



Reducción del consumo eléctrico en distribución de agua con motores síncronos de imanes permanentes

Los motores eléctricos de velocidad variable y alta eficiencia son la mejor opción para aumentar la eficiencia energética de los sistemas de bombeo de agua en saneamiento. Para producir un flujo de agua variable, se puede usar un solo motor de velocidad variable para reemplazar una serie de motores de velocidad constante más pequeños, lo que elimina la necesidad de válvulas reguladoras y aumenta el rendimiento del sistema. Este estudio evalúa la sustitución de motores de velocidad constante por motores de velocidad variable de alta eficiencia en un sistema de bombeo de agua, se comparan diferentes tecnologías de motores existentes en la industria: motores síncronos de imanes permanentes; motores de inducción de velocidad variable; y un grupo de motores de inducción de velocidad constante. Se discutieron los efectos de pérdidas eléctricas adicionales en los convertidores de frecuencia electrónicos de soluciones de velocidad variable. Los resultados muestran que los motores síncronos son la mejor solución para el ahorro de energía.

Palabras clave

Energía, mejora de la calidad, eficiencia energética, reducción de residuos.

REDUCING ELECTRICITY CONSUMPTION IN WATER DISTRIBUTION WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Variable speed and high efficiency electric motors are the best option to increase the energy efficiency of water pumping systems in sanitation. To produce variable water flow, a single variable speed motor can be used to replace an array of smaller constant speed motors, eliminating the need for regulating valves and increasing system throughput. This study evaluates the replacement of constant speed motors by high efficiency variable speed motors in a water pumping system, different motor technologies existing in the industry are compared: permanent magnet synchronous motors; variable speed induction motors; and a group of constant speed induction motors. The effects of additional electrical losses on the electronic frequency converters of variable speed solutions were discussed. The results show that synchronous motors are the best solution for energy saving.

Keywords

Energy, quality improvement, energy efficiency, waste reduction.

Mateus Moro Lumertz
especialista en motores personalizados de baja tensión de WEG

Fernando Jose Luchini
especialista en motores custom de baja tensión de WEG

Emerson Hamerschmitt
gerente de desarrollo de motores personalizados de WEG

Thiago Barbosa
gerente de Desarrollo de Negocios de Agua de WEG



1. INTRODUCCIÓN

Las bombas utilizadas en las redes de distribución de agua (RDA) deben permitir el suministro de un caudal de agua variable, para ajustar el suministro según el consumo y evitar el desperdicio de agua. Estas bombas suelen ser accionadas por motores eléctricos, donde se pueden utilizar diferentes configuraciones y tecnologías para intentar reducir el consumo de energía eléctrica. La energía eléctrica consumida es el mayor costo de operación de la RDA, ya que los picos de consumo de agua normalmente coinciden con los picos de consumo de energía eléctrica en las regiones urbanas, por lo que las bombas necesitan operar con mayor potencia cuando el costo de la energía eléctrica es alto [1].

Para proporcionar un caudal de agua variable, una solución típica es utilizar varias bombas de menor potencia, accionadas por motores eléctricos conectados directamente a la red eléctrica (*direct on line*, DOL). En esta solución, no es posible variar la velocidad de rotación de los motores, por lo que estas bombas funcionan en paralelo y se puede variar el caudal de agua modificando el número de motores accionados simultáneamente [2, 3, 4]. Sin embargo, la simple modificación del número de bombas en funcionamiento permite cambiar el caudal de agua resultante en un conjunto discreto y limitado de valores, lo que se traduce en un gran desperdicio de agua cuando el consumo no coincide con estos valores. Para reducir el desperdicio de agua, se utilizan válvulas para regular la presión y reducir la cantidad de agua suministrada. Empero, el uso de válvulas da como resultado una gran pérdida de energía eléctrica ya que se reduce la eficiencia de la bomba.

Este conjunto de motores DOL necesarios para producir un flujo de agua variable puede reemplazarse por hasta un solo motor de velocidad variable, que debe ser accionado a través de un variador de frecuencia (VFD). Sin embargo, debido a la conmutación y modulación de las señales eléctricas, el uso del VFD introduce pérdidas armónicas en el motor, además de generar pérdidas adicionales en los semiconductores del propio VFD.

