



Dimensionado preciso de líneas de baja tensión para alimentación de bombas sumergidas en pozos de agua

Los motores eléctricos utilizados para accionar bombas de agua potable sumergidas en pozos requieren por su ubicación el uso de líneas de alimentación que superan en muchas ocasiones los 300 metros de longitud. La combinación de este condicionante junto con otros factores como, por un lado, la elevada potencia requerida por muchos de estos motores y, por otro lado, el nivel de tensión de alimentación para el que están diseñados (normalmente 400 V), conlleva normalmente elevados niveles de pérdidas en las líneas que se traducen en caídas de tensión muy significativas. En este contexto, una mala selección de la sección de los cables, en el que la caída de tensión asociada a la componente inductiva de estos no sea tenida en cuenta debidamente, puede implicar que un motor instalado no sea capaz de arrancar. En este artículo se presenta el proceso de cálculo detallado de los cables en instalaciones de esta naturaleza para evitar situaciones no deseadas como la incapacidad de arrancar una bomba.

Palabras clave

Bombas sumergidas, alimentación en baja tensión, caídas de tensión, inductancia entre fases.

PRECISE SIZING OF LOW VOLTAGE LINES FOR POWERING PUMPS SUBMERGED IN WATER WELLS

Electric motors used to drive drinking water well submerged pumps require, due to their location, the use of power lines that often exceed 300 meters. The combination of this conditioning factor together with others, such as the significant power required by many of these motors and their rated supply voltage level, normally entails high losses that translate into in significant voltage drops. In this context, a simplified wiring sizing, in which the voltage drop associated with the inductive component of cables is not properly considered, may imply that an installed motor is unable to start. The detailed calculation process for cables in installations such as these is offered in this article to help avoiding unwanted situations such as the inability to start a pump.

Keywords

Submerged pumps, low voltage feeders, voltage drops, parallel wire inductances.

Héctor Beltrán

profesor titular del Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño de la Universitat Jaume I

Miguel Ortiz

subdirector técnico del Área de Abastecimiento de Facsa

Juan Miguel Llopis

jefe de Mantenimiento del Área de Abastecimiento de Facsa



1. INTRODUCCIÓN

La extracción de agua potable desde acuíferos subterráneos es una tarea que se realiza desde hace muchos años. Con el desarrollo de la maquinaria eléctrica y el avance de la tecnología, cada vez se tiene acceso a acuíferos más profundos, llegando en la actualidad a realizar en España extracciones con más de 1 km de profundidad. Estas instalaciones suponen un desafío a la hora de llevar hasta el fondo del pozo la potencia eléctrica necesaria para que el motor allí instalado accione la bomba correspondiente. Más allá del reto constructivo, suponen un claro reto eléctrico derivado de la inexorable ley de Ohm: las pérdidas a lo largo de la línea traducidas en caída de tensión.

Para dimensionar cables o conductores eléctricos en una instalación de baja tensión se han utilizado tradicionalmente dos métodos:

- Criterio térmico, también conocido como criterio de corriente, cuyo objetivo es definir de acuerdo con las tablas correspondientes del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT), o del fabricante del conductor, cuál es la sección mínima de cable necesaria para transportar un nivel determinado de corriente sin que el aislante polimérico alcance su temperatura máxima de servicio (entre 70 y 90 °C en función del material).

- Criterio de caída de tensión, que persigue definir también la sección mínima de conductor que permita garantizar que la caída de tensión a lo largo del circuito bajo diseño sea menor que un límite establecido por la normativa (REBT) o, en su ausencia, por el fabricante del equipo a alimentar al final de la línea.

Estos dos métodos ofrecen como resultado la sección mínima de conductor y, por tanto, la más económica, que cumple con lo exigido por el REBT. No obstante, con el auge del precio de la electricidad y las tendencias de los últimos años en favor de la eficiencia energética a nivel europeo, un tercer criterio denominado "de eficiencia energética" va ganando cada vez más fuerza. Al contrario que los dos anteriores, este no busca una sección mínima que cumpla la normativa de corriente y tensión, sino que explora a partir de ese valor mínimo cuál es la sección que minimiza el coste de instalación (CAPEX) y explotación (OPEX y pérdidas) de la línea a lo largo de un período de tiempo determinado (10 años, vida útil del cable...).

En el caso de las instalaciones de bombeo en pozos de agua potable, dada la longitud requerida por las líneas de alimentación, el criterio de caída de tensión es claramente más restrictivo que el criterio térmico. Además, en instalaciones de varios

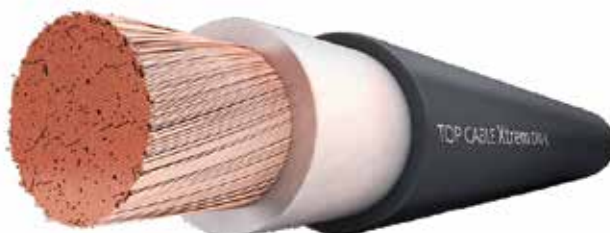
cientos de metros de profundidad no se prioriza el uso del método de eficiencia energética, ya que los circuitos suelen estar abocados a secciones por encima de 185 mm² por fase, siendo necesario en muchas de ellas incluso duplicar o triplicar el número de conductores por fase. Esto implica que los circuitos de alimentación eléctrica acaban ocupando un espacio nada desdeñable que acarrea que, en ciertas perforaciones, no resulte sencillo desplegar los cables junto a la tubería. Es por eso por lo que aumentar aún más la sección de acuerdo con el criterio de eficiencia energética para minimizar pérdidas no tiene cabida en este contexto.

Por tanto, centrandolo en el dimensionado de cables por criterio de caída de tensión, destaca el efecto que tiene sobre la caída de tensión en la línea la componente inductiva de los cables que lo conforman. Este es un factor despreciado en la mayoría de las instalaciones de baja tensión que no puede ser minusvalorado en esta ocasión.

2. EL PROBLEMA: LA INDUCTANCIA DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE BOMBAS SUMERGIDAS

El cable generalmente utilizado en la alimentación de motores eléctricos que impulsan bombas sumergidas en el interior de pozos de agua potable es del tipo denominado DN-F (Figura 1). Se trata de un cable unipolar de cobre electrolítico, clase 5 (flexible) para facilitar su montaje e introducción en el pozo, con aislamiento hecho de elastómero termostable (etileno-propileno, EPR) y cubierta también elastomérica termostable, pero compuesta en este caso de goma flexible de policloropropeno.

FIGURA 1. Modelo de cable tipo DN-F de la empresa Top Cable.



Por norma general, se suele considerar en el mundo del cálculo y dimensionado de cables que los conductores de baja tensión presentan una impedancia interna de valor eminentemente resistiva. No obstante, a partir de cierta sección, que dependiendo de la fuente y el fabricante suele oscilar entre los 50 y los 120 mm², se acepta que el cable presenta un valor de inductancia que ya no es despreciable ni a efectos de cálculo ni de funcionamiento. Tal y como se ha comentado, este es el caso de los conductores instalados en los pozos de agua potable explotados por empresas como la castellanense Facsa. La gran profundidad de muchos de sus pozos hace que el cálculo detallado de las caídas de tensión en dichas líneas sea relevante.

La definición básica de las caídas de tensión que se producen en una línea trifásica viene definida, de acuerdo con el REBT, por la siguiente ecuación:

$$U(\%) = \epsilon(\%) = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{l \cdot P}{c \cdot S \cdot U_N^2} \cdot 100$$

donde:

- l es la longitud de la línea (en metros, m).
- P es la potencia activa transportada (en vatios, W).
- c es la conductividad (inversa de la resistividad) del material conductor (dependiente de la temperatura y del material e igual a unos 48 m/(Ω·mm²) para el cobre a 70°C).
- S la sección de los conductores (en mm²).
- U_N es la tensión nominal de la instalación (normalmente 400 V para bombas trifásicas).

Por tanto, la caída de tensión en las líneas de alimentación es pro-

porcional a la longitud de la línea e inversamente proporcional a la sección de los conductores que la conforman.

De este modo, para poder cumplir con los porcentajes de caída de tensión máximos (de hasta el 5% según normativa para líneas de fuerza) que garanticen que el motor situado en el fondo de un pozo pueda arrancar (teniendo en cuenta además los picos de potencia durante el arranque del motor), y al ser la longitud de las líneas tan elevada, hace falta usar secciones también muy elevadas. La experiencia indica que cuando los cables de baja tensión alcanzan estas secciones, su componente inductiva debe ser tenida en cuenta, por lo que el cálculo de la caída de tensión evoluciona hacia la siguiente ecuación:

$$U(\%) = \frac{l \cdot P}{c \cdot S \cdot U_N^2} \cdot 100 + \frac{X_L \cdot Q}{U_N^2} \cdot 100$$

donde:

- X_L es la impedancia inductiva de la línea (en ohmios, Ω).
- Q es la potencia reactiva transportada (en voltio-amperios reactivos, VAR).

