

CAPÍTULO 5

Diseño de líneas y cables eléctricos

Objetivos del capítulo

El primer objetivo de este capítulo es conocer los criterios de dimensionado de las líneas eléctricas de baja tensión que alimentan a las instalaciones receptoras de usuario, presentes en todas las edificaciones industriales, terciarias y residenciales. El segundo objetivo es aprender a usar el Reglamento electrotécnico para baja tensión para realizar este dimensionado, normativa que es importante en las aplicaciones de la ingeniería industrial generalista.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Analizar los modelos eléctricos característicos de las líneas eléctricas en función de su longitud, identificando la influencia de los efectos resistivos, inductivos y capacitivos.
- Resolver el circuito equivalente del modelo de línea corta como base del cálculo de la caída de tensión entre dos puntos de la línea.
- Conocer las expresiones de la caída de tensión porcentual en líneas trifásicas y monofásicas.
- Distinguir las partes de un cable eléctrico, sus características y la forma de designarlo.
- Identificar las partes de una instalación eléctrica de baja tensión y sus principales elementos.
- Dimensionar los cables eléctricos en instalaciones de baja tensión mediante los criterios de la máxima caída de tensión admisible y de la máxima intensidad admisible.

1. Introducción

El sistema eléctrico está formado por redes de transporte y distribución que conectan las instalaciones de producción con los centros de consumo. La clasificación de las redes eléctricas se realiza en función de su nivel de tensión, pudiendo ser de alta tensión (AT, entre 400 y 30 kV), de media tensión (MT, entre 30 y 1 kV) y de baja tensión (BT, inferiores a 1 kV).

El transporte de energía eléctrica a elevadas distancias se realiza en alta tensión para disminuir las pérdidas de potencia activa, es decir, pérdidas en las líneas por efecto Joule, ya que para una misma potencia transportada, cuanto mayor sea la tensión, menor será la intensidad circulante y, por tanto, las pérdidas.

Normalmente, la distribución en alta tensión se lleva a cabo mediante líneas eléctricas aéreas de conductores desnudos, que estamos habituados a observar en el paisaje. Bajo determinadas condiciones, como pueden ser cruces de infraestructuras, parajes naturales o cerca de núcleos urbanos poblados, las infraestructuras de transporte de energía eléctrica pueden ser líneas subterráneas de conductores aislados.

Por el contrario, las líneas de distribución en media y baja tensión, más cercanas a los núcleos poblacionales, suelen ser subterráneas para mayor seguridad, salvo en zonas rurales más despobladas en las que es frecuente distribuir mediante líneas aéreas de conductores desnudos.

La principal ventaja de los conductores desnudos es su bajo coste de instalación en comparación con los conductores aislados, mientras que estos últimos presentan una mayor seguridad ante posibles contactos.

En esta parte del manual nos vamos a centrar en el diseño de las instalaciones eléctricas de baja tensión siguiendo el Reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT) y sus instrucciones técnicas complementarias (ITC), aprobado por el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto. Estudiaremos los criterios y métodos de dimensionado de los cables eléctricos, las características de la aparamenta de protección y maniobra de los circuitos y los esquemas generales de protección y distribución.

Iniciando en este capítulo el análisis de los métodos de diseño de líneas y cables eléctricos, es importante aclarar previamente las siguientes definiciones del REBT (ITC-BT-01):

- Cable. Conjunto constituido por:
 - Uno o varios conductores aislados.
 - Su eventual revestimiento individual.
 - La eventual protección del conjunto.
 - El o los eventuales revestimientos de protección que se dispongan.

Puede tener, además, uno o varios conductores no aislados.

- Conductor de un cable. Parte de un cable que tiene la función específica de conducir corriente.

2. Modelos de líneas eléctricas

Para analizar el comportamiento eléctrico de las líneas eléctricas es necesario, como realizamos en el estudio de las máquinas eléctricas, definir un circuito equivalente que caractere todos los fenómenos eléctricos que se dan cuando circula corriente por las mismas.

En esta situación, en las líneas eléctricas se producen tres efectos:

- El efecto resistivo debido a la resistencia del conductor al paso de la corriente eléctrica.
- El efecto inductivo debido al campo magnético producido por la intensidad circulante por los conductores.
- El efecto capacitivo debido a la diferencia de potencial existente entre diferentes conductores.

Estos efectos son más o menos importantes en función de las características de las líneas y de la tensión transportada y se analizarán con más detalle en los próximos subepígrafes.

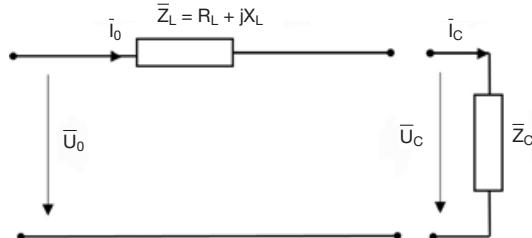
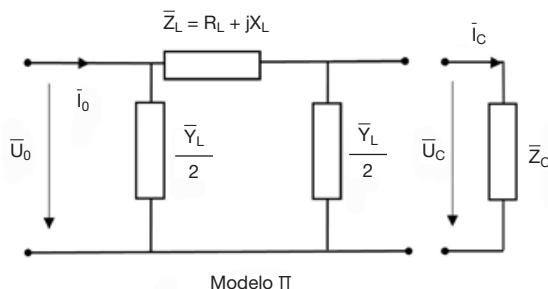
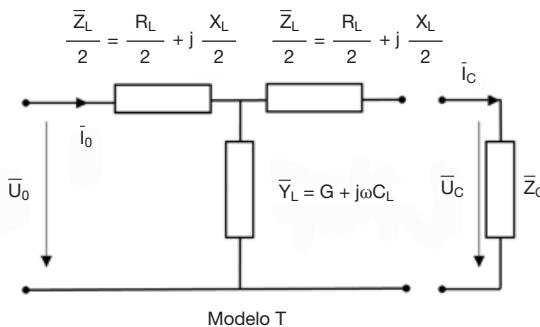
El análisis de los modelos de líneas eléctricas se realiza en función de su longitud. Así, podemos encontrar modelos eléctricos para líneas largas, de aplicación a las grandes líneas de transporte, modelos eléctricos para líneas de longitud media y modelos eléctricos para líneas cortas, de hasta 50 km. Estos modelos se utilizan para el cálculo de tensiones, intensidades y potencias de la línea.

De menor a mayor complejidad, las características de cada uno de los modelos son:

- **Modelo de línea corta.** Es el modelo más simplificado en el que se desprecia el efecto capacitivo de la línea.

En el epígrafe 2.4 analizaremos el circuito equivalente de una línea corta (figura 1), que es el que nos interesa para el cálculo de las caídas de tensión en las líneas de baja tensión.

- **Modelo de línea media.** En este modelo, al aumentar la longitud de la línea, la capacidad ya no es despreciable, por lo que se introduce en el circuito equivalente una admitancia de susceptancia capacitativa. Recordad que la admitancia Y es la inversa de la impedancia y se compone de una parte real, conductancia G y una parte imaginaria, susceptancia B . La unidad de la admitancia es el siemens. El modelo de línea media, para simplificar los cálculos, puede considerar el valor de esta capacidad concentrado en el punto medio de la línea, lo que se denomina modelo T o en los dos extremos de esta, denominado modelo Π (figura 2).
- **Modelo de línea larga.** Se aplica para longitudes superiores a 250 km aproximadamente. En este caso, para obtener una solución más exacta, ya no se emplean los modelos de parámetros concentrados en puntos de la línea, sino que se consideran distribuidos a lo largo de ella.

Figura 1. **Modelo de línea corta**Figura 2. **Modelos de línea media**

2.1. Efecto resistivo

Recordando la definición de resistencia de un conductor:

$$R = \rho \frac{t}{s} \quad (5.1)$$

Donde ρ es el valor de la resistividad del material que se suele expresar en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, l , la longitud del conductor en m y S , la sección en mm^2 .

Hay que destacar que los conductores no suelen ser macizos, sobre todo a partir de ciertos diámetros, sino que están compuestos por una serie de hilos trenzados. Esto hace que la longitud del cable sea inferior a la de los hilos que lo componen, por lo que el valor de la resistencia será ligeramente superior. Del mismo modo, el trenzado también influye en el valor de la sección, ya que hay espacios entre los hilos, por lo que la sección real es inferior a la teórica, aumentando también la resistencia. Generalmente, las tablas de resistencias dadas por los fabricantes ya tienen en cuenta estas diferencias entre las longitudes y secciones reales y teóricas.

Sabemos que el valor de la resistencia calculado mediante la ecuación 5.1 es para una determinada temperatura de trabajo, porque la resistividad del material varía con la temperatura, según la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (5.2)$$

Donde ρ es la resistividad del material a la temperatura T y ρ_0 , la resistividad del material a la temperatura T_0 , normalmente $20\text{ }^\circ\text{C}$, siendo α el coeficiente de temperatura del material (en K^{-1} o C^{-1}).

En las instalaciones de corriente alterna, se debe considerar además otro fenómeno que modifica el valor de la resistencia calculado mediante la ecuación 5.1, que es el denominado efecto pelicular (o efecto skin) producido por una concentración de la densidad de la corriente circulante en la periferia del conductor, disminuyendo en el centro debido a que la variación del campo magnético es mayor en el centro del conductor, aumentando la reactancia inductiva en esa zona.

Este fenómeno es importante en los conductores macizos de secciones elevadas y aumenta con la frecuencia de trabajo. En las instalaciones de baja tensión, que analizamos en este manual, no es significativo, como sí lo es el aumento de la resistencia de los cables en función de la temperatura de trabajo.

2.2. Efecto inductivo

Conocemos que la inductancia de un conductor L es un factor de proporcionalidad entre el flujo magnético que lo atraviesa Φ_m y la intensidad circulante I y que su unidad es el henrio (H).

$$\Phi_m = LI \quad (5.3)$$

También sabemos que cuando dos o más líneas están próximas entre sí, se produce un acoplamiento magnético, es decir, el flujo que atraviesa a cada una de ellas no solo se debe a su propia intensidad circulante, sino también a las corrientes que circulan por las demás

líneas. La inductancia de una línea eléctrica por unidad de longitud, en H/km, se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$L_L = \left[\frac{\mu}{2n} + 4,6 \cdot \log \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad (5.4)$$

Donde μ es la permeabilidad del material, que se puede considerar igual a 1 en líneas de cobre, aluminio y aleaciones, n es el número de cables por fase, D_e , la distancia media geométrica entre las fases en mm y r_e , el radio equivalente del conductor en mm. Es decir, la inductancia de las líneas depende fundamentalmente de su geometría y disposición, los valores de D_e y r_e para las tipologías de distribución más comunes se pueden encontrar en la bibliografía, si se quiere profundizar en el análisis (Mujal, 2002). Cabe indicar que el efecto inductivo se tiene en cuenta principalmente en las líneas de transporte.

2.3. Efecto capacitivo

La capacidad C de una línea respecto a otra se define como el cociente entre la carga eléctrica Q sobre la línea y la diferencia de potencial V entre ambas, siendo su unidad de medida el faradio (F).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (5.5)$$

Expresándose la carga en culombios y la diferencia de potencial en voltios.

Igual que el valor de la inductancia, la capacitancia de una línea eléctrica depende de la geometría de la línea y del material del conductor a través de su permitividad (ϵ). La expresión general de la capacidad de una línea por unidad de longitud (F/km) es:

$$C_L = \frac{24,2 \cdot 10^{-9}}{\log \left(\frac{D_e}{r_e} \right)} \quad (5.6)$$

Que tiene diferentes valores en función de la distancia media geométrica entre las fases D_e (mm) y el radio equivalente del conductor r_e (mm). La consideración de este efecto es importante en las líneas de transporte.

2.4. Circuito equivalente de una línea corta

El circuito equivalente de una línea corta es el representado en la figura 1. La resolución de este circuito se aplica tanto a líneas monofásicas como a líneas trifásicas equilibradas, en

las que el circuito representa el monofásico equivalente fase-neutro. La ecuación que caracteriza el comportamiento del circuito es la siguiente:

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_L + \bar{U}_C \quad (5.7)$$

Donde el subíndice 0 representa los valores de tensión e intensidad en el origen de la línea y el subíndice C , los valores de tensión e intensidad en la carga. Las ecuaciones que representan los modelos eléctricos de las líneas se suelen representar en términos matriciales, relacionando los parámetros en el origen con los parámetros en la carga. En el caso de una línea corta, esta representación matricial es bastante sencilla, a partir de la ecuación 5.7:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{I}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{U}_C \\ \bar{I}_C \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Con:

$$\begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \bar{Z}_L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

EJEMPLO 1

Una línea de aluminio de 220 kV, 50 Hz, tiene una longitud de 20 km y suministra a 80 MW a una carga trifásica conectada en estrella que tiene un factor de potencia 0,9 inductivo. La línea presenta una inductancia de 1,55 mH/km y una resistencia de 0,0089 Ω /km a 20 °C. Si la temperatura de trabajo es de 50 °C, determinar la tensión en el origen de la línea.

Datos: α (coeficiente de temperatura del aluminio) = 0,0039 C^{-1} .

En primer lugar, calculamos la resistencia y la reactancia de la línea. El valor de la resistencia a 50 °C será:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20)) = 0,0089 \cdot (1 + 0,0039 \cdot (50 - 20)) = 0,01 \Omega/km$$

Y el valor total: $R = 0,01 \cdot 20 = 0,2 \Omega$.

La inductancia de la línea es: $L = 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 0,031 H$.

Y la reactancia:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi 50 \cdot 0,031 = 9,74 \Omega$$

La tensión de fase de la carga, conectada en Y, es:

$$\bar{U}_C = \frac{220 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 127,01 \angle 0^\circ kV$$

La corriente de la carga la podemos calcular a partir de la potencia activa suministrada:

$$P = 3U_C I_C \cos \varphi$$

Luego,

$$I_C = \frac{80 \cdot 10^6}{3 \cdot 127,01 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 233,29 \text{ A}$$

Como la tensión de la carga la hemos considerado en el origen, el ángulo de la intensidad será:

$$-\varphi = -\cos(0,9) = -25,84^\circ$$

Resolviendo el circuito equivalente, la tensión en el origen será:

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_L + \bar{U}_C = \bar{I}_C \cdot \bar{Z}_L + \bar{U}_C = 233,29 \angle -25,84^\circ \cdot (0,2 + j9,74) + 127,01 \cdot 10^3 \angle 0^\circ = \\ &= 233,29 \angle -25,84^\circ \cdot 9,74 \angle 88,82^\circ + 127,01 \cdot 10^3 \angle 0^\circ \\ &= 2.272,25 \angle 62,98^\circ + 127,01 \cdot 10^3 \angle 0^\circ = 128,05 \angle 0,9^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

Un parámetro interesante es el rendimiento de la línea que se define como la relación entre la potencia activa entregada a la carga (P_C) y la inyectada al inicio de la línea (P_0), siendo la diferencia entre ambas las pérdidas de potencia activa en la línea (P_L).

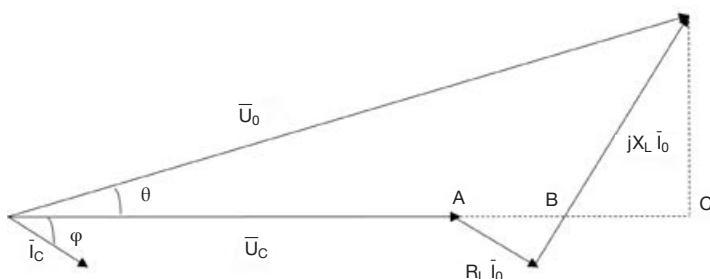
$$\eta = \frac{P_C}{P_0} = \frac{P_C}{P_C + P_L} \cdot 100 (\%) \quad (5.9)$$

3. Cálculo de la caída de tensión en una línea eléctrica

La caída de tensión en una línea eléctrica se determina como la diferencia entre los módulos de las tensiones en los extremos de la línea y generalmente se expresa como porcentaje de la tensión nominal:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_C}{U_{\text{nom}}} \cdot 100 (\%) \quad (5.10)$$

Figura 3. Diagrama fasorial del circuito equivalente del modelo de línea corta



Esta caída de tensión la podemos expresar en función de las características de la línea (longitud, material, sección), las características de la carga y la intensidad circulante, partiendo del diagrama fasorial del circuito equivalente del modelo de línea corta de la figura 3.

El valor del ángulo de desfase entre la tensión en el origen de la línea y la tensión al final en la carga, θ , es siempre un valor muy pequeño, como hemos visto en el ejemplo calculado en el epígrafe anterior. Se puede considerar que el valor del fasor \bar{U}_0 es igual al de su proyección sobre el eje horizontal, por lo que gráficamente la diferencia de tensión entre el origen y el final de la línea es:

$$\bar{U}_0 - \bar{U}_C \approx \overline{AB} + \overline{BC} = R_L I_C \cos \varphi + X_L I_C \sin \varphi \quad (5.11)$$

Donde se ha considerado que en el modelo de línea corta (ecuación 5.8) $\bar{I}_0 = \bar{I}_C$.

Considerando $R_L \gg X_L$ lo que es habitual en instalaciones de baja tensión, y la expresión de la resistencia en función de sus características, ecuación 5.1, se obtiene la siguiente expresión simplificada para la caída de tensión en la línea (ΔU):

$$\bar{U}_0 - \bar{U}_C = \Delta U = \rho \frac{1}{s} I_C \cos \varphi \quad (5.12)$$

Expresión que podemos particularizar para las líneas monofásicas y las trifásicas. En las líneas monofásicas, tanto de corriente continua como de alterna, hay que tener en cuenta la longitud de ida y retorno del conductor desde el origen de la instalación hasta la carga, por tanto, la longitud de la línea debe multiplicarse por 2. En las instalaciones trifásicas, solo es necesario un conductor por fase, por lo que la longitud seguirá siendo l , pero hay que tener en cuenta que tanto la tensión como la intensidad de la expresión 5.12 son magnitudes de fase. Si además expresamos la ecuación 5.12 respecto a la tensión nominal de la red, para obtener la caída de tensión relativa en tanto por ciento (ecuación 5.10), se tienen las siguientes expresiones:

- Línea monofásica:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{2l}{s} \quad (5.13)$$

- Línea trifásica:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{l}{s} \quad (5.14)$$

Donde $I_C = I$ para simplificar la notación y se expresa en amperios, U_{nom} es la tensión nominal de la línea en voltios, $\cos \varphi$ es el factor de potencia de la carga, ρ es el valor de la resistividad del material del conductor en $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$, l , la longitud del conductor en m y S , la sección del conductor en mm^2 .

EJEMPLO 2

Determinar la caída de tensión de una línea trifásica (tensión nominal 380 V) formada por un conductor de cobre de 10 mm² de sección y longitud 70 m, aislado con PVC, si consume una intensidad de 30 A, con un factor de potencia 0,8 inductivo.

Datos: $\rho_{Cu}(20^{\circ}\text{C}) = 0,017 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Según la expresión 5.14, suponiendo que la instalación trabaja a 20°C:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{1}{S} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 30 \cdot 0,8}{380} 0,017 \frac{70}{10} = 1,30 \%$$

4. Conductores y cables eléctricos

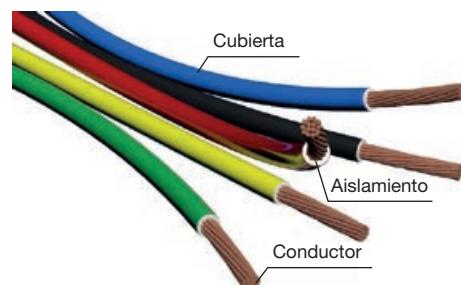
4.1. Características constructivas

De acuerdo con la definición de cable del REBT recogida en el primer epígrafe del capítulo, este se compone del conductor, el aislamiento y la protección o cubierta. En las instalaciones de baja tensión, el material que conduce la corriente suele ser cobre o aluminio. La ventaja del cobre respecto al aluminio es su mayor conductividad, es decir, menor resistividad. Por ejemplo, a una temperatura de 20°C, la resistividad del cobre es 0,017 Ωmm²/m y la del aluminio, 0,0282 Ωmm²/m. Como desventaja, el cobre es un material más caro que el aluminio, lo que incrementa el presupuesto de la instalación, sobre todo si las secciones de los conductores son considerables.

El conductor se aísla por protección constituyendo un conjunto que el REBT denomina *conductor aislado*, cuya definición en la normativa es «conjunto que incluye el conductor, su aislamiento y sus eventuales pantallas». Los materiales más empleados como aislante son el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno reticulado (XLPE) y la goma de etileno propileno (EPR). El aislamiento envuelve al conductor en toda su longitud y su misión principal es garantizar el correcto paso de la corriente por el conductor, separándolo de su entorno. El PVC es el aislante más empleado, aunque progresivamente está siendo sustituido por el XLPE, debido a que puede trabajar a temperaturas más elevadas.

La *cubierta del cable*, según el REBT, es un «revestimiento tubular continuo y uniforme de material metálico o no metálico generalmente extruido», cuya función principal es

Figura 4. Cables eléctricos y sus partes



la protección mecánica de los conductores aislados. Generalmente, se utilizan cubiertas de materiales poliméricos que pueden reforzarse mediante hilos metálicos, si se necesita una mayor proyección.

Es importante conocer el código de colores que rige la identificación de los conductores en las instalaciones de baja tensión:

- Marrón, negro y gris. Para conductores de fase.
- Azul claro. Para conductor neutro.
- Verde-amarillo. Para conductor de protección (tierra).

4.2. Parámetros característicos para la selección de cables

El primer parámetro característico que hay que tener en cuenta para la selección de un cable eléctrico es el valor de la *tensión asignada* del cable, denominada también tensión de aislamiento. Según la ITC-BT-01 del REBT «es la tensión máxima del sistema al que el cable puede estar conectado». Es decir, la tensión para la que el cable ha sido diseñado y probado sin disminuir sus características eléctricas. Esta tensión se representa mediante dos valores, donde el primero representa el valor eficaz de la tensión entre fase y tierra (o la envolvente metálica del cable) y el segundo, el valor eficaz de la tensión entre dos fases. En instalaciones de baja tensión hay dos sistemas de designación de cables en función de la tensión asignada, el de tensión asignada 450/750 V y el de tensión asignada 0,6/1kV. La *tensión de servicio* del cable se define como la tensión a la que está sometido en las condiciones de funcionamiento en una determinada instalación en un determinado momento. Esta tensión de servicio está limitada por normativa en función de la tensión asignada del cable y de las características de la instalación. En general, en instalaciones en las que el cable no está en contacto con el exterior es suficiente con una tensión asignada de 450/750 V, mientras que en instalaciones exteriores se requiere un nivel de tensión de aislamiento mínimo de 0,6/1 kV.

La designación de los cables de tensión asignada hasta 450/750 V se realiza siguiendo la norma general UNE 20434. Sistema de designación de los cables, y otras normas particulares para consulta (UNE 21031, UNE 21027, UNE 211002, UNE-EN 50214), cada una de ellas para unas tipologías de cables determinadas. El código de designación del cable está formado por un conjunto de letras y números, distribuidos en tres partes, que caracterizan completamente el tipo de cable, como se refleja en la tabla 1.

En la tabla 1 no se ha incluido toda la extensa codificación recogida en la norma UNE 20434 y el resto de las normas de instalaciones particulares, pero sí algunos elementos de codificación, por ejemplo:

- Un cable con la codificación H07V-R 1 × 50 mm² significa:

H es un cable según las normas armonizadas.

07 es la tensión asignada 450/750 V.

V es el aislamiento de PVC.

-R es el cable rígido circular de varios alambres cableados.

1 × 50 es el cable unipolar de 50 mm² de sección.

- Un cable con la codificación H07RN-K 3G6 significa:

H es un cable según las normas armonizadas.

07 es la tensión asignada 450/750 V.

R es el aislamiento de goma natural o goma de estireno butadieno.

N es la cubierta de policloropreno.

-K es el cable flexible de varios alambres finos para instalaciones fijas.

3G6 son tres conductores, uno de ellos de color verde-amarillo, de 6 mm² de sección.

Tabla 1. Designación de los cables eléctricos de tensión asignada hasta 450/750 V

Aspectos generales del cable	<ul style="list-style-type: none"> • 1.^a posición. Correspondencia con la normalización (por ejemplo, H: cable diseñado según las normas armonizado). • 2.^a posición. Tensión asignada (por ejemplo, 07: 450/750V).
Constitución del cable	<ul style="list-style-type: none"> • 3.^a posición. Tipo de aislamiento (por ejemplo, V: PVC, B: goma de etileno propileno, R: goma natural o goma de estireno butadieno...). • 4.^a posición. Revestimiento metálico (por ejemplo, C4: pantalla de cobre trenzado). • 5.^a posición. Cubierta y envolvente no metálica (por ejemplo, V: PVC, B: goma de etileno proileno, J: trenza de vidrio, N: policloropreno...). • 6.^a posición. Elementos especiales (por ejemplo, H: cables planos cuyos conductores aislados pueden separarse...). • 7.^a posición. Forma del conductor (por ejemplo, - R: cable rígido de sección circular de varios alambres cableados, - K: flexible de varios alambres finos para instalaciones fijas, - Y: rígido de sección circular de un solo alambre...)
Número y sección nominal de los conductores	<ul style="list-style-type: none"> • 8.^a posición. Número de conductores. • 9.^a posición. Conductor de protección (X: ausencia de conductor de protección, G: existencia de conductor de protección). • 10.^a posición. Sección nominal en mm².

Los cables de tensión asignada 0,6/1kV no se rigen por la norma general UNE 20434, sino que hay que consultar la norma particular correspondiente. Por ejemplo, hay que consultar la norma UNE 21030 para los conductores aislados, cableados en haz, de tensión

asignada 0,6/1 kV, para líneas de distribución, acometidas y usos análogos, o la norma UNE 21123 para cables eléctricos de utilización industrial de tensión asignada 0,6/1 kV (véase tabla 2).

Tabla 2. Designación de los cables eléctricos de tensión asignada 0,6/1 kV, según UNE 21030 y UNE 21123

UNE 21030	<ul style="list-style-type: none"> • 1.^a posición. Tipo constructivo (R: aislamiento de XLPE, Z: cableado en hélice visible). • 2.^a posición. Tensión asignada. • 3.^a posición. Número de conductores × sección nominal, material. • 4.^a posición. Sección del conductor neutro, material. Material (Al: conductores de aluminio, Alm: conductor neutro de aleación aluminio-magnesio-silicio (<i>almelec</i>)).
UNE 21123	<p>En general, aunque depende del tipo de cable designado en cada parte de la norma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1.^a posición. Tipo de cable, armadura, pantalla. • 2.^a posición. Tensión asignada. • 3.^a posición. Número de conductores × sección nominal. Separados por X en ausencia de conductor de protección o por G, cuando exista conductor de protección.

EJEMPLO 3

Indicar la nomenclatura del cable para una red de distribución de baja tensión, si debe ser de aluminio, con aislamiento de polietileno reticulado cableado en hélice, con tres conductores de sección 150 mm² y neutro de *almelec* de 95 mm² de sección.

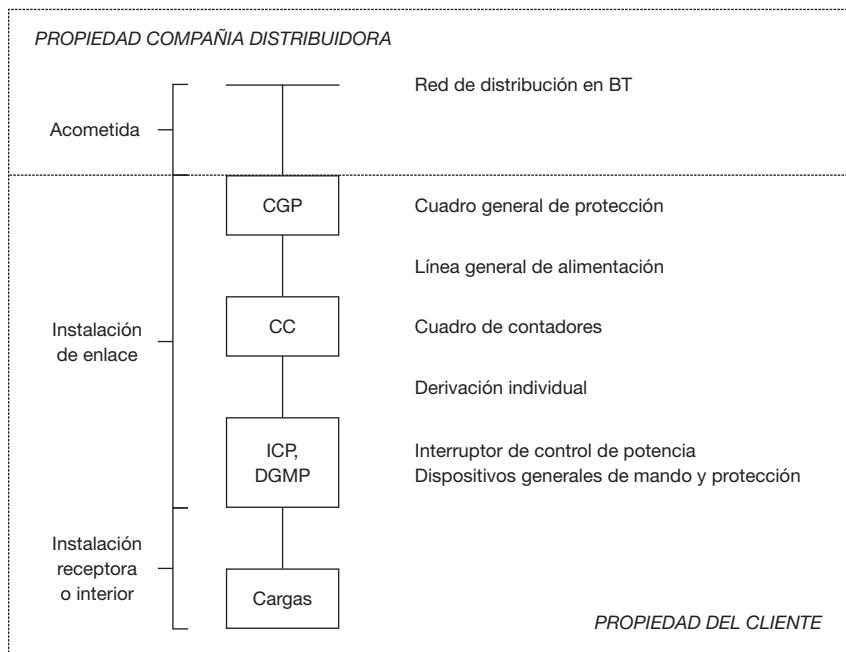
De acuerdo con la norma UNE 21030, la designación de cable será la siguiente:

RZ 0,6/1kV 3 × 150 Al/95 Alm

5. Cálculo de la sección de los conductores en instalaciones de baja tensión

Previamente al análisis de los criterios para el dimensionado de los conductores, es necesario conocer las partes de una instalación eléctrica de baja tensión, que son el tipo de instalaciones con las que vamos a trabajar en este manual. Estas instalaciones se dividen en tres partes diferenciadas (figura 5): la acometida, la instalación de enlace y la instalación receptora de usuario o instalación interior.

Figura 5. Esquema general de una instalación eléctrica de baja tensión



La *aemetida* de la instalación es propiedad de la compañía distribuidora y, según el REBT (ITC-BT-11), es la «parte de la instalación de la red de distribución que alimenta la caja o cajas generales de protección». Las aemetidas pueden ser líneas aéreas, subterráneas o mixtas, aplicando en su diseño la instrucción técnica complementaria del REBT correspondiente:

- ITC-BT-06: redes aéreas para distribución en baja tensión.
- ITC-BT-07: redes subterráneas para distribución en baja tensión.

La *instalación de enlace* ya pertenece al propietario del inmueble al que alimenta la instalación eléctrica, es la instalación que une la caja o cajas generales de protección alimentadas por la aemetida con la instalación receptora del usuario. Sus características y esquemas tipo se definen en la instrucción técnica ITC-BT-12 del REBT y, según esta norma, tiene las siguientes partes:

- Caja general de protección (CGP).
- Línea general de alimentación (LGA).
- Elementos para la ubicación de contadores (CC).

- Derivación individual (DI).
- Caja para interruptor de control de potencia (ICP).
- Dispositivos generales de mando y protección (DGMP).

Los principales elementos de protección frente a sobrecargas y cortocircuitos ubicados en la instalación de enlace los analizaremos en próximos capítulos.

La línea general de alimentación une la caja general de protección con los contadores o elementos de medida, en las instalaciones de un solo usuario en las que frecuentemente la caja general de protección está junto a los elementos de medida no se considera esta línea como tal. El interruptor de control de potencia y los dispositivos generales de mando y protección forman parte de la derivación individual que acomete a cada instalación de usuario.

En la tabla 3 se recogen las instrucciones técnicas complementarias del REBT que aplican en cada uno de estos elementos. La normativa general aplicable a las instalaciones interiores o receptoras se indicará en los siguientes epígrafes y capítulos.

Tabla 3. Instrucciones técnicas complementarias del REBT que aplican a las instalaciones de enlace

Elementos de la instalación de enlace	ITC del REBT
Caja general de protección (CGP)	ITC-BT-13
Línea general de alimentación (LGA)	ITC-BT-14
Elementos para la ubicación de contadores (CC)	ITC-BT-16
Derivación individual (DI)	ITC-BT-15
Caja para interruptor de control de potencia (ICP)	ITC-BT-17
Dispositivos generales de mando y protección (DGMP)	ITC-BT-17

El cálculo de las secciones de los conductores se realiza de forma que se asegura que la sección seleccionada cumple con las siguientes condiciones:

- Asegurar que la tensión de alimentación que llega a la carga es suficiente para su correcto funcionamiento.
- Garantizar que la intensidad máxima admisible que puede circular por el conductor no le produce deterioro por calentamiento.
- Proteger la línea frente a corrientes de cortocircuito en caso de fallo.

En este capítulo vamos a estudiar el dimensionado mediante los dos primeros criterios y en el capítulo 7 se analizará la protección de las instalaciones de baja tensión frente a cortocircuitos.

5.1. Criterio de la máxima caída de tensión admisible

En el dimensionado siguiendo el criterio de la máxima caída de tensión admisible, la sección del conductor debe ser tal que la mayor caída de tensión que se produzca en cualquier punto del circuito sea menor que el valor fijado para ese tipo de instalación por el REBT. Esta caída de tensión se calcula mediante las expresiones 5.13 y 5.14, expresándose en tanto por ciento respecto a la tensión nominal de la línea.

En la tabla 4 se recogen las caídas de tensión máximas admisibles en diferentes partes de la instalación, según el REBT (ITC-BT-14, ITC-BT-15 e ITC-BT-19).

Tabla 4. **Caídas de tensión máximas admisibles en el REBT (ITC-BT-14, ITC-BT-15 e ITC-BT-19)**

Instalación de alimentación	Instalación a la que se alimenta	Caída de tensión máxima admisible (% tensión nominal de la línea)
Línea general de alimentación	Contadores totalmente concentrados	0,5 %
	Centralizaciones parciales de contadores	1,0 %
Derivación individual	Suministros de un único usuario	1,5 %
	Contadores totalmente concentrados	1,0 %
	Centralizaciones parciales de contadores	0,5 %
Instalación receptora	Circuitos interiores de viviendas	3 %
	Circuitos de alumbrado (1)	3 %
	Circuitos de fuerza (1)	5 %
Transformador de usuario AT/BT en instalaciones industriales	Circuitos de alumbrado	4,5 %
	Resto de usos	6,5 %

(1) No pertenecientes a viviendas.

El criterio de la máxima caída de tensión admisible es el que suele condicionar el dimensionado en las líneas de mayor longitud.

5.2. Criterio de la máxima intensidad admisible

En el dimensionado siguiendo el criterio de la máxima intensidad admisible, la sección del conductor se selecciona para que pueda circular la máxima corriente prevista sin destrucción o deterioro de las características del cable y para que, en condiciones nominales de servicio, ningún punto del cable supere la temperatura admisible del cable. Esta temperatura, indicada en las especificaciones técnicas de los cables, suele ser 70°C para cables con aislamiento de PVC y 90°C para cables con aislamientos de XLPE o EPR.

La selección de la sección de los conductores siguiendo este criterio se realiza siguiendo las siguientes instrucciones técnicas complementarias del REBT:

- ITC-BT-06: redes aéreas para distribución en baja tensión.
- ITC-BT-07: redes subterráneas para distribución en baja tensión.
- ITC-BT-19: instalaciones interiores o receptoras.

En la tabla 5, tomada de la ITC-BT-19, se muestran las intensidades máximas admisibles para diferentes características de la instalación (tipo de instalación, agrupaciones de cables y aislamiento) para una temperatura de trabajo de 40°C y cables de cobre.

Esta tabla es la que se usa más frecuentemente en el diseño de instalaciones interiores, pero hay que tener en cuenta las condiciones para la que es válida, debiendo consultar la norma UNE-HD 60364-5-52:2014, que sustituye a la norma UNE 20460-5-523:2004 para otros supuestos.

Para trabajar con esta tabla se parte de las características constructivas de la instalación (tipo A, A2, B, B2, C, E, F y G) reflejadas en la primera columna y, siguiendo la fila correspondiente, se selecciona si el circuito es trifásico (3x) o monofásico (2x), así como el tipo de aislamiento del cable. En la parte inferior de esta columna se indica la intensidad máxima admisible que puede circular por el conductor (I_Z) para la sección del conductor, que deberá ser un valor superior a la intensidad circulante.

EJEMPLO 4

Indicar la máxima intensidad admisible en una instalación monofásica que tiene las siguientes características:

- Instalación sobre pared con cables multiconductores.
- Cables de cobre con aislamiento de PVC 0,6/1 kV y 4 mm² de sección.

Empleando la tabla de la ITC-BT-19 (tabla 5), considerando el tipo de instalación C (cables multiconductores instalados directamente sobre pared), aislamiento de PVC (2xPVC), tenemos que la intensidad máxima admisible para una sección de 4 mm² es $I_z = 30$ A.

Tabla 5. Intensidades admisibles (en A) al aire para una temperatura de 40°C

A		Conductores aislados en tubos empotados en paredes aislantes.		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR				
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes.	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
B		Conductores aislados en tubos (2) en montaje superficial o empotrados en obra.			3x PVC	2x PVC			3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
B2		Cables multiconductores en tubos (2) en montaje superficial o empotrados en obra.		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR		2x XLPE o EPR			
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared (3).				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
E		Cables multiconductores al aire libre (4). Distancia a la pared no inferior a 0.3D (5).				3x PVC		2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo (4). Distancia a la pared no inferior a D (5).					3x PVC			3x XLPE o EPR (1)		
G		cables unipolares separados mínimo D (5).							3x PVC (1)		3x XLPE o EPR	
Cobre	mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
	2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
	4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
	6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
	10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
	16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
	25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
	35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206
	50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
	70				149	160	171	188	202	224	244	321
	95				180	194	207	230	245	271	296	391
	120				208	225	240	267	284	314	348	455
	150				236	260	278	310	338	363	404	525
	185				268	297	317	354	386	415	464	601
	240				315	350	374	419	455	490	552	711
	300				360	404	423	484	524	565	640	821

(1) A partir de 25 mm² de sección.

(2) Incluyendo canales para instalaciones -canaletas- y conductos de sección no circular.

(3) O en bandeja no perforada.

(4) O en bandeja perforada.

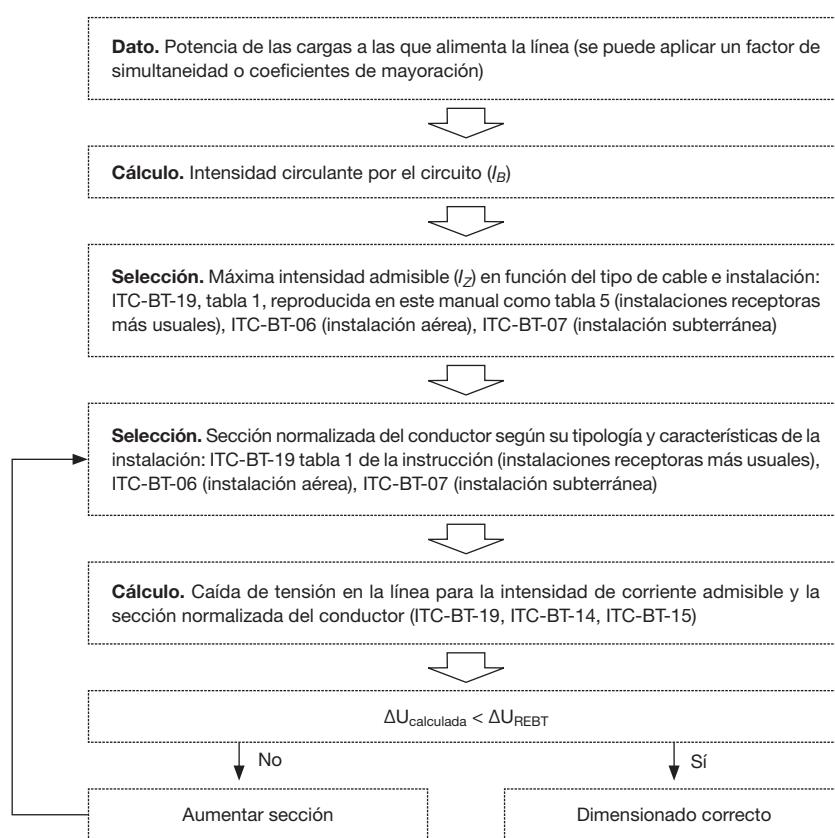
(5) D es el diámetro del cable.

Fuente: Tabla extraída de la ITC-BT-19 del REBT (Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto).

5.3. Metodología de cálculo

La metodología de cálculo a seguir para el dimensionado de las secciones de los conductores combina los criterios de la máxima caída de tensión admisible y de la máxima intensidad admisible, de acuerdo con el esquema indicado en la figura 6. Los datos de partida son la potencia y las características de las cargas a las que alimenta la instalación, monofásicas o trifásicas, a partir de las que se calcula la intensidad circulante por el cable o intensidad de diseño (I_B). En el diseño de instalaciones nuevas en las que la potencia de las cargas puede no ser conocida, se realiza una previsión de las cargas necesarias para el tipo de consumo siguiendo las instrucciones técnicas del REBT (ITC-BT-10). En este cálculo se pueden aplicar, a criterio del proyectista o con base en el REBT, factores de simultaneidad de uso de los equipos, por ejemplo, en edificios de viviendas, o coeficientes de mayoración para considerar fenómenos como la intensidad de arranque de los motores (ITC-BT-47) o en las lámparas de descarga (ITC-BT-44).

Figura 6. Metodología de cálculo empleando los criterios de la máxima intensidad admisible y la máxima caída de tensión admisible



Conceptos básicos

- Los modelos de líneas eléctricas analizan los efectos resistivos, inductivos y capacitivos, debidos a la circulación de corriente por las mismas y a la proximidad entre conductores, definiendo un modelo de circuito equivalente que caracteriza su comportamiento. El modelo más sencillo es el modelo simplificado de línea corta, que se emplea para calcular la caída de tensión en las líneas de baja tensión.
- Un cable eléctrico está formado por el conductor, generalmente de cobre o aluminio, por el que circula la corriente eléctrica, el aislante, que lo protege del entorno asegurando la correcta circulación de la corriente y la cubierta, que tiene como fin la protección mecánica del conjunto.
- La tensión máxima que puede soportar el cable es la tensión asignada. En las instalaciones de baja tensión se realiza la clasificación de los cables en función de este parámetro, existiendo normativa aplicable para valores de tensión asignada de 450/750 V y para valores de tensión asignada de 0,6/1kV.
- Una instalación eléctrica alimentada en baja tensión está formada por la línea de acogida, propiedad de la empresa distribuidora, la instalación de enlace, con los elementos de protección y medida necesarios y la instalación receptora, las dos últimas propiedad del usuario. El dimensionado de estas instalaciones se realiza siguiendo el REBT y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Existen dos criterios para el dimensionado de las líneas eléctricas de baja tensión, el que verifica que la caída de tensión entre dos puntos de la línea es inferior a la caída de tensión admisible indicada en el REBT para las características de la instalación correspondiente y el que determina la intensidad máxima admisible, que puede circular por el conductor para que no se degrade térmicamente, comprobando que la intensidad de diseño es inferior.

Actividades de autocomprobación

- 1 Una instalación trifásica de 380 V tiene que alimentar a una carga de 30 kW y factor de potencia 0,8 inductivo. Calcular la sección normalizada de la línea, sabiendo que su longitud es de 80 m y que la instalación debe realizarse con conductores de cobre aislados con polietileno reticulado (XLPE) empotrado en paredes aislantes.

Datos: $\rho_{Cu} (40^{\circ}\text{C}) = 0,018 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Solución

En primer lugar, calculamos la intensidad de línea sabiendo que:

$$P = \sqrt{3}U_{\text{línea}}I_{\text{línea}} \cos \varphi \Rightarrow I_{\text{línea}} = \frac{30.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 56,97 \text{ A}$$

Consultando la tabla de la instrucción técnica 19 del REBT (tabla 5 de nuestro manual), vemos que para un cable de cobre con aislamiento XLPE en una instalación tipo A, la intensidad máxima normalizada superior a 56,97 A es 66 A, que se corresponde con una sección mínima de 16 mm².

Comprobamos si esta sección cumple con el criterio de la caída de tensión:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{3}I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{1}{S} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 66 \cdot 0,8}{380} 0,018 \frac{80}{16} = 2,17 \% < 5 \%$$

Siendo 5% la caída de tensión máxima admisible que nos marca el REBT para instalaciones de fuerza, por lo que el dimensionado es correcto.

- 2** Una instalación monofásica de 220 V tiene que alimentar a una instalación receptora de otros usos de factor de potencia unidad. La instalación tiene una longitud de 25 m y debe realizarse con un cable bipolar de cobre y aislamiento de PVC (dos conductores juntos directamente sobre la pared) de 2,5 mm². ¿Cuál es la potencia máxima que debe soportar la instalación?

Datos: $\rho_{Cu}(40^{\circ}\text{C}) = 0,018 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.

Solución

Consultando la tabla de la instrucción técnica 19 del REBT (tabla 5 de nuestro manual), para la tipología de instalación C y una sección de 2,5 mm², se tiene una intensidad máxima admisible de 22 A.

Calculamos la intensidad máxima asociada al criterio de caída de tensión máxima y seleccionaