

**Análisis de un motor eléctrico tipo jaula de ardilla modificado en su estator para la  
disminución de potencia reactiva como variable principal de consumo energético**

**JULIÁN ESTEBAN OCAMPO VALDERRAMA  
JANER GARCÍA SIERRA**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Asesor  
Santiago Gómez Arango

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Medellín, Colombia  
2021

# RESUMEN

---

Este trabajo presenta un análisis del rendimiento eléctrico en un motor de inducción tipo jaula de ardilla, mediante el estudio de diversas variables energéticas (potencia reactiva, presión de succión y descarga, potencia activa consumida, caudal bombeado) registrando los datos con un analizador de redes FLUKE 435 y softwares avanzados en pruebas estáticas y dinámicas de motores como es el del equipo para analizar motores eléctricos MCEmax® de PdMA Corporation.

El motor de inducción seleccionado hace parte de un grupo de 5 motores que lleva aproximadamente 30 años en funcionamiento, por tanto, se declara en obsolescencia tecnológica y debido a su alto consumo energético fue seleccionado para su transformación con tecnología desarrollada por la empresa Maxeff Motors.

Finalmente, los resultados obtenidos evidencian que la conversión realizada en un motor de 700 HP que gira a 1800 RPM fue exitosa; a tal punto, que el ahorro energético superó lo proyectado, por tanto, los 4 motores restantes de la instalación de bombeo de agua se convertirán gradualmente.

*Palabras clave:*

*Eficiencia energética, potencia reactiva, motor de inducción, cogeneración, variador de velocidad, banco de condensadores.*

# RECONOCIMIENTOS

---

A Dios por darnos la fortaleza y la sabiduría necesaria para alcanzar nuestros objetivos.

A nuestros padres por ser nuestros pilares de vida, soporte y motivación para salir adelante.

A mi padre porque sin él nada de esto sería posible, de ti aprendí que nunca es tarde para alcanzar tus sueños. Aunque Dios y la vida no permitieron que estuvieras físicamente en este momento, espero que desde el cielo te sientas orgulloso, ahora y siempre. Rigoberto ocampo

A nuestras esposas, por su amor y apoyo incondicional, porque a pesar de todo siempre han estado ahí para alentarnos en los aciertos y levantarnos en las caídas.

A nuestro asesor de trabajo de grado, Santiago Gómez Arango, por su valiosa guía y consejos para la elaboración de este trabajo.

---

# ACRÓNIMOS

---

KVAR: Kilo Voltio Amperios Reactivos - Potencia reactiva

A: Amperios

AS: Lado del acople.

BS: Lado libre o del ventilador.

KW/H: Kilovatio por hora

L/S: Litros por segundo

MCA: Metro columna de agua

PSI: Libras por pulgada cuadrada

IM: Motores de inducción

PTAP: Plantas de tratamiento de agua potable

MSNM: Altura estratégica sobre el nivel del mar

ATRU: Agua tratada

# TABLA DE CONTENIDO

---

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Planteamiento del problema. ....	7
1.2. Objetivos. ....	9
• General.....	9
• Específicos. ....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	10
3. METODOLOGÍA.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
4.1. Condiciones operativas y variables energéticas. ....	15
4.2. Análisis del comportamiento y condiciones de operación .....	18
4.3. Resultados y recomendaciones.....	24
• Resultados.....	24
• Recomendaciones .....	24
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	26
5.1. Conclusiones.....	26
5.2. Trabajos Futuros.....	26
REFERENCIAS .....	27
ANEXOS.....	29

## LISTADO DE FIGURAS

---

Figura 1. Devanados del generador .....	16
Figura 2. Corriente en el condensador .....	17
Figura 3. Conexión diseñada y conexión real .....	18
Figura 4. Motor antes de transformación .....	21
Figura 5. Motor convertido maxeff. ....	22
Figura 6. Diagrama unifilar. ....	22
Figura 7. Sistema de Bombeo                      Figura 8. Motor Repotenciado.....	23
Figura 9. Tablero de control y PLC.....	23

## LISTADO DE TABLAS

---

Tabla 1. Comparativo del motor sin repotenciar y el motor Maxeff. ....	15
Tabla 2 Corrientes en el devanado.....	16
Tabla 3. Parámetros Operativos.....	17
Tabla 4. Retorno de la inversión .....	20

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Planteamiento del problema.

El agua que se consume en la ciudad de Medellín es captada principalmente de las represas “La Fe” ubicada en el municipio de El Retiro en el oriente antioqueño, “Río Grande II” localizada en el municipio de Don Matías y de diferentes afluentes de la ciudad. Ésta es conducida mediante tuberías de gran tamaño hacia las principales plantas de tratamiento de agua potable (PTAP): Ayurá, Villa hermosa y Manantiales, las cuales se ubican en el sur, centro y norte de la ciudad respectivamente, ésta también es conducida desde otras siete plantas que captan el agua de quebradas donde posteriormente es tratada para seguir con la etapa que se denomina “distribución primaria” por toda el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Luego de realizar el proceso de tratamiento, el agua es transportada desde las diferentes PTAP hasta tanques de almacenamiento que se encuentran en diversos puntos de la ciudad, los cuales están construidos de concreto o fibra de vidrio y que poseen una altura estratégica sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) para facilitar la posterior distribución de la misma. Cada tanque está acompañado de una infraestructura física, así como de tres o cuatro motobombas de gran capacidad cuya función es elevar el caudal y transportar el fluido a alta presión hacia otro tanque más alto que en adelante se denominará “cota”. También desde los tanques se distribuye hacia los barrios aledaños aprovechando la energía potencial que se genera mediante el arreglo de tuberías que llegan hasta los diferentes hogares, a su vez, mediante estas bombas centrífugas instaladas en cada estación de bombeo se lleva de una cota más baja hacia cotas más altas y así sucesivamente por toda la ciudad; este proceso se basa en el estudio del crecimiento demográfico de la población de la cual depende la construcción de nuevas instalaciones.