Entre las soluciones que utilizan la variación de velocidad, se pueden utilizar diferentes tecnologías y dar como resultado la obtención de diferentes niveles de eficiencia. Por contar con una tecnología ya consolidada, los motores de inducción trifásicos (MIT) se encuentran en gran parte de la industria por poder cumplir con los rendimientos IE2 e IE3 a un menor costo. Con todo, si bien es posible obtener mayores eficiencias con este tipo de motor, la tecnología se vuelve menos competitiva en IE4 e IE5 que la de motores síncronos de imanes permanentes (MSIP), especialmente si se consideran las eficiencias a cargas parciales.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia energética de diferentes soluciones para la activación de bombas en sistemas de distribución de agua. Para ello, se realiza un estudio de caso de la RDA de la ciudad de Jaraguá do Sul (Brasil). Los MIT se estudiaron considerando

el mismo índice de eficiencia en dos tipos de solución: un arreglo de motores DOL y un solo motor accionado por VFD. Además, los resultados se compararon con una solución basada en MSIP que logra niveles de rendimiento más altos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El caso objeto de estudio en este trabajo es la RDA del Servicio Autónomo Municipal de Agua y Alcantarillado (SAMAE) en la ciudad de Jaraguá do Sul, en Brasil. El análisis consiste en reemplazar el DOL conectado al MIT para el bombeo de agua con la ayuda de válvulas reguladoras de presión. Los sistemas de bombeo evaluados tienen una potencia total de 200 HP, para atender la demanda se evaluaron las siguientes soluciones:

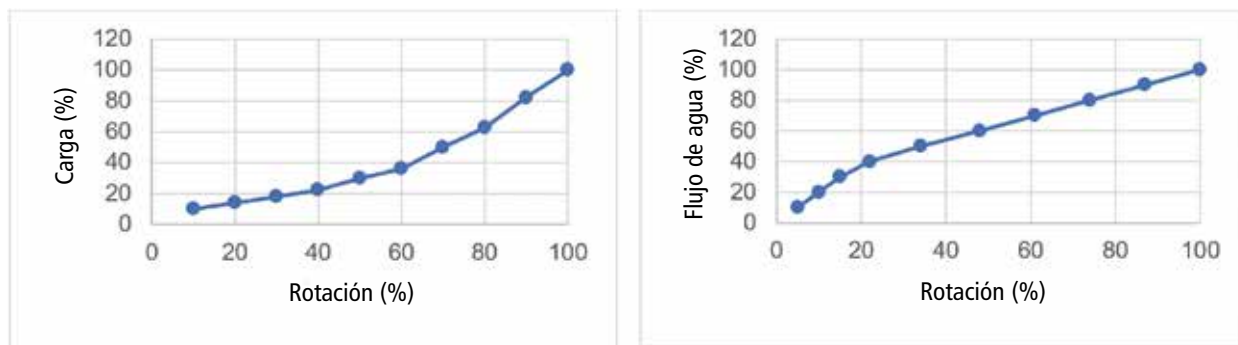
- Un solo MSIP IE5 de 200 HP suministrado por WEG Equipamentos Elétricos, activado por VFD.
- Un solo MIT IE4 de 200 HP suministrado por WEG Equipamentos Elétricos, accionado por VFD.
- Una matriz de diez 20 HP MIT IE4 con conexión DOL.
- Una matriz de cinco 40 HP MIT IE4 con conexión DOL. Solución actual existente en el sistema de distribución de agua.

Las especificaciones de estas soluciones se resumen en la **Tabla 1**. Las curvas típicas de carga y flujo de

TABLA 1

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS SOLUCIONES.				
Tecnología	Activación	Eficiencia	Potencia de la unidad	Cantidad
MSIP	VFD	IE5	200 CV	1
MIT	VFD	IE4	200 CV	1
Matriz de MIT	DOL	IE4	20 CV	10
Matriz de MIT	DOL	IE4	40 CV	5

FIGURA 1. Curvas de las bombas evaluadas.



a) Curva de carga del motor

b) Curva de flujo de agua de la bomba

agua para las bombas instaladas en el RDA se muestran en la **Figura 1**.

A pesar de que el comportamiento de las bombas de 20 HP y 200 HP es similar, el uso de motores eléctricos de menor potencia en el conjunto DOL tiene una gran influencia en la eficiencia del sistema. Los motores de mayor potencia generalmente pueden lograr eficiencias más altas con mayor facilidad, y este efecto se considera en los índices de eficiencia de las normas y estándares de la industria.

Las normas NBR 17094-1 e IEC 60034-30-1, por ejemplo, definen los índices de eficiencia que se muestran en la **Figura 2**, donde la eficiencia que debe cumplirse en cada índice varía con la velocidad de rotación y la potencia del motor. Así, si se consideran motores con el mismo índice de eficiencia, el de mayor potencia tiene la mayor eficiencia. El conjunto de motores DOL de menor potencia tendrá una eficiencia nominal igual a la de un solo motor. Debido a esto, un conjunto de motores siempre tendrá una eficiencia nominal menor que un solo motor con potencia equivalente, considerando el mismo índice de eficiencia.

Las eficiencias de las bombas estudiadas se muestran en la **Tabla 2**, considerando diferentes valores de

FIGURA 2. Índices de eficiencia para motores de 1.800 rpm.

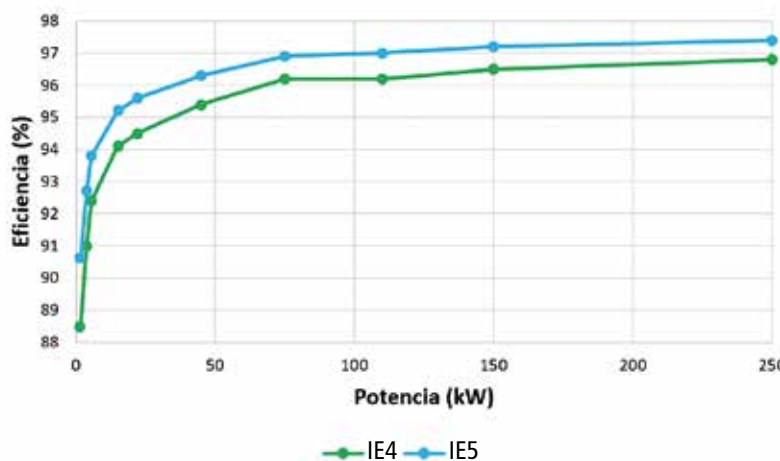


TABLA 2
COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS (SIN TENER EN CUENTA LAS VÁLVULAS REGULADORAS).

Flujo de agua	40%	60%	80%	100%
Eficiencia VFD	96,5%	98,3%	98,5%	98,7%
Eficiencia MSIP + VFD	90,0%	93,3%	95,2%	95,8%
Eficiencia MIT 200 CV + VFD	84,9%	90,5%	93,4%	95,1%
Eficiencia 10 x 20 CV MIT DOL	93,8%	93,8%	93,8%	93,8%
Eficiencia 5 x 40 CV MIT DOL	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%

caudal de agua. Para sistemas accionados por VFD, el rendimiento informado considera el modelo CFW11 de WEG para el cálculo de pérdidas.

La matriz MIT en conexión DOL presenta mayor eficiencia para menores valores de caudal de agua, como se muestra en la **Tabla 2**, ya que

cada motor del conjunto se encuentra operando en condición nominal. Sin embargo, la potencia requerida en estas condiciones es mucho menor que la potencia requerida con valores más altos de flujo de agua, y la cantidad absoluta de energía desperdiciada también es menor.



El sistema eléctrico del conjunto de 10 motores DOL es menos eficiente energéticamente que el conjunto de solo 5 motores. A pesar de ello, el mayor número de motores reduce la necesidad de utilizar válvulas reguladoras de presión, ya que se obtiene una mejor resolución en el ajuste del caudal de agua a través del número de motores funcionando simultáneamente a velocidad constante. Sin embargo, en ambas situaciones son necesarias válvulas de regulación para que la cantidad de agua bombeada no supere la cantidad de agua demandada.

Las bombas que funcionan con motores de velocidad constante presentan una gran pérdida de energía cuando funcionan con válvulas reguladoras, como se muestra en la **Figura 3**. Por esto, las bombas con motores DOL tienen mayor consumo de energía y requieren más potencia de los motores, por lo que el sistema que posee eficiencia inferida incluso en situaciones de cargas parciales donde el conjunto de motores DOL tendría mayor rendimiento.

Cuando el consumo de agua coincide con los valores de flujo de agua que se pueden proporcionar con un número determinado de motores DOL que funcionan sin control de válvulas, el sistema de motor DOL tiene sus puntos de mayor eficiencia. Por eso, un conjunto con más motores puede ser una solución más eficiente aumentando el número de estos puntos, incluso si la eficiencia de los motores es menor.

La **Figura 4** muestra los mapas de eficiencia de los dos motores de velocidad variable: el MIT IE4 de 200 HP; y el MSIP IE5 de 200 HP. La ventaja de la tecnología síncrona no es solo la posibilidad de cumplir con IE5 en condiciones nominales, sino también la gran ganancia de

FIGURA 3. Consumo de energía de la bomba.

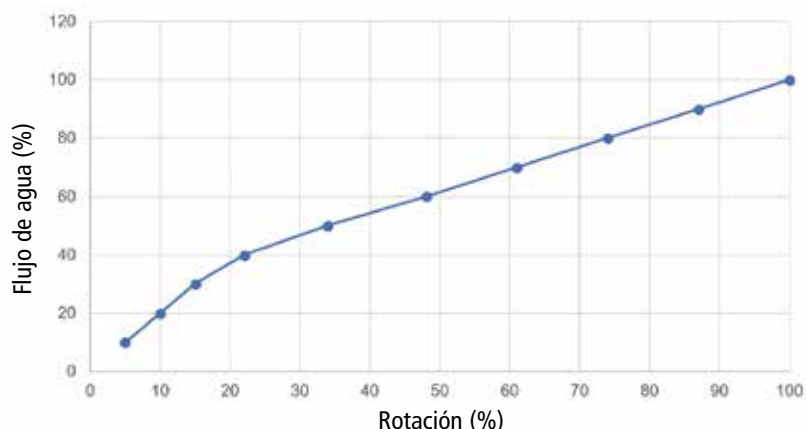


FIGURA 4. Mapas de eficiencia con pérdidas armónicas.

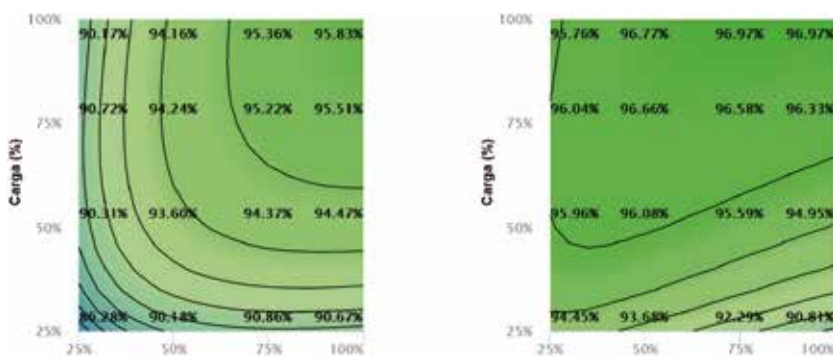
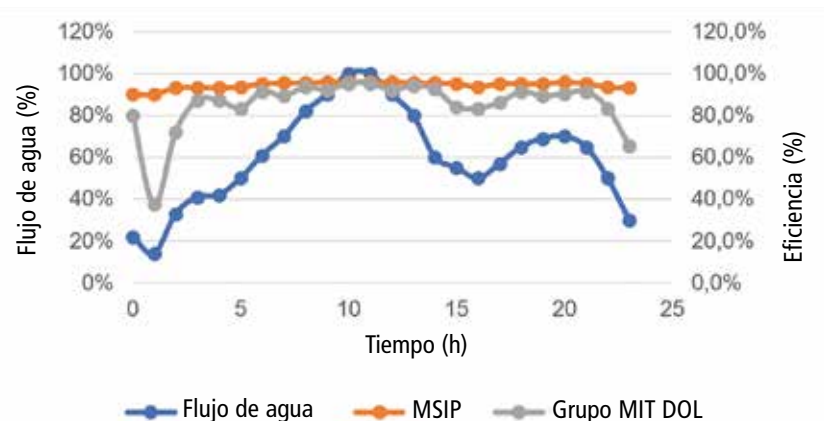


FIGURA 5. Curva de consumo de agua.



eficiencia en condiciones de carga parcial.

3. RESULTADOS

El consumo de agua del sistema de bombas de SAMAE se registró en un intervalo de operación de 24

horas. La **Figura 5** muestra esta curva de carga, junto con la eficiencia del grupo de motores DOL ya existentes en el sistema, así como la eficiencia que se hubiera obtenido con la sustitución de estos motores por MSIP.

La **Tabla 3** muestra la energía total desperdiciada para cada solución evaluada en este estudio considerando la curva de carga de la **Figura 5**. La energía desperdiciada es la energía gastada en pérdidas del sistema, considerando el sistema eléctrico y las pérdidas causadas por las válvulas.

La solución actual con 5 motores MIT en la matriz DOL habría aumentado la eficiencia en la curva de carga registrada si se aumentara el número de motores a 10. Sin embargo, esta solución aumenta los costos de mantenimiento del sistema y los ahorros de energía son menos significativos que las soluciones VFD.

Considerando las dos mejores propuestas con tecnología MIT: con VFD o DOL con 10 motores, hay una diferencia de 25,1% en la reducción de energía desperdiciada (energía consumida por pérdidas del sistema) aún siendo las dos soluciones IE4 y considerando las pérdidas adicionales del variador de frecuencia.

La solución IE5 con tecnología síncrona mostró el mayor ahorro de energía entre las opciones evaluadas. Considerando un coste de energía promedio de 11,4 € por cada 100 kW consumidos, el MSIP presenta ahorros anuales de 3.828,5 € frente a la solución DOL con 5 motores en la matriz.

En la RDA de SAMAE en Jaraguá do Sul, la matriz de 5 motores DOL fue reemplazada por motores MSIP de mayor potencia, con el objetivo de reducir el consumo de energía eléctrica. Los nuevos motores se muestran en la **Figura 6**.

4. CONCLUSIONES

Este estudio analizó diferentes tecnologías de bombeo para uso en la RDA de la ciudad de Jaraguá do Sul de Brasil. El alcance de las evaluacio-

TABLA 3				
PÉRDIDAS TOTALES EN 24 HORAS DE CONSUMO.				
Tecnología	MIT	MIT	MIT	MSIP
Cantidad	5	10	1	1
Activación	DOL	DOL	VFD	VFD
Índice de rendimiento	IE4	IE4	IE4	IE5
Energía desperdiciada	168,9 kWh	146,8 kWh	104,4 kWh	76,8 kWh
Valor perdido	19,25 €	16,74 €	11,89 €	8,76 €
Diferencia	0	-13,1%	-38,2%	-54,5%

FIGURA 6. Motores IE5 en la RDA en Jaraguá do Sul, Brasil.



nes fueron motores con eficiencia IE4 e IE5, operando DOL (velocidad constante) y con VFD (velocidad variable).

La matriz con 10 motores DOL no tiene las pérdidas adicionales del VFD. Sin embargo, las pérdidas en las válvulas reguladoras utilizadas para producir un caudal de agua variable hacen que este sistema sea menos eficiente que otras soluciones, considerando una curva de consumo real donde no siempre el consumo solo se puede cumplir cambiando el número de motores accionados simultáneamente.

Si no se utilizan las válvulas, la cantidad de agua suministrada será mayor que la cantidad de agua utilizada, dando como resultado un gran desperdicio de agua potable. Si se utiliza un número menor de mo-

tores, el desperdicio de energía será aún mayor debido a la mayor necesidad de utilizar las válvulas.

Considerando la eficiencia nominal y con cargas parciales, el motor síncrono IE5 posee la tecnología con mayor potencial de ahorro energético, siendo ideal para reducir los costes de operación de los sistemas de distribución de agua.

Bibliografía

- [1] Oikonomou, K.; Parvania, M. (2020). Optimal coordinated operation of interdependent power and water distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, págs. 4.784-4.794.
- [2] Lai, Z.; et. al. (2020). Improving reliability of pumps in parallel pump systems using particle swarm optimization approach. *IEEE Access*, vol. 8, p.ágs. 58.427-58.434.
- [3] Lyu, L.; Chen, Z.; Yao, B (2019). Energy saving motion control of independent metering valves and pump combined hydraulic system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, págs. 1.909-1.920.
- [4] Bao, R.; Wang, Q.; Wang, T (2020). Modeling and control strategy of a multi-pump multi-actuator hydraulic system with on/off valve matrix. *IEEE Access*, vol. 9, págs. 2.169-3.536.