR IMPACTO

Adicional a la viabilidad técnica, se debe realizar una evaluación económica que permita conocer la relación costo beneficio de implementar la sustitución de los motores. El ahorro en consumo de energía se puede llevar a beneficios ambientales, tal y como lo sugieren (De Almeida et al., 2014), (de León García Gabriel et al., 2019) ,(Singh et al., 2019) y (Torregrossa & Capitanescu, 2019), quienes demostraron que la sustitución de motores por tecnologías de alta eficiencia también tiene una importancia en la reducción de emisiones equivalentes de CO₂.

Como punto de partida se consulta la base de datos del fabricante WEG disponible en la web con la siguiente dirección: https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp#

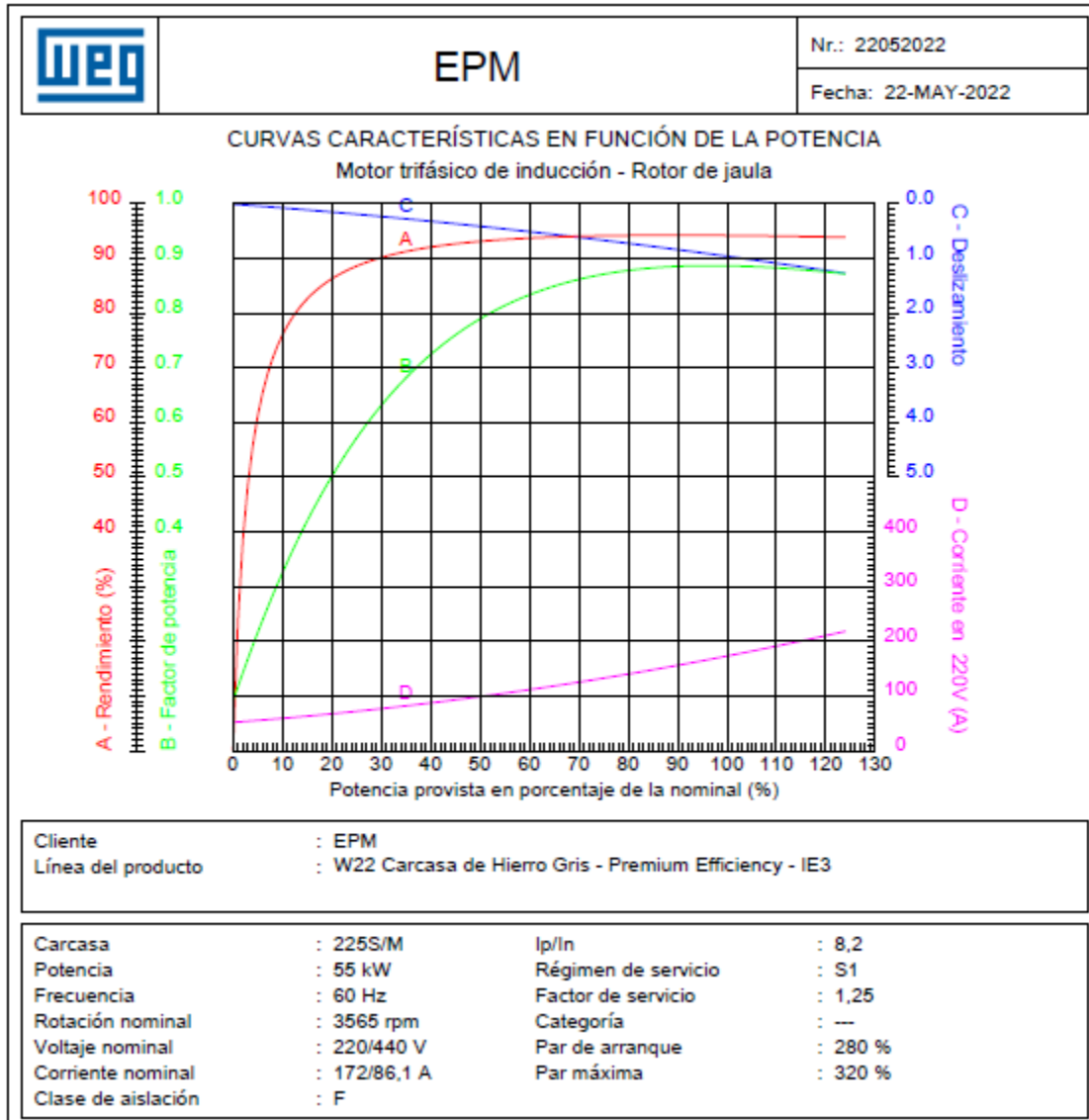
En la interfaz del fabricante se seleccionan los filtros de acuerdo con las características del motor que se desea consultar:

- Tipo de eficiencia: IE3
- Frecuencia: 60Hz
- Voltaje: 220 V/440 V
- Número de polos: 2
- Potencia: 55 kW

El fabricante del motor proporciona las curvas de desempeño para un Motor IE3 según la **Ilustración 18** mostrada a continuación.