Teniendo en cuenta el funcionamiento que cumplen las estaciones de bombeo de agua tratada, su distribución primaria y la importancia dentro del abastecimiento de este recurso hídrico durante las 24 horas y 7 días de la semana, además considerando que gran parte de la energía en estos sistemas la consumen los motores de inducción, se propone el ahorro de energía por medio del incremento de la eficiencia de estos motores. Por otro lado, el costo de funcionamiento de los motores en general excede su precio de compra y hace que la alta eficiencia sea cada vez más importante. (Mayor Duque, 2015). Este

proyecto tiene como finalidad analizar la eficiencia energética de los motores de inducción tipo jaula de ardilla resultante de la disminución de la potencia reactiva de los mismos, se partirá del análisis de dos casos de estudio que fueron aplicados y llevados a cabo en una instalaciones de bombeo de agua tratada, de esta manera, si los resultados obtenidos avalan la hipótesis establecida, la disminución de la potencia reactiva en los motores de inducción reduce la demanda de energía del proceso, se planteara como insumo para implementación futura en las motobombas ATRU (agua tratada) del sistema de refrigeración de aceite de los generadores de una Central Hidroeléctrica, las cuales operan alrededor de 8000 horas anuales representando así una oportunidad de ahorro de energía considerable.

En principio la implementación de este estudio se proyecta realizar en al menos uno (1) de los motores de las bombas centrifugas mencionadas, sin embargo, si los resultados son óptimos se espera en un futuro replicar esto en los demás equipos que sean aptos según el estudio técnico. Por último, es importante resaltar que para sustentar el proyecto se utilizará la información de los equipos y software técnico con los que se realizaron las pruebas para los dos casos de estudio referenciados.

## 1.2. **Objetivos.**

- **General.**

Analizar la viabilidad para la transformación de un motor eléctrico tipo jaula de ardilla, mediante el estudio de la disminución de potencia reactiva como variable principal de consumo energético.

- **Específicos.**

- Identificar las condiciones operativas de un motor de alta eficiencia clase IE3, IE4 y las variables energéticas implicadas en ellos.
- Analizar el comportamiento del bombeo con el motor de alta eficiencia transformado, bajo las condiciones de operación requeridas.
- Entregar resultados y recomendaciones sobre la pertinencia de este cambio en otros motores del tipo jaula de ardilla.

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Los motores de inducción (IM) alimentados directamente desde la red son utilizados en los accionamientos de arranque de maquinaria de fluidos, en particular, estas máquinas utilizadas, incluidas las bombas centrífugas, los compresores y los ventiladores, no requieren una gama de ajuste complejo, porque ellos no necesitan un par de arranque alto o una velocidad alta. Además, varios fabricantes ofrecen motores síncronos de imanes permanentes de arranque en línea (LSPMSM) de una clase de alta eficiencia energética: alimentados directamente desde la red. El ajuste del flujo de fluido en este caso se realiza mediante válvulas de control del acelerador. (Arun Shankar et al., 2016)

Según el estudio publicado en (de Almeida et al., 2008), a pesar de la alta eficiencia y alto rendimiento dinámico y estático de los variadores de velocidad (VSD), no son muy utilizados debido al alto costo, Y los motores eléctricos alimentados directamente desde la red son ampliamente utilizados en muchas aplicaciones. Por ejemplo, el incremento de un proyecto utilizando variadores de velocidad se estima en una cuota de mercado alrededor del 30% en Alemania, según datos de la Comisión Europea (de Almeida et al., 2008) y alrededor del 20% en Suiza según el estudio reportado en Phillips y Tieben (Bertoldi et al., 2018).

En (ETSU, 2001), los motores eléctricos consumen el 46% de la electricidad mundial y representan alrededor del 70% del consumo total de la electricidad industrial, los sistemas de energía de las plantas de bombeo consumen aproximadamente el 22% de toda la energía eléctrica generada a nivel mundial; por tanto, es una tarea urgente estudiar las posibilidades de incrementar la eficiencia energética de las unidades de bombeo. Se pueden proporcionar mejoras en la eficiencia energética de una unidad de bombeo implementando cambios en la red hidráulica en la que opera la unidad mediante el uso de sistemas de control, incluido un variador de velocidad, optimizando y distribuyendo la carga (cuando las unidades están operando en paralelo), así como mediante la selección adecuada de las piezas de la unidad, en particular mediante el uso de motores eléctricos de una clase de eficiencia energética superior (Arun Shankar et al., 2016).