El valor de esta X_L se obtiene a partir de la frecuencia de alimentación y de la inductancia de la línea (L, medida en Henrios por kilómetro, H/km). Esta última depende a su vez de la sección del cable, pero está caracterizada fundamentalmente por la disposición relativa entre los cables de las distintas fases a lo largo del circuito. Es, por tanto, un valor que dependerá del número de cables que conforman la línea (monofásica o trifásica, con o sin desdobles...) y de la colocación o distribución espacial de estos a lo largo del pozo.

Se pueden determinar cuatro casos típicos (Figura 2) que son comunes en las instalaciones en pozos:

- Línea monofásica que discurre con fase y neutro pegados. Se puede demostrar que la inductancia L corresponde a la siguiente ecuación:

$$L = \left[1 + 9,2 \cdot \log \frac{D}{R} \right] \cdot 10^{-4}$$

donde D es el diámetro exterior de los conductores de fase y R es su radio interior.

- Línea trifásica dispuesta en triángulo. El valor de la inductancia con esta disposición será de acuerdo con las dimensiones establecidas en la ecuación:

$$L = \left[0,5 + 4,6 \cdot \log \frac{D}{R} \right] \cdot 10^{-4}$$

- Línea trifásica dispuesta con los conductores instalados en un plano. Al igual que en el caso interior, a partir de las dimensiones mostradas, se puede establecer un valor de inductancia, en este caso de:

$$L = \left[0,96 + 4,6 \cdot \log \frac{D}{R} \right] \cdot 10^{-4}$$

- Línea trifásica dispuesta en las ranuras o hendiduras de las conexiones entre tramos de tubería. De acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 3, las distancias son distintas entre fases y el valor de la inductancia a utilizar resulta:

$$L = \left[0,5 + 4,6 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}}{R} \right] \cdot 10^{-4}$$

siendo D₁ = (2 · r) + (2 · h), con r = radio interno de la tubería y h = distancia a la que queda colocado el cable con respecto a la superficie interna de la tubería, y D₂ = D₃ = √(2 · (r + h)²).



FIGURA 2. Casos típicos de instalación de cables en pozo.

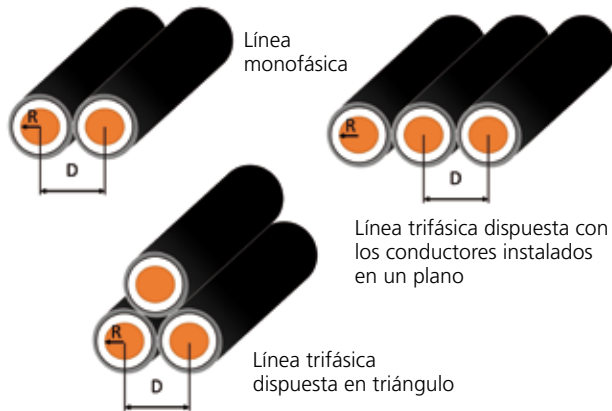
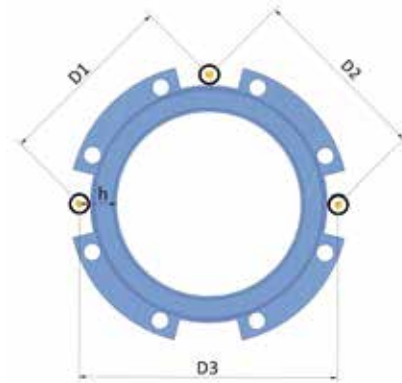


FIGURA 3. Disposición de línea trifásica en las ranuras de la tubería.



3. DISCUSIÓN: DIFERENCIAS ENTRE LAS CAÍDAS DE TENSÓN CALCULADAS Y LAS EXPERIMENTADAS

Las ecuaciones anteriores implican la aparición de unos valores de impedancia inductiva que pueden variar entre los 50 y los 400 mΩ/km, dependiendo del modo de instalación de los circuitos y de la disposición relativa entre fases. Estos valores implican unas inductancias de línea que no son ni mucho menos despreciables si se comparan con los valores de impedancia asociados a la resistividad del cobre, que oscilan entre los 75 y los 150 mΩ/km para conductores de entre 120 y 240 mm² de sección. Por tanto, estos valores de inductancia pueden elevar las caídas

de tensión efectivas en líneas tan largas como las de los pozos de agua potable de forma muy significativa.

A modo de ejemplo, se presentan resultados en la Tabla 1. En ella se resume un total de siete supuestos de cálculo correspondientes a la caída de tensión en una línea trifásica que alimenta un motor de una bomba a 400 V y que consume 350 A por fase con un factor de potencia igual a 0,85. Se considera el motor ubicado en un pozo a 250 m de profundidad y que los cables presentan una sección de 185 mm², la cual cumpliría el criterio térmico. Para este caso, se plantean distintos supuestos que se diferencian entre ellos por el hecho de considerar, o no, tanto el valor de la inductan-

cia de los cables como el factor de arranque del motor (cosa que supone mayorar la potencia un 25%). Asimismo, los supuestos cubren las tres configuraciones de disposición de conductores presentadas previamente. Además, se considera para los supuestos 6 y 7 una tubería con diámetro interior de 200 mm y un saliente 'h' de 50 mm para colocación de los cables en las bridas o conexiones entre tramos.

Así, se puede observar en los cálculos resumidos, que tienen como base el supuesto 1 (considerando el cable puramente resistivo y sin tener en cuenta el arranque del motor), cómo el hecho de tener en cuenta uno u otro efecto implica efectivamente una diferencia en la caída de

TABLA 1

RESULTADOS DE CÁLCULO DE CAÍDAS DE TENSÓN BAJO DISTINTOS SUPUESTOS.

Supuesto	Distribución	Inductancia	Arranque motor	AV (V)	AV (%)
1	Cualquiera	No	No	14,98	3,75
2	Triangular	Sí	No	21,21	5,3
3	Triangular	Sí	Sí	26,51	6,63
4	Plana	Sí	No	22,36	5,59
5	Plana	Sí	Sí	27,95	6,98
6	Sobre tubería	Sí	No	31,92	7,98
7	Sobre tubería	Sí	Sí	39,91	9,97

FIGURA 4. Montajes de un pozo de agua potable.



tensión significativa. Obsérvese en este sentido cómo el considerar la inducción de los cables, supuestos 2 al 5, implica aumentos porcentuales en la caída de tensión obtenida a lo largo de la línea que van del 3,75% de partida hasta casi el 7%, en función del tipo de distribución de los cables y teniendo en cuenta el arranque del motor. Asimismo, se aprecia cómo el peor de los supuestos de instalación de cables es el denominado 'sobre tubería' en el que la caída de tensión se incrementa en más de un 200% (supuesto 6 frente al 1), y en casi un 300% (supuesto 7 frente al 1).

4. CONCLUSIÓN: LA IMPORTANCIA DE UN CÁLCULO PRECISO

Queda claro de este estudio que, aunque el problema asociado a la caída de tensión en las líneas debida a la inducción electromagnética entre fases no ha sido tradicionalmente tenido en cuenta en los sistemas de baja tensión, se trata de un fenómeno que no puede ser despreciado en las instalaciones en pozos de agua.

En línea con los cálculos elaborados y los resultados obtenidos, hay

que concienciar tanto al diseñador como a los instaladores de intentar minimizar la distancia entre fases tanto en el diseño como durante el montaje. Así, siempre que el espacio del pozo lo permita, será conveniente forzar a las fases a que discurran lo más próximas posible entre ellas durante toda la bajante.

Nótese, así mismo, que el despliegue de estos circuitos no es una tarea fácil debido a las ya citadas limitaciones de espacio en los pozos, cosa que limita la posibilidad de disponer los cables de forma ordenada durante el montaje (Figura 4). En este sentido, será conveniente utilizar mangueras de cables multiconductoras, si el pozo lo admite, ya que así se garantiza un correcto agrupamiento e incluso cierto trenzado entre fases. Por el contrario, para instalaciones con secciones mayores realizadas mediante cables unipolares, será conveniente agrupar los cables tanto como sea posible, siendo mejor desplegarlos en la disposición triangular (con los cables embridados entre ellos) que no en la disposición plana. Y tanto en un caso como en otro, o incluso si se instalan por falta de espacio a tra-

vés de las ya citadas ranuras de las bridas, es conveniente intentar en la medida de lo posible el trenzado para que la terna de cables alcance las tres posiciones relativas posibles. Esta es una solución tradicional a este tipo de problemas llevada a cabo en líneas de alta tensión que permite compensar y equilibrar las caídas de tensión inductivas provocadas entre fases.

En todo caso, se antoja difícilmente evitable por las restricciones de espacio y maniobrabilidad durante el montaje que aparezcan ciertas inducciones entre fases. No obstante, con estas pocas recomendaciones y un buen diseño previo de ingeniería, que tenga en cuenta el factor de la inductancia existente, debería poder minimizarse su efecto evitando situaciones tan indeseadas como el no poder arrancar una bomba recién instalada tras el trabajo y el tiempo invertido en colocarla en su posición.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo ofrecido por la Generalitat Valenciana para llevar a cabo este estudio a través del proyecto con código AEST/2020/005. 🌱