Ilustración 18

Curva característica motor en función de la carga



Nota. Curvas características desempeño motor IE3. Tomado de *base de datos documentos EPM*

A partir de estos datos se puede realizar una comparación grafica entre la eficiencia del motor IE3 con respecto al motor de eficiencia estándar que actualmente existe en la estación de bombeo, comparando en la **Tabla 16** las curvas de eficiencia de los motores a diferente proporción de carga.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 16

Comparación del factor de carga motores

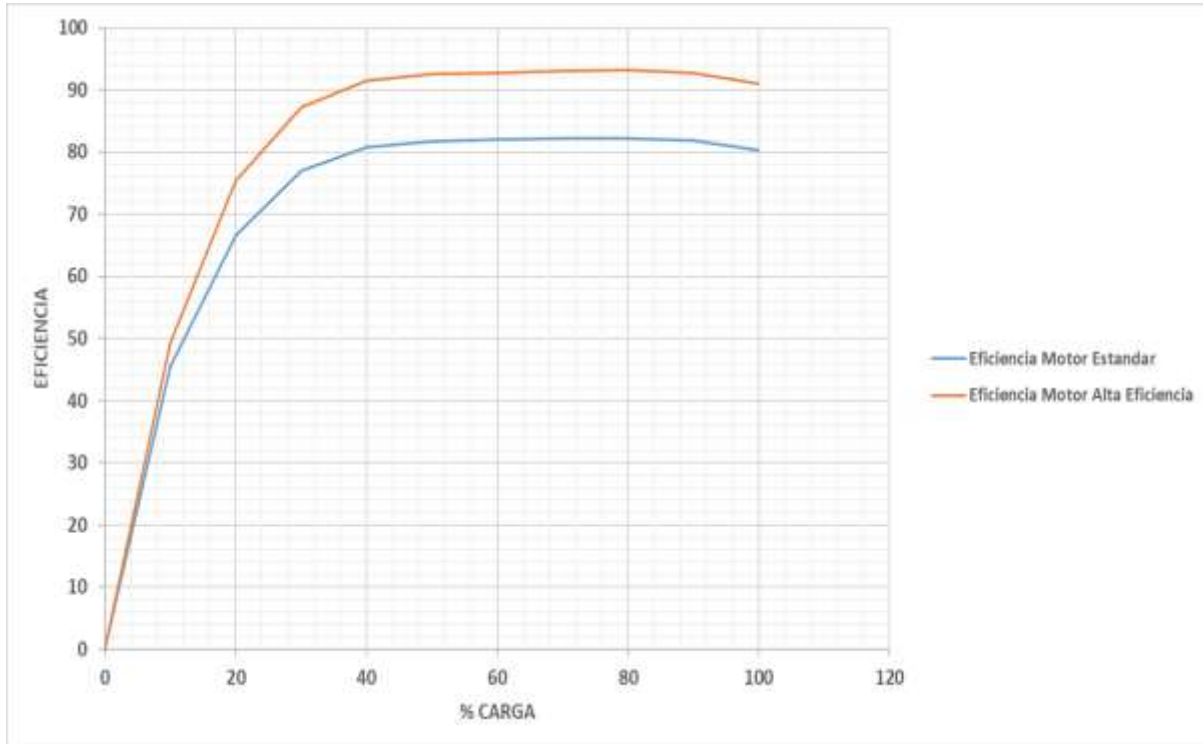
Factor de carga %	Eficiencia Motor Estándar	Eficiencia Motor Alta Eficiencia
0	0	0
10	45,6	49,4
20	66,6	75,4
30	77	87,2
40	80,8	91,5
50	81,8	92,6
60	82	92,8
70	82,2	93,1
80	82,3	93,2
90	81,9	92,7
100	80,3	91

Nota. En la tabla se detallan porcentajes de carga de 0 a 100% y se compara la eficiencia del motor estándar vs el de alta eficiencia.

En la **Ilustración 19** se detallan las curvas del comportamiento efectivo según el factor de carga del motor de eficiencia estándar comparadas con el motor de alta eficiencia.

Ilustración 19

Curvas factor de carga motor estándar vs alta eficiencia



Nota. En el gráfico se detalla el porcentaje de aumento en eficiencia del motor IE3 comparándolo con el IE1

El punto de operación actual de los motores se encuentra en el 70% de la carga nominal, se asume que el motor IE3 trabajaría en este mismo punto ya que tiene la misma capacidad de potencia según la **Tabla 16**. En este punto el motor actual tiene una eficiencia del 82% mientras que el IE3 tendría una eficiencia del 93%. El rendimiento propuesto es mayor en todos los casos de porcentaje de carga.

3.3.1 Consideraciones técnicas para el cálculo

Para efectos del cálculo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones como punto de partida.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Tanto el motor existente como el del caso propuesto trabajan en el mismo porcentaje de carga.
- El tiempo de operación no cambia con la sustitución del equipo, según los datos registrados en campo el promedio de horas de trabajo por día es de 12.5 horas.

En la **Tabla 17** se muestran las características técnicas de los equipos actuales y el caso propuesto.

Tabla 17

Características motor actual vs el propuesto

Atributo	Motor Actual	Motor Propuesto
Voltaje	220V/440 V	220V/440 V
Corriente	188 A /94 A	172 A / 86,1 A
Potencia	75 HP	75 HP
Velocidad	3540 rpm	3565 rpm
Frecuencia	60 Hz	60 Hz
Factor de servicio	1	1,25
Numero de polos	2	2
clase de aislamiento	F	F
Eficiencia Nominal	0,83	0,94
Factor de Potencia	0,92	0,85

No hay cambios relevantes entre los equipos a excepción de la velocidad, los motores de alta eficiencia se caracterizan por tener deslizamientos menores, por lo que presentan una menor variación de velocidad con la carga. Según los autores (Zuberi, Tijdink, & Patel, 2017), las cargas cuadráticas o de par variable como bombas y ventiladores varían su carga en función de la

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

velocidad, es decir que la potencia en el eje para estas aplicaciones es ligeramente mayor cuando se tiene un motor trabajando con mayor velocidad, es muy importante reevaluar la potencia en el eje que presentara el motor IE3 con la siguiente formula descrita en las leyes de afinidad para bombas rotodinámicas.

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (17)$$

Se debe despejar BHP_2 de la ecuación (17) de manera que:

$$\frac{BHP_1}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3} = BHP_2 \quad (18)$$

Donde:

BHP_1 = Potencia en el eje motor eficiencia estándar

BHP_2 = Potencia en el eje motor alta eficiencia

N_1 = Velocidad en el eje motor eficiencia estándar

N_2 = Velocidad en el eje motor alta eficiencia

De esta manera se puede estimar la potencia demandada en el eje para el motor del caso propuesto que debe ser ligeramente mayor debido a la velocidad.

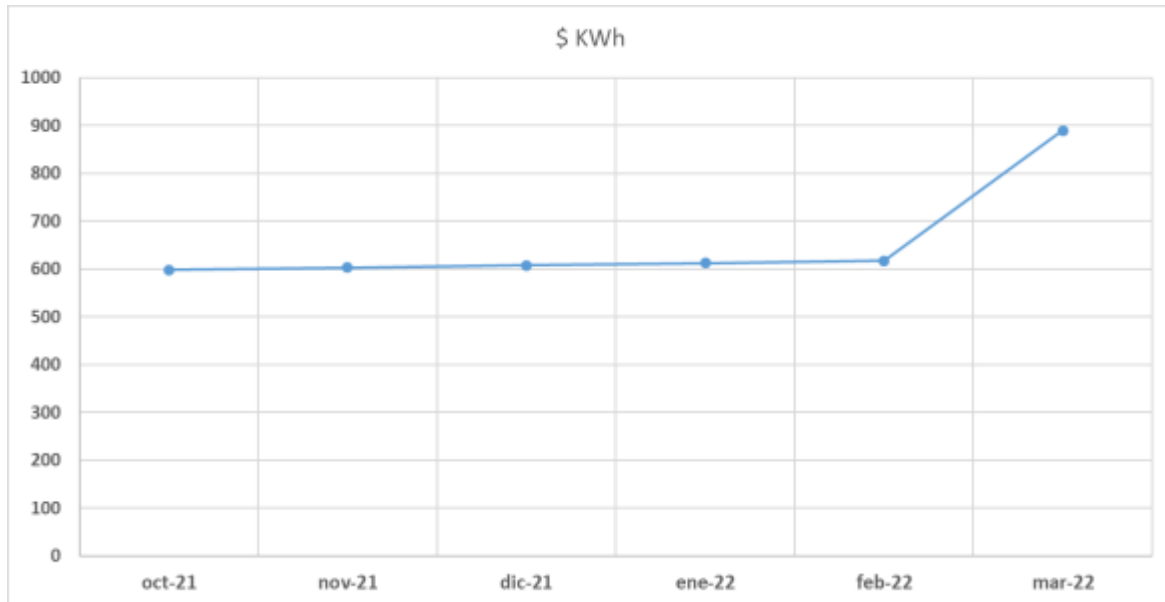
3.3.2 Consideraciones Económicas

- Según las últimas facturas de consumo de energía en la estación de bombeo objeto de estudio el precio promedio de la electricidad es de \$ 654 kWh como se puede ver en la

Ilustración 20 a continuación.

Ilustración 20

Tendencia consumo \$kWh



Nota. Tendencia costo kWh en la instalación. Adaptado de base de datos documentos EPM

- Para la evaluación de este tipo de proyectos se considera una vida útil del equipo de 10 años según (Donolo et al., 2020).
- Se considera una Inflación del 5.6% según el banco de la república el año 2021 con este valor de inflación en el país.(B.Republica, 2022)
- La tasa de escalamiento de la electricidad se considera del 3%.
- Durante la vida útil del equipo se consideran dos reposiciones de rodamientos, en el año 5 y el año 10.
- Según los datos suministrados por el fabricante de motores se considera un precio de 34.276.000 \$COP. Este valor se consolida como la inversión inicial.(WEG, 2021)
- Precio de reposición cambio de rodamientos año 5 por un valor de 1.116.119 \$COP.
- Precio de reposición cambio de rodamientos año 10 por un valor de 1.465.744 \$COP.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Costos del Montaje 708.455 \$ COP
- Costos del mantenimiento anual (predictivo). 1.249.888 \$ COP.

3.3.3 Evaluación financiera de la sustitución de motor de eficiencia estándar por alta eficiencia

En esta sección se presenta la memoria de cálculos realizado para obtener la viabilidad financiera de implementar el cambio propuesto, partiendo de las consideraciones técnicas y económicas. En las metodologías consultadas por los autores (Didn & Check, 2013), (Aguiar, 2022) y (Donolo et al., 2020) proponen llevar los costos y consumos de energía a valores anualizados.

Los principales componentes considerados en el flujo de caja para este tipo de evaluación son los ahorros en electricidad debido a la sustitución del motor por alta eficiencia y se considera como un ingreso para el proyecto, por parte de las salidas o egresos se consideran la inversión inicial y los costos de mantenimiento.

- Potencia mecánica (PM).

$$\text{Potencia Mecanica } M_1 = \text{Potencia electrica medida} \times \eta_{M1} \quad (19)$$

$$\text{Potencia Mecanica } M_2 = \frac{BHP_1}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3} \quad (20)$$

- Potencia eléctrica (PE)

$$\text{Potencia Mecanica } M_1 = 44.5 \text{ KW}$$

$$\text{Potencia Eléctrica } M_2 = \frac{\text{Potencia Mecanica } M_2}{\eta_{M2}} \quad (21)$$

- Energía consumida en el año

$$\frac{\text{Energía consumida}}{\text{año } M_{1,2}} = PE \times N^\circ \text{ de horas Operación día} \times 365 \quad (22)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Ahorro de energía al año.

$$\frac{\text{Ahorro de energía}}{\text{año}} = \text{Energía consumida } M_1 - \text{Energía consumida } M_2 \quad (23)$$

$$\frac{\% \text{ Ahorro de energía}}{\text{año}} = \left(\frac{\text{Energía consumida } M_1 - \text{Energía consumida } M_2}{\text{Energía consumida } M_1} \right) \times (100) \quad (24)$$

- Costo anual de operación.

$$\text{Costo anual de operación } M_{1,2} = \frac{\text{Energía consumida } M_{1,2}}{\text{año}} \times \$KWh \quad (25)$$

- Costo ahorro anual de energía.

$$\frac{\text{Ahorro } \$}{\text{Año}} = \text{Costo anual operación } M_1 - \text{Costo anual operación } M_2 \quad (26)$$

Los cálculos se presentan de manera ordenada en la **Tabla 18**, una vez se obtienen los costos anualizados de ahorros e inversiones los datos servirán de insumo para la evaluación de los indicadores, VAN, TIR, ROI y relación costo beneficio.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Tabla 18

Calculo financiero motor actual vs propuesto

Consideración	Motor Estándar M₁	IE3 Alta Eficiencia M₂
Potencia del Motor (kW)	55 kW	55 kW
Carga	0,7	0,7
Eficiencia Nominal	0,83	0,94
Eficiencia de Operación	0,82	0,93
Potencia Mecánica Entregada	36,49 kW	37,3 kW
Potencia Eléctrica Demandada	44,5 kW	40,1 kW
Horas de Operación mensual	12,5 hrs	12,5 hrs
Energía Consumida al Año	203.031 kWh/Año	182.836 kWh/Año
Precio Promedio de la energía	654,00 \$COP	654,00 4COP
Ahorro de energía / Año	20.195 kWh/Año	
Costo De Operación Año	132.782.437,50 \$COP	119.574.991,06 \$COP
Ahorro \$ /Año	13.207.446,44 \$COP	
% Energía ahorrada	9,9%	

Los ahorros anuales derivados de la sustitución del motor son de 13.207.446 \$COP con una inversión inicial de 34.276.000 \$COP la tasa de escalamiento de la electricidad del 3% y una tasa

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

de descuento (inflación) del 5.6 %, con esta información se realizan los cálculos de flujo de caja teniendo en cuenta la reposición de rodamientos a los 5 y 10 años respectivamente. Los flujos de caja se calculan con base a la ecuación (4).

$$VAN = -I_0 + \frac{\text{Flujo de caja}}{(1+r)^1} + \frac{\text{Flujo de caja}}{(1+r)^2} + \dots + \frac{\text{Flujo de caja}}{(1+r)^{10}} \quad (27)$$

A continuación, se muestran los flujos de caja para cada año del proyecto de sustitución del motor objeto de estudio presentados en la **Tabla 19**.

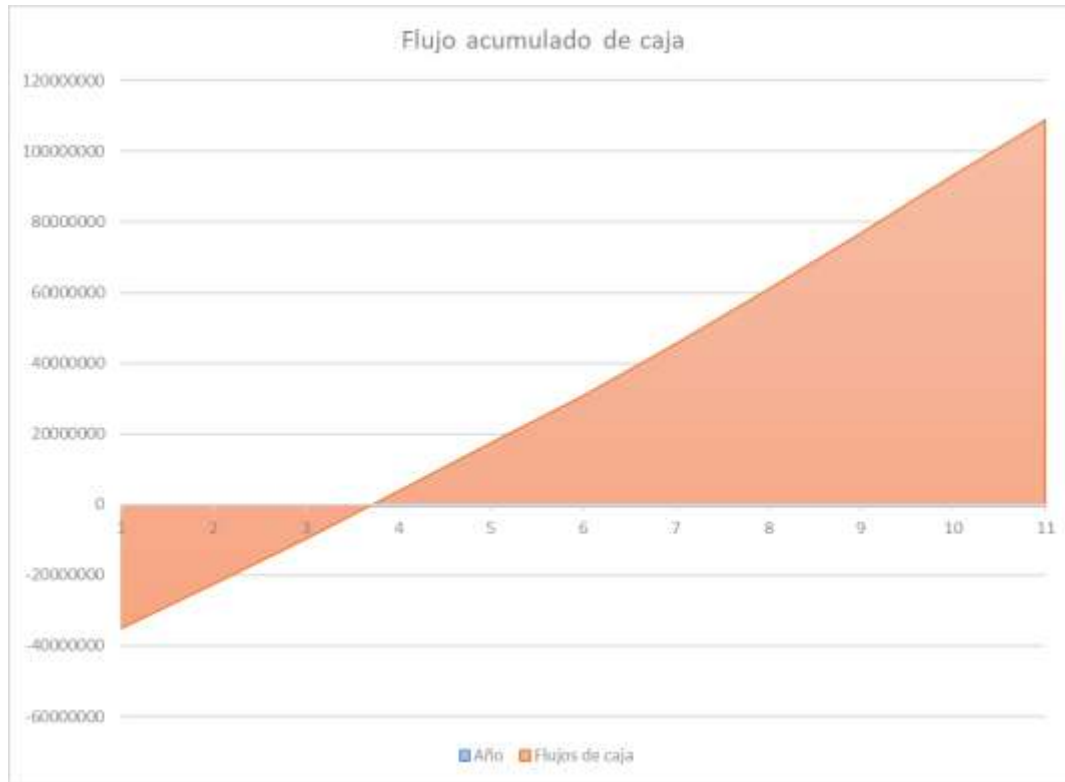
Tabla 19

Flujo de caja

Año	Flujos de caja
0	-\$ 34,984,455
1	-\$ 22,564,391
2	-\$ 9,673,450
3	\$ 3,697,282
4	\$ 17,557,265
5	\$ 30,747,010
6	\$ 45,616,054
7	\$ 61,006,008
8	\$ 76,928,530
9	\$ 93,395,839
10	\$ 108,954,975

Ilustración 21

Flujo de caja acumulado



Nota. En la ilustración se presenta el flujo de caja desde la inversión inicial hasta el tiempo de vida del proyecto propuesto

El valor para el año 10 en los flujos de caja acumulado es igual al VAN. La interpretación de este valor según (Didn & Check, 2013) es que un VAN mayor a cero indica que la inversión debe realizarse, entendiendo esto el VAN parece ser atractivo para el caso propuesto.

Para el cálculo del indicador TIR se utiliza la Función TIR en una hoja de cálculo de Excel.

$$TIR = 29.6 \%$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

La TIR presenta un valor muy superior a la Inflación, este indicador también confirma la viabilidad financiera de realiza la inversión para la sustitución del motor, esto quiere decir que los ahorros en electricidad alcanzan a cubrir la inversión y los costos de operación y mantenimiento haciendo rentable el caso propuesto para el motor de alta eficiencia.

El retorno de la inversión en años se muestra en la ilustración 20, para evaluar este indicador de forma matemática, se emplea la relación entre la inversión inicial y los flujos anualizados de ahorros obtenidos menos los gastos de mantenimiento.

- Retorno simple de la inversión (ROI):

$$ROI = \frac{I_0 + Montaje}{Costo de Ahorros - Mantenimiento} \quad (28)$$

Reemplazando lo valores en la ecuación (28) obtenemos:

$$ROI = \frac{34.276.000 + 708.455}{13.207.446 - (1.116.191 + 1.465.744 + 1.249.888)} = 3.7 \text{ años}$$

Dado el resultado se obtiene que el retorno simple de la inversión se daría en 3.2 años.

La relación costo beneficio del caso propuesto se evalúa con la ecuación sugerida por (Didn & Check, 2013), si dicha relación es mayor a 1 quiere decir que el caso propuesto supera las expectativas del costo en proporción al factor calculado y se puede interpretar como que la inversión tiene un repago en el tiempo de vida del equipo.

$$Relacion Costo Beneficio = \frac{VAN}{I_0 + montaje} = 2.9 \quad (29)$$

El factor indica que el motor de alta eficiencia tiene un repago de 2.9 veces su valor inicial durante toda su vida útil de operación.

En el cálculo de las emisiones de CO₂ dejadas de producir por ahorros de electricidad se considera una comparación con base en la matriz energética de Colombia según establece la

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

resolución 382 del 2021 resuelta por (UPME, 2021) la cual considera un factor de conversión de 0.203 tonCO_{2eq}/MWh para inventarios de GEI teniendo en cuenta un ahorro de energía de 20.195 kWh/Año, se obtiene que.

$$\frac{\text{Reduccion de ton } CO_2}{\text{Año}} = 20,2 \text{ MWh} \times 0,203 \frac{\text{ton } CO_{2eq}}{\text{MWh}} \quad (30)$$

De ecuación (30) obtenemos:

$$\frac{\text{Reduccion de ton } CO_2}{\text{Año}} = 4,1 \text{ ton } CO_{2eq}$$

La sustitución de los motores en la estación de bombeo parece ser una solución de fácil implementación a diferencia de las otras técnicas esta no modifica los rangos de operación y demanda actual del sistema de bombeo, los tres indicadores financieros mostraron un escenario muy favorable para realizar la sustitución con el caso propuesto, los ahorros obtenidos con la implementación de un motor de alta eficiencia son cercanos al 10% de acuerdo con (Banco Interamericano de Desarrollo, 2011) este ahorro es suficiente para solo considerar la sustitución del motor dejando la misma bomba.

Con el ahorro de electricidad presentado se puede alcanzar una reducción de emisiones de CO_{2eq} de 4 toneladas al año, de manera que la implementación alcanza logros importantes desde el punto de vista de costos, energético y ambiental.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Sobre la evaluación de distintas técnicas que permiten reducir los consumos de energía en sistemas de bombeo se encontró que la técnica que más se ajusta al alcance técnico y de recursos que podía abordar este trabajo es la sustitución de los motores en la estación de bombeo.

Para efectos de cálculos financieros, se consideró solo uno de los motores, entendiendo que el motor restante de la estación tiene condiciones similares, por lo que el caso propuesto sirve de aproximación y punto de partida para determinar la viabilidad de cambiar igualmente el motor restante por uno de alta eficiencia.

Según las pruebas de las variables hidráulicas el punto de operación de la bomba se encuentra a la izquierda del BEP -42%, dando como resultado una operación de bajo rendimiento, posiblemente presentado por una alta colmatación de los sistemas de tubería. Modificando esta condición se obtendría el mayor potencial de ahorro posible. Sin embargo, este trabajo se limita a los puntos donde es posible evaluar el potencial de ahorro con los recursos y tiempo de disponible para el desarrollo de este estudio.

Los cálculos financieros muestran un valor positivo del VAN, una tasa interna de retorno TIR del 29.6 % valor por encima de la inflación y depreciación, un pago simple de la inversión en 3 años y una relación costo beneficio que sugiere un repago del motor de alta eficiencia en más de 3 veces su valor, todos estos indicadores muestran la viabilidad indiscutible de esta técnica, incluso si no hubiese un escalamiento en el precio de la electricidad en los próximos 10 años.

La revisión literaria realizada desde el punto de vista de varios autores condujo a una decisión acertada y de fácil implementación como estrategia para reducir el consumo de energía de la estación de bombeo, los análisis financieros fueron constituidos con mediciones e información

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

validada en campo, con lo cual se tiene una incertidumbre aceptable de la estimación económica realizada. Con base a los cálculos realizados sobre la relación costo beneficio se puede demostrar que el ahorro obtenido con la sustitución de los motores lograría apalancar nuevas inversiones sobre la estación de bombeo financiadas por los incentivos económicos logrados con el ahorro en consumos de energía, dando solución a una de las problemáticas abordadas en este trabajo ya que esto encaja de manera precisa sobre el concepto de sostenibilidad del negocio.

También se satisface el aporte ambiental que busca este trabajo, entendiendo el cambio climático como una problemática en acelerado ascenso, donde más que la sostenibilidad de un negocio está la de la preservación de la vida misma y nuestro entorno que es verdaderamente la materia prima más valiosa que se debe cuidar. Es menester entonces de la ingeniería buscar métodos que garanticen el equilibrio entre la producción y atención de la demanda de una forma responsable con el medio ambiente.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO

FUTURO

- En el estudio realizado en la estación de bombeo San Cristóbal – Pedregal Alto se evidencia la oportunidad de ahorro energético, después de validar las diferentes estrategias para generar ahorro, la más representativa para la aplicación es la sustitución de los motores de eficiencia estándar por alta eficiencia, se encontró un potencial de reducción importante en el consumo de energía de 20.195 kWh/Año, lo que representa un ahorro en costos de operación de 13.207.446 \$COP por motor.
- Según la caracterización realizada en la estación de bombeo caso de estudio, se concluye que las bombas deben ser intervenidas rápidamente ya que según los resultados de las pruebas se evidencia una caída en la curva de las bombas, condición generada por desgastes en componentes como el impulsor y los anillos. Se sugiere realizar un mantenimiento correctivo con el fin de mejorar la condición de la bomba y de esta manera incrementar la eficiencia de la misma teniendo en cuenta los 26 años de vida operativa que tiene el bombeo en la actualidad.
- Para la implementación de variadores de velocidad es preferible usarlo en sistemas de bombeo con cabeza variable o que este bombeado directamente a una red de distribución con un control automático, ya que este tipo de sistema requiere estar variando el caudal que inyecta a la descarga y el variador puede ayudar a generar ahorros al hacer este trabajo de manera controlada solo entregando el suministro preciso de caudal y presión. Otra alternativa es que en los países donde se manejan cobros en la energía según la demanda

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

del sistema, se puede usar para mantener el tanque de destino embalsado en las horas de venta de energía barata o horas valle y usar lo menos posible el bombeo en las horas pico, esta última no fue evaluada debido a la tarifa de cobro de manera fija de kWh independiente del horario de uso de la instalación que se maneja en la actualidad.

- En la evaluación costo económica y financiera se evidencia que el motor se encuentra sobredimensionado, por lo que se consideró la idea de bajar la potencia a 45 kW en el motor de alta eficiencia con el fin de disminuir los costos en la inversión inicial, teniendo en cuenta que las potencias comerciales de motores quedan muy ajustados a las condiciones de trabajo del sistema, generando una carga del 100 %, no es posible tomar esta opción por que implicaría limitar el crecimiento de capacidad de bombeo a largo plazo.
- Desde el diseño de una estación de bombeo se debe tener claro el objetivo y el concepto de eficiencia energética, debido a que este es el punto de partida para garantizar el consumo óptimo del recurso energético en el costo de operación de este.
- Una consideración que se debe estudiar más a fondo para futuros trabajos en el sistema de bombeo es la edad que tiene la conducción o tubería de impulsión, en las pruebas realizadas se demuestra un indicio de colmatación de las tuberías. Como consecuencia de esto, el sistema se ha ido cerrando hacia la izquierda del BEP lo que restringe el flujo que puede entregar la bomba. Por esta razón, se debe evaluar la pertinencia de cambiar el sistema de tuberías por alto grado de colmatación.
- Al realizar el cálculo de emisiones evitadas se encuentra una cifra importante de 4,1 ton de CO_{2eq} por año, lo que representa un valor de 82 ton de CO_{2eq} en los 10 años de vida para el proyecto. Esto equivale a de 3.524 litros de gasolina dejados de consumir.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Actualmente el sistema de bombeo no opera en los rangos aceptables de rendimiento, esto aplica para las bombas que en sus diseños originales muestran valores de caudal de 12 l/s. Actualmente las bombas solo entregan cerca de 8 l/s debido al envejecimiento natural de los sistemas de tuberías.
- Los sistemas fotovoltaicos no son recomendables para sistemas de bombeo que deben satisfacer una curva de demanda establecida, debido a que la dependencia de la radiación solar limita fuertemente la atención de dicha demanda. Se puede pensar para trabajos futuros incluir la generación fotovoltaica solo para generar una porción de la potencia requerida por el sistema, pero sin que las bombas sean totalmente dependientes de dicha generación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

REFERENCIAS

- Abella, Miguel & Chenlo, F. (2005). Sistemas de Bombeo Fotovoltaico. *Sistema de Bombeo Fotovoltaico*, 60. Retrieved from file:///C:/Users/Djota/Downloads/componente45332.pdf
- Aguiar, V. (2022). Techno Economic Assessment of IE3 Electric Motors in the Medium Size Brazilian Industry. *IEEE Latin America Transactions*, 20(3), 503–511. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9667150>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2011). Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Manual de eficiencia energética, 108.
- Blanco, E., Veladre, S., & Fernandez, J. (2018). Manual de optimización de sistemas de bombeo. *Eficiencia Energética Industrial*, 183. Retrieved from https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Manual_sistemas_bombeo.pdf
- De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., & Duarte, A. Q. (2014). Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1274–1285. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2272548>
- de León García Gabriel, Gómez Sarduy Julio R., & Viego Felipe Percy R. (2019). Ahorro De Energía Por Sustitución De Motores Subcargados Que Accionan Cargas De Alta Inercia. *Revisa Centro Azucar*, 46(0), 40–50.
- Didn, W., & Check, L. (2013). Estudio técnico , económico y financiero En esta entrega del blog estudiarás los viabilidad del proyecto desde el punto de vista.
- Donolo, P. D., Chiacchiera, E., Pezzani, C. M., Lifschitz, A. S., & De Angelo, C. (2020). Economic Barriers to the Application of Energy Efficient Motors in Industry. *IEEE Latin America*

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

Transactions, 18(10), 1817–1825. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387673>

Gómez, J. R., Sousa, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A., Viego, P. R., Quispe, E. C., & de León, G. (2022). Assessment criteria of the feasibility of replacement standard efficiency electric motors with high-efficiency motors. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121877>

Hydraulic Institute. (2011). American National Standard For Rotordynamic Pumps - For Hydraulic Performance Tests.

ISO_25178-2:2012. (2003). *International Standard International Standard. 61010-1* © Iec:2001 (Vol. 2003).

Lam, K. L., Kenway, S. J., & Lant, P. A. (2017). Energy use for water provision in cities. *Journal of Cleaner Production*, 143, 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.056>

Lima. (2005). Guías para el Diseño de Estaciones de Bombeo de Agua Potable. *Organización Panamericana de La Salud*, 39.

MinisterioDeMinasYEnergía. (2015). Ministerio De Minas Y Energía Anexo General Reglamento Técnico De Etiquetado ., (4), 1–100.

Motors and Generator Section. (2009). NEMA Standards Publication MG 1-2009, 552, 775. Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/005/nema.mg-1.2009.pdf>

Mott, R. L., Untener, J. A. (2015). *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación.

Republica, B. de la. (2022). *Reporte tendencia de inflacion en colombia*. Retrieved from <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc>

Ríos, A. (2014). Evaluación de Proyectos Energía Renovable y Eficiencia Energética: Finanzas de Cambio Climático. Retrieved from <https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2018/11/9-Project-Financing-aRenergy.pdf>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

- Singh, G., Anil Kumar, T. C., & Naikan, V. N. A. (2019). Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. *Reliability Engineering and System Safety*, 184(February 2018), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.015>
- Torregrossa, D., & Capitanescu, F. (2019). Optimization models to save energy and enlarge the operational life of water pumping systems. *Journal of Cleaner Production*, 213, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.124>
- Trianni, A., Cagno, E., & Accordini, D. (2019a). Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. *Applied Energy*, 252(January). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113481>
- Trianni, A., Cagno, E., & Accordini, D. (2019b). Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. *Applied Energy*, 252(July). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113481>
- UPME. (2021). Resolución 000382 del 2 de noviembre de 2021. *Unidad de Planeación Minero Energética*, (000382), 2–5. Retrieved from https://www1.upme.gov.co/Normatividad/382_2021.pdf
- WEG. (2021). LISTA DE PRECIOS 2021. Retrieved from <https://www.electricoscarlostriana.com/gallery/LISTA DE PRECIOS WEG JUNIO 2021.pdf>
- Zuberi, M. J. S., Tjindink, A., & Patel, M. K. (2017). Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in Swiss industry. *Applied Energy*, 205(July), 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.121>

ANEXOS

Anexo 1

Lista de precios WEG

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS IEC

MOTORES TRIFÁSICOS W22

CARACA EN HIERRO - SEVERE DUTY

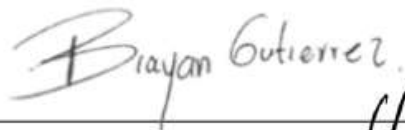
IEC IE3 EFICIENCIA PREMIUM

Referencia	Potencia		RPM	Caraca	Eficiencia (%)	Factor de Potencia	Corriente Nominal (A)			Factor de Servicio	Masa Aprox. (Kg)	Código	Precio COP \$
	HP	KW					230V	380V	460V				
SD012363CQA			3600	132M	91,2	0,89	29,8	17,3	14,9	1,25	79,3	15325133	\$ 5.156.000
SD012183CQA			1800	132ML	92,4	0,84	31,2	18,1	15,6	1,25	83,2	15325263	\$ 5.759.000
SD012123CQA	12,5	9,2	1200	160M	91,7	0,78	33,8	19,6	16,9	1,25	122	15325445	\$ 10.018.000
SD012093CQA			900	180M	90	0,78	34,4	19,9	17,2	1,25	169	Consultar	\$ 14.143.000
SD015363CQA			3600	132M	91,5	0,88	35,8	20,7	17,9	1,25	78	15325135	\$ 6.369.000
SD015183CQA			1800	132ML	92,4	0,82	38,1	22,1	19	1,25	100	Consultar	Consultar
SD015183CQA	15	11	1800	160M	92,7	0,81	38,4	22,2	19,2	1,15	112	15325264	\$ 6.196.000
SD015123CQA			1200	160M	91,7	0,8	39,4	22,8	19,7	1,25	140	15325446	\$ 10.522.000
SD015093CQA			900	180L	90	0,78	41,2	23,9	20,6	1,25	185	Consultar	\$ 15.849.000
SD020363CQA			3600	160M	92,2	0,87	49	28,4	24,5	1,25	121	15325179	\$ 8.160.000
SD020183CQA			1800	160M	93,4	0,82	51,4	29,8	25,7	1,25	139	14504319	\$ 8.628.000
SD020123CQA			1200	180M	92,2	0,85	50,2	29,1	25,1	1,25	166	13255795	\$ 13.515.000
SD020093CQA			900	180L	91,5	0,79	54,4	31,5	27,2	1,25	196	Consultar	\$ 18.859.000
SD025363CQA			3600	160M	92,8	0,87	60,2	34,9	30,1	1,25	128	15325182	\$ 9.523.000
SD025183CQA			1800	160L	93,6	0,81	64	37,1	32	1,15	159	15325350	\$ 11.099.000
SD025123CQA	25	18,5	1200	180L	93,1	0,84	62	35,9	31	1,25	199	15325478	\$ 16.600.000
SD025093CQA			900	200L	91,5	0,75	70,8	41	35,4	1,25	231	Consultar	\$ 20.559.000
SD030363CQA			3600	160L	92,8	0,87	71,6	41,5	35,8	1,25	136	15325183	\$ 12.341.000
SD030183CQA			1800	180M	94	0,81	75,8	43,9	37,9	1,15	178	15325351	\$ 13.880.000
SD030123CQA			1200	200L	93,6	0,81	76,2	44,1	38,1	1,25	232	15325479	\$ 20.415.000
SD030093CQA			900	2250/M	91,7	0,81	77,8	45	38,9	1,25	367	Consultar	\$ 36.453.000
SD040363CQA			3600	200M	93,4	0,86	98	56,7	49	1,25	223	15325186	\$ 17.771.000
SD040183CQA			1800	200M	94,4	0,84	99,2	57,4	49,6	1,15	243	15325352	\$ 19.028.000
SD040123CQA			1200	200L	94,1	0,79	106	61,4	53	1,25	251	15325480	\$ 26.263.000
SD040093CQA			900	2250/M	92,9	0,8	106	61,4	53	1,25	400	Consultar	\$ 42.794.000
SD050363CQA			3600	200L	94	0,87	119	68,9	59,5	1,25	261	15325218	\$ 20.798.000
SD050183CQA			1800	200L	94,6	0,84	122	70,6	61	1,25	243	15325331	\$ 21.830.000
SD050123CQA			1200	2250/M	94,2	0,84	123	71,2	61,5	1,25	398	15325481	\$ 35.093.000
SD050093CQA			900	2500/M	93,5	0,81	128	74,1	64	1,25	463	Consultar	\$ 47.489.000
SD060363CQA			3600	2250/M	94	0,89	141	81,6	70,5	1,25	408	15325221	\$ 28.751.000
SD060183CQA			1800	2250/M	95,1	0,86	146	84,5	73	1,25	420	15325353	\$ 30.135.000
SD060123CQA			1200	2500/M	94,5	0,84	149	86,3	74,5	1,25	463	15325482	\$ 38.512.000
SD060093CQA			900	2500/M	93,6	0,82	154	89	76,9	1,25	485	Consultar	\$ 53.263.000
SD075363CQA			3600	2250/M	94,2	0,89	172	99,6	86	1,15	405	15325223	\$ 34.276.000
SD075183CQA			1800	2250/M	95,4	0,85	178	103,1	89	1,15	447	15325354	\$ 34.208.000
SD075123CQA			1200	2500/M	94,7	0,85	179	103,6	89,5	1,25	517	15325484	\$ 42.924.000
SD075093CQA			900	2800/M	94,3	0,8	191	110,5	95,7	1,25	682	Consultar	\$ 69.816.000
SD100363CQA			3600	2500/M	94,9	0,88	236	136,6	118	1,25	500	15325225	\$ 41.805.000
SD100183CQA			1800	2500/M	95,5	0,86	242	140,1	121	1,15	590	15325355	\$ 44.065.000
SD100123CQA			1200	2800/M	95	0,83	250	144,7	125	1,25	735	15325485	\$ 62.664.000
SD100093CQA			900	2800/M	94,4	0,79	264	152,8	132	1,25	815	Consultar	\$ 77.856.000

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	4-03-2022

FIRMA ESTUDIANTES





FIRMA ASESOR



FECHA ENTREGA: 09/JUN/2022