La eficiencia energética de los circuladores que funcionan principalmente con un caudal variable se evalúa de acuerdo con el reglamento de la UE (*EUR-Lex - 32014R0004 - EN - EUR-Lex*, n.d.). El perfil indicado y adoptado como un perfil de carga de bomba típico de acuerdo con este documento (*IEC 60034-30-1:2014 | IEC Webstore | Pump, Motor, Water Management, Smart City, Energy Efficiency*, n.d.). Almeida (De Almeida et al., 2017) sugiere que el índice de eficiencia energética (IEE), que ya está bien establecido para la evaluación de la eficiencia energética de los circuladores, puede utilizarse para otros tipos de bombas y maquinaria de fluidos.

Así, el IEE es el indicador más adecuado para evaluar la eficiencia energética de los sistemas de flujo variable para diversos fines, en contraste con el índice de eficiencia mínima (MEI), que se basa en eficiencias en un rango relativamente limitado de puntos operativos (75-110% del caudal) (Stoffel, 2015) y se define en el reglamento (Gevorkov, n.d.).

La eficiencia de la bomba puede degradarse entre un 10% y un 25% durante su vida útil. Sin embargo, los expertos de la industria señalan que este rendimiento degradante no se debe necesariamente a la antigüedad de la bomba, sino que también puede deberse a cambios en el proceso que pueden haber causado una falta de coincidencia entre la capacidad de la bomba y su funcionamiento (Shuvalova, 2004).

Sin embargo, a veces puede ser más eficiente comprar una bomba, porque los modelos más nuevos son más eficientes. Hay varias bombas disponibles para requisitos específicos de capacidad de caudal y altura de presión (Glover & Lukaszczyk, 2005) La elección de la bomba adecuada a menudo ahorra tanto en costos operativos como en costos de capital (de comprar otra bomba). Para una tarea determinada, una bomba que funcione a la velocidad más alta adecuada para la aplicación será generalmente la opción más eficiente con el costo inicial más bajo. (Safin et al., 2018)

Las excepciones incluyen bombas de manejo de lodos, bombas de alta velocidad específica o en aplicaciones donde la bomba necesita una altura de succión positiva neta mínima muy baja en la entrada de la bomba (Kazakbaev et al., 2019). Reemplazar una bomba por una nueva eficiente reduce el uso de energía entre un 2% y un 10%. Se ha demostrado que los motores de mayor eficiencia aumentan la eficiencia del sistema de bombeo entre un 2% y un 5%. (Mutize & Wang, 2013)

Los sistemas de bombeo existentes pueden brindar una excelente oportunidad para mejorar la eficiencia, porque los diseños del sistema de bombeo a veces son difíciles de optimizar antes de la instalación. Además, los esfuerzos de diseño a veces se centran en

minimizar los costos de capital o las posibilidades de falla del sistema. Como resultado, es posible que los costos de energía y mantenimiento no se consideren en su totalidad. Según algunas fuentes, los costos de energía y mantenimiento representarán más del 50% al 95% de los costos de propiedad de la bomba 1, 2 con costos iniciales inferiores al 15% de los costos del ciclo de vida de la bomba 1. (Mutize & Wang, 2013)

Además, los sistemas de bombeo industriales que han estado en funcionamiento durante mucho tiempo pueden haber experimentado cambios en los requisitos de bombeo establecidos inicialmente como (caudal, presión) durante su vida útil, a medida que los sistemas se alejan de sus condiciones de diseño. Las mejoras en la eficiencia del sistema de bombeo de este tipo pueden tener períodos de recuperación simples de varias semanas a algunos años. (Li et al., 2010) Al seleccionar una nueva bomba, se debe prestar la debida atención al costo del ciclo de vida de la bomba (LCC), incluido el mantenimiento, la energía y los costos iniciales. Una bomba de calidad, confiable y bien construida que sea eficiente probablemente tendrá un LCC más bajo que una bomba más barata y liviana, incluso si la bomba más liviana es un poco más eficiente. Las mejoras en la eficiencia de los sistemas de bombeo también pueden:

- Reducir los costos de energía
- Reducir los requisitos de mantenimiento
- Ajustar más la capacidad del sistema de bombeo a los requisitos de producción.

Para muchas organizaciones, el impacto ambiental de sus operaciones es cada vez más importante. Mejorar la eficiencia de los sistemas de bombeo es una forma de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y preservar los recursos naturales.

En la revisión bibliográfica revisada también se encontró poca información sobre la evaluación de la eficiencia en motores bajo cargas cíclicas, el artículo de Durham (Kahrisangi et al., 2012) aborda la evaluación de la eficiencia en motores que accionan bombas de pozo, (balancines), este autor utilizó las curvas dinámicas de las unidades de bombeo de superficie y las curvas de eficiencia de los motores, ofrecidas por los fabricantes. Esta propuesta requiere una gran cantidad de gestión de la información que muchas veces no es fácil de obtener.

En el artículo, escrito por Elías de la Rosa y José Montejo ("Eficiencia de Los Motores de Inducción Con Carga Cíclica," 2007), estos autores presentan una propuesta para la evaluación de la eficiencia de variadores cíclicos con motores asíncronos, basada en el método de segregación de pérdidas de la norma IEEE (Kahrisangi et al., 2012), al ser uno de

los más exactos, todas las magnitudes se trabajan en términos de energía porque las pérdidas y potencias varían en función del tiempo porque la carga no es constante. La herramienta computacional desarrollada para la evaluación de la eficiencia de los motores que dan movimiento a las unidades mecánicas de bombeo (balancines) objeto de este trabajo, contiene codificada en sus algoritmos la metodología propuesta por los señores Elías de la Rosa y José Montejo antes mencionados basado en el método de segregación de pérdidas, que consiste en determinar las pérdidas de energía internas que se producen en el motor durante el ciclo de trabajo y luego restarlas a la energía extraída de la red por el motor.

De lo revisado anteriormente se encontró que, para aplicaciones como bombeo de aguas residuales y suministro de agua potable con motores de gran capacidad, se recomienda realizar un estudio costo-beneficio que en su mayoría demuestra un gran beneficio al repotenciar éstos; debido a su gran ahorro en la compra de un motor nuevo y en el consumo energético, llegando a alcanzar rápidamente el retorno a la inversión considerando que no es necesario la intervención de infraestructura.

### 3. METODOLOGÍA

---

Este trabajo se desarrolla como investigación aplicada, cuyo objetivo es encontrar las estrategias empleadas para el desarrollo de un problema específico; en este caso, en la eficiencia energética de los motores tipo jaula de ardilla utilizados en el bombeo de agua tratada para consumo humano.

Para llevar a cabo este trabajo y su contextualización, se propuso la articulación y ejecución de una serie de etapas; dentro de las cuales se buscó el alcance del objetivo general, tomando cada uno de los objetivos específicos planteados en este documento como las fases para el logro de este trabajo.

En la primera fase planteada, se buscó la investigación y referenciación de los documentos y fuentes disponibles en las bases de datos de la institución universitaria ITM de la ciudad de Medellín - Colombia. Por cada una de estas fuentes (nacionales e internacionales), se tomaron elementos que ayudaron a alcanzar los objetivos propuestos.

Posteriormente se hizo una recopilación y medición de los datos tomados en campo que entrega el equipo de medición de variables a través del analizador de redes FLUKE 435 y el equipo para análisis de motores MCEmax® de PdMA corporation; apoyado esto en una base de datos que posee el MCEmax®, de los cuales se extrajo posteriormente los análisis del funcionamiento de la motobomba indicada.

Al final del presente estudio, se presentó un informe con la medición y estado actual del desempeño y eficiencia del equipo; utilizando herramientas prácticas y teóricas para su ejecución, con el fin de identificar aquellas causas para las cuales se afecta la normal operación de la motobomba. Este estudio, contempló un análisis de factibilidad, de aquellas mejoras que se sugirieron en el informe final.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1. Condiciones operativas y variables energéticas.

#### Condiciones operativas.

Tomando como referencia el análisis a la motobomba 3 del sistema de bombeo seleccionado y las condiciones operativas, se determina la eficiencia real en campo al momento de la toma de datos, resultados que, definen el punto óptimo operativo de ésta.

Los datos tomados del motor y de la bomba; se obtuvieron principalmente en el caudal bombeado y la potencia consumida por el motor, los cuales se establecieron con la válvula de impulsión de la bomba en una apertura del 100%; información que se basó en las siguientes variables (Tabla 1):

**Tabla 1. Comparativo del motor sin repotenciar y el motor Maxeff.**

Datos comparativos Motores Instalados						
Equipo	Potencia kW	Corriente A	% Carga	Caudal L/S	Factor de potencia	Potencia Reactiva kWAR
Motor Grupo 3 Maxeff Motors	545	99	100	1465	0,94	183
Motor Grupo 3 (Anterior)	552	114	87	1365	0,86	365

#### Variables energéticas.

Adicional a esto, se enfatizó en las pruebas realizadas al motor para evaluar su comportamiento después de la transformación de su estator, pasando de ser un motor de inducción tipo jaula de ardilla a un motor generador síncrono. Las variables registradas con el equipo analizador MCEmax® de PdMA Corporation se encuentran a continuación:

- a. Medición de corriente en los devanados del Generador (Ver Figura 1).
- b. Medición de corriente en los condensadores (Ver Tabla 2).
- c. Medición de parámetros operativos (Ver Tabla 3):
  - Corriente del motor.
  - Voltaje.
  - Potencia activa.
  - Potencia reactiva.
  - Factor de potencia.
  - Temperatura.
  - Velocidad del motor.

**a. Medición de corriente en los devanados del Generador:**



**Figura 1. Devanados del generador**

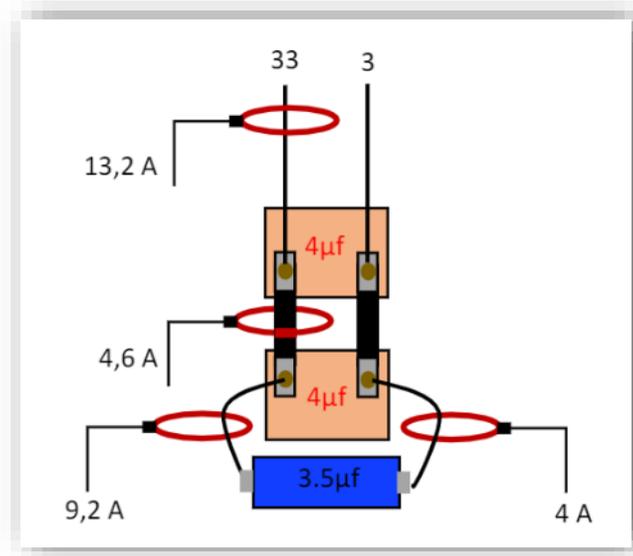
**Tabla 2 Corrientes en el devanado**

Antes del ajuste (tres condensadores 3,5 $\mu$ f)	
Corriente Fase 11	4 A
Corriente Fase 22	4 A
Corriente fase 33	4 A

Antes del ajuste (+ 6 condensadores 4 $\mu$ f)	
Corriente Fase 11	13,2 A
Corriente Fase 22	13,2 A
Corriente fase 33	13,2 A

**b. Medición de corriente en los condensadores.**

La medición de corriente en algunos de los condensadores se realizó de manera directa en la bornera del motor con el equipo MCEmax® de PdMA corporation. Se midieron los condensadores entre las líneas 33 y 3 de la siguiente manera (Ver Figura 2):



**Figura 2. Corriente en el condensador**

Es importante aclarar que la corriente para los condensadores de 3,5 µf es igual a 4 amperios, la corriente para los condensadores de 4 µf es igual a 4,6 amperios y la corriente por conjunto de tres condensadores es de 13,2 amperios.

**c. Medición de parámetros operativos:**

**Tabla 3. Parámetros Operativos**

Voltaje	3200 V
Corriente	99 A
Potencia Activa	545 kW
Potencia Reactiva	183 kVAR
Factor de Potencia	0,94
Frecuencia	60 Hz

Temperatura R	70 ° C
Temperatura S	74 ° C
Temperatura T	80 ° C
Temperatura As	28 ° C
Temperatura Bs	35 ° C
Vibraciones As	0,8 mm
Vibraciones Bs	2,4 mm

Nivel embalse	2132 msnm
Caudal	1465 L/s
% carga	100%
Velocidad	890 RPM

Al momento de realizar las mediciones para verificar las condiciones operativas del motor transformado, se encontró que éste no alcanzó el factor de potencia de 0.88, el cual era el valor esperado; por tal motivo fue necesario implementar capacitores de  $4\ \mu\text{f}$  como parte de las modificaciones evidenciando efectos positivos.

Se adicionó al motor seis (6) condensadores de  $4\ \mu\text{f}$ , entregando como resultado un factor de potencia de 0.94 y mejorando las temperaturas de operación, también se realizan las mediciones de campo y con esta información se determinó un nuevo análisis para la siguiente ruta de inspección programada.

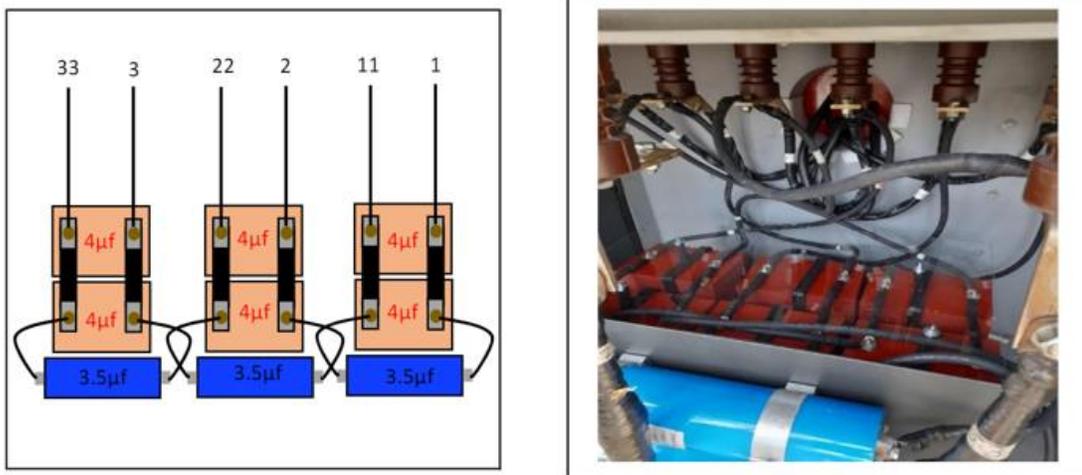


Figura 3. Conexión diseñada y conexión real

#### 4.2. Análisis del comportamiento y condiciones de operación

El motor seleccionado para repotenciación es un motor de 884 RPM, 3300 V, 800 HP, con un factor de potencia de 0.86 y el cual impulsa una bomba de 1400 L/S, tiene una conexión en estrella - delta, sin embargo, se conserva los componentes de este motor antiguo (carcaza y rotor) para ser rebobinado un 70 % como motor y un 30 % generador, logrando disminuir la potencia reactiva hasta en un 50% (ver Tabla 4). La generación de energía dependerá de la carga del eje, por ejemplo, a mayor carga mecánica menor cogeneración de energía. Con este cambio se logra disminuir el consumo de potencia reactiva entre un 50% - 90%; ésta variable es fundamental, asimismo, ocurre para la reducción de consumo energético que está directamente relacionado con el gasto de corriente y tensión del motor 3 que es el caso de estudio.

Por último, se presenta el estudio de viabilidad donde se demuestra el rápido retorno de la inversión, entre 6 – 12 meses según lo determinado por el fabricante maxeff motors y lo que se ha comprobado en campo con la disminución de potencia reactiva durante el año de evaluación al invertir \$200.000.000 COP en la transformación Vs retorno proyectado a un año de

aproximadamente \$100.000.000 COP teniendo en cuenta que el equipo opera un promedio de 6 meses al año.

Motor antiguo de 800 HP (Motor 1)

Eficiencia 100 % de carga = 94 %

Motor Maxeff de 700 HP (Motor 2)

Eficiencia 100 % de carga = 97 %

A partir de la diferencia entre los consumos de los dos motores se calcula el ahorro económico por medio de la siguiente fórmula:

$$Ahorro = (PC1 - PC2) * N(horas) * C \left( \frac{\$}{kWh} \right)$$

$$\text{Siendo } PC = \frac{P(kW)}{\text{eficiencia}}$$

PC1 = Potencia consumida del motor 1 (motor antiguo) en kW.

PC2 = Potencia consumida del motor 2 (motor nuevo "eficiente") en kW.

N(horas) = número de horas trabajadas en el año.

$$\left( \frac{\$}{kWh} \right) = \text{costo del kWh}$$

Potencia en kW = Potencia en HP x 0,746.

Ahorro (costo final de \$300 COP/kWh):

Para efectos de cálculo, se toma como referencia un precio del dólar para junio de 2020 de 3.760 COP. La fórmula para el cálculo del tiempo de recuperación de la inversión se puede expresar como:

$$Rs = \frac{I}{A} = \frac{C_2 - C_1}{0,746 * (hp_{nom} * fc) * \left[ \frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] * h * T}$$

Donde: Rs = recuperación simple de la inversión en meses

I = inversión en dólares USD. Para instalaciones nuevas o motores que cumplieron su vida útil, la inversión es la relación entre el costo de un motor de alta eficiencia (C2) y el costo de un motor estándar (C1)

A = ahorro mensual en dólares (USD)

hp nom= potencia nominal del motor en HP

fc = Factor de carga del motor.

h = número de horas de uso mensual

T = tarifa de energía eléctrica en USD/kWh

$\eta_1$  = rendimiento del motor estándar

$\eta_2$  = rendimiento del motor de alta eficiencia

**Tabla 4. Retorno de la inversión**

MOTOBOMBA 3		
	Costo de kw/h	\$ 300
	Horas de operación	12 horas
	Horas operativas mensual	360 horas
	Presupuesto inversión	\$ 200.000.000
Motor	Estándar	Transformado (Maxeff)
Potencia del Motor (kW)	552	545
Factor de Carga	1	1.1
Eficiencia (%)	0,94	0,97
Potencia mecánica demandada (kW)	518,88	
Potencia eléctrica demandada (kW)	552,00	534,93
Costo operativo mensual	\$ 59.616.000	\$ 57.772.206
Ahorro mensual	\$ 1.843.794	
Retorno de la inversión (meses-9)	108,5	
Retorno por reactivos	\$ 9,612,000	
Retorno REAL (en meses)	16,4	

Con el fin de analizar el desempeño de los motores de alta eficiencia comparado con los motores repotenciados se presenta en la Tabla 1, donde se muestran los datos cotejados entre el motor convencional que se encontraba instalado en el grupo de bombeo número 3 y el motor actual instalado con la tecnología Maxeff Motors.

De lo anterior, Se observó una disminución considerable en el consumo de potencia reactiva del 50% como variable fundamental analizada, así como el factor de potencia y porcentaje de carga; de 0.86 a 0.94 y de 0.87% a 100% respectivamente; lo cual demostró la eficiencia energética alcanzada con la conversión del motor tipo jaula de ardilla.

En términos de costos, se debe considerar lo siguiente: actualmente se tiene funcionando un motor de inducción jaula de ardilla de 800 HP, teniendo esto en cuenta se plantea un caso fortuito en el que dicho motor se quemó y debe cambiarse, para lo cual se tienen dos opciones; la primera es reemplazar el motor por uno idéntico al de hace 30 años que tendría un costo de \$ 75.000 USD y la segunda es transformar el motor a tecnología Maxeff que tendría un costo de \$22.500 USD. En este sentido se evidencia que la segunda opción en término de costos es más viable ya que al aprovechar la carcasa del motor inicial, su rotor, rodamientos, ventilador y tapas; exceptuando el embobinado, lo hace una alternativa más económica, puesto que la primera opción implica un incremento del 333,33% en el costo con respecto a la segunda opción.

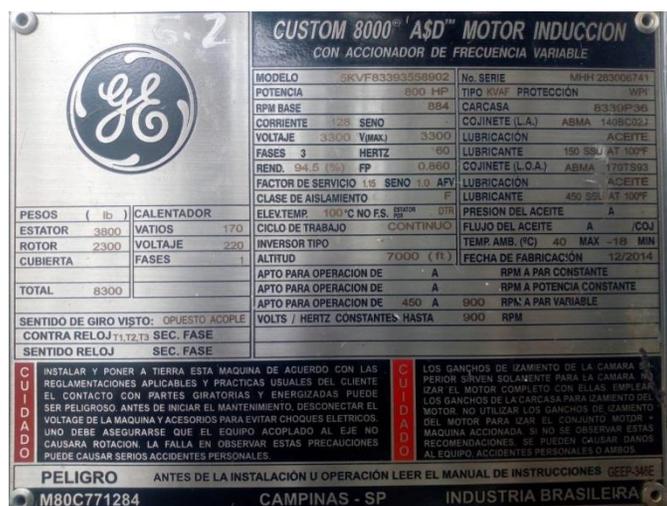


Figura 4. Motor antes de transformación



Figura 5. Motor convertido maxeff.

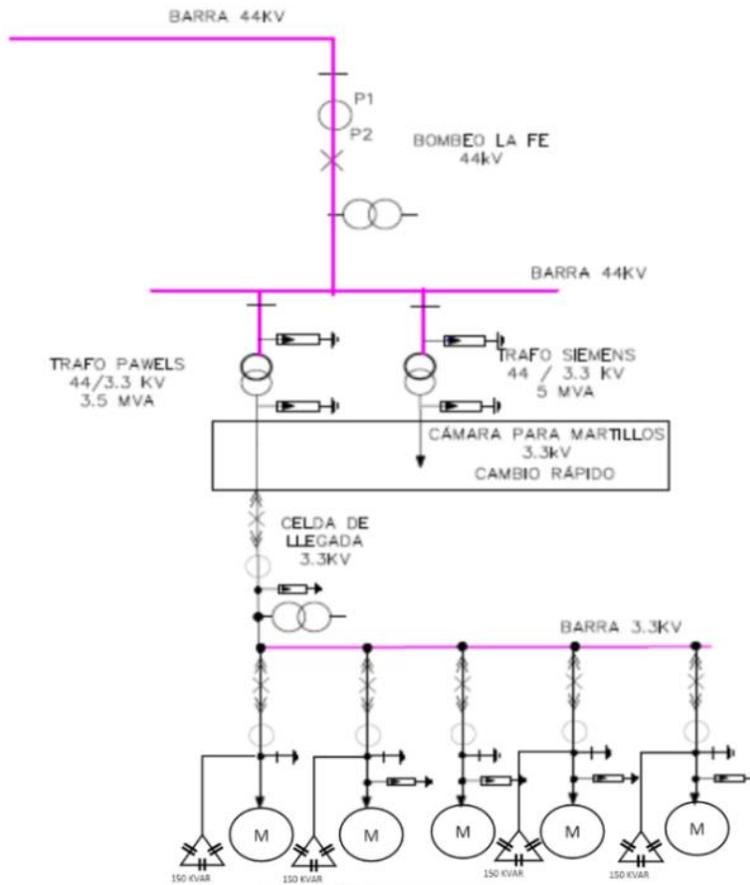


Figura 6. Diagrama unifilar.



**Figura 7. Sistema de Bombeo**



**Figura 8. Motor Repotenciado**



**Figura 9. Tablero de control y PLC.**

### 4.3. **Resultados y recomendaciones**

- **Resultados**

Gracias a la investigación realizada se encontró que la tecnología en motores de alta eficiencia ha evolucionado mucho en los últimos años. Entre las importantes particularidades de los motores de alta eficiencia se detallan:

- Un aumento de los materiales conductores.
- Reducción de las corrientes parásitas.
- Sistema de ventilación más eficiente.
- Una mayor área de laminación lo cual permite una menor dispersión del campo electromagnético.
- Rodamientos antifricción de bajo calentamiento, escaso nivel de ruido y bajas pérdidas por fricción.
- Entrehierro más estrecho, lo que permite reducir las pérdidas magnéticas y por fricción.

- **Recomendaciones**

El autor del presente trabajo propone establecer un estudio energético para sus diferentes sistemas y/o equipos, como una parte esencial en su gestión de mantenimiento.

Realizar un diagnóstico de sus motores nos ayuda a determinar que motores conviene reemplazar. Los fabricantes de motores recomiendan considerar aquellos motores que funcionan continuamente todo el año, que estén trabajando con factor de carga menor al 50% y aquellos que hayan sido rebobinados más de una vez.(Ministerio de Energía y Minería Presidencia de la Nación, 2017)

Muchos fabricantes recomiendan tener en cuenta la eficiencia la eficiencia energética y su tiempo en funcionamiento al momento de seleccionarlo.

- Si el motor se utilizará más de 2.000 horas por año, se recomienda trabajar con un motor IE3
- Si el motor se utilizará menos de 2.000 horas por año, lo recomendado es un motor IE3 o IE2, como mínimo.
- Verifique que no se haya sobredimensionado la potencia del motor. Tener en cuenta que la mayor eficiencia se alcanza trabajando a un factor de carga de entre el 70% y el 90%, o sea, entre un 70% y un 90% de la potencia nominal.(Ministerio de Energía y Minería Presidencia de la Nación, 2017)

Por otra parte, se deben tener en cuenta otros factores que afectan los rendimientos de los motores:

- Los sistemas de alimentación eléctrica deben ser adecuados para los motores, se debe tener especial cuidado en las tensiones suministradas y en el desbalanceo de tensión.
- Los sistemas mecánicos deben encontrarse en las mejores condiciones, ya que una correa de transmisión mal tensada, un anclaje mal hecho o vibraciones excesivas originarán una disminución de la eficiencia del motor al igual que una lubricación inadecuada afecta el rendimiento del motor y un mantenimiento insuficiente deteriora la eficiencia.(Ministerio de Energía y Minería Presidencia de la Nación, 2017)

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1. Conclusiones

- Establecer de manera eficaz un análisis energético para los motores, marca el camino para un trabajo enfocado a la gestión eficiente de los recursos energéticos y una pauta para futuras mejoras en la eficiencia energética en un proceso.
- Al realizar el estudio al motor, utilizando instrumentos avanzados de medición de variables físicas, se pudo lograr la identificación inicial del desempeño de sus componentes principales, así como un perfil de operación de acuerdo con condiciones críticas.
- Se logró determinar el índice de eficiencia energética del equipo (110%), con el fin de compararlo con el dato teórico ofrecido por el fabricante (97%).
- Este comparativo, permitió realizar relaciones directas y establecer una medida real de eficiencia operativa del equipo, que permitió de primera mano, identificar posibles etapas o componentes del sistema, en donde se priorizó acciones de mejora para mejorar las condiciones de operación, como fue el cambio de los condensadores.

### 5.2. Trabajos Futuros

Se realizará una serie de estudios energéticos en los diferentes sistemas de bombeos que suministran agua potable en la ciudad, donde el consumo de potencia reactiva este por encima del 50% de potencia activa o de acuerdo con la normativa vigente en su momento.

Programar a corto plazo, la implementación de buenas prácticas en la reducción de consumos energéticos y en la búsqueda de alternativas modernas eficientes, para la operación eficiente del proceso de bombeo de agua.

Durante la fase de pruebas del motor Maxeff, se define el cambio nuevamente de los condensadores a unos de mayor capacidad para sacar el máximo potencial de eficiencia de esta tecnología, mejoras que fueron proyectadas para mediados de 2021.

# REFERENCIAS

---

- Arun Shankar, V. K., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 181, 495–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>
- Bertoldi, P., European Commission. Joint Research Centre., & International conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 2017) (2017 : Luxembourg City, L. (2018). *Proceedings of the 10th international conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 2017)*. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC110714>
- de Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J., & Fonseca, P. (2008). EUP Lot 11 Motors. *In Practice*, February, 137. [http://www.eup-network.de/fileadmin/user\\_upload/Produktgruppen/Lots/Final\\_Documents/Lot11\\_Motors\\_FinalReport.pdf](http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Final_Documents/Lot11_Motors_FinalReport.pdf)
- De Almeida, A. T., Fong, J., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2017). *Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU ARTICLE INFO*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>
- Eficiencia de los motores de inducción con carga cíclica. (2007). *Ingeniería Energética*, XXVIII(1), 5–10.
- ETSU. (2001). *STUDY ON IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF PUMPS European Commission. February*.
- EUR-Lex - 32014R0004 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved March 21, 2021, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
- Gevorkov, L. (n.d.). *Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives*.
- Glover, A., & Lukaszczyk, M. (2005). Oversizing pump motors - The problems. *World Pumps*, 2005(466), 36–38. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(05\)70638-6](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(05)70638-6)
- IEC 60034-30-1:2014 | IEC Webstore | pump, motor, water management, smart city, energy efficiency. (n.d.). Retrieved March 21, 2021, from <https://webstore.iec.ch/publication/136>
- Kahrisangi, M. G., Isfahani, A. H., Vaez-Zadeh, S., & Sebdani, M. R. (2012). Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, 7(4), 459–466. <https://doi.org/10.1007/s11460-012-0217-8>
- Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V., Ibrahim, M. N., Oshurbekov, S., & Sarapulov, S. (2019). Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 12(6), 1–23. <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v12y2019i6p1144-d216769.html>
- Li, J., Song, J., & Cho, Y. (2010). High performance line start permanent magnet synchronous motor for pumping system. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1308–1313. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637082>
- Ministerio de Energía y Minería Presidencia de la Nación. (2017). *Guía de Eficiencia Energética para Motores Eléctricos*. 36. [http://www.minem.gob.ar/eeTwitter:ArgentinaEficiente@Eficiencia\\_ArImpresoenNoviembre2017](http://www.minem.gob.ar/eeTwitter:ArgentinaEficiente@Eficiencia_ArImpresoenNoviembre2017)
- Mutize, C., & Wang, R.-J. (2013). *Performanse comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2542.1922>
- Safin, N., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dmitrievskii, V. (2018). Calculation of the efficiency and

power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30-2. *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives, IWED 2018 - Proceedings, 2018-Janua*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IWED.2018.8321381>

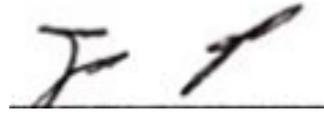
Stoffel, B. (2015). *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units: Background and Methodology*. 1–136.

# ANEXOS

---

Los anexos deben ser nombrados con letras para diferenciarse unos de otros (p. ej: Anexo A, Anexo B, etc.). Estos hacen extensiva la información del contenido del trabajo realizado tales como cálculos matemáticos extensos, códigos de programación, etc. El contenido de los apéndices debe permitir a alguien externo al desarrollo del trabajo, llegar a los mismos resultados siguiendo la misma metodología complementada con la información que en este aparte reposa.

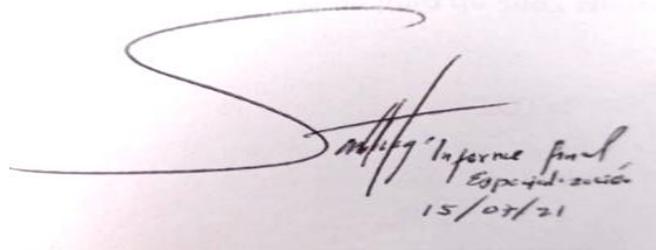
FIRMA ESTUDIANTES



Janer Garcia Sierra

---

FIRMA ASESOR



FECHA ENTREGA: 16 de julio de 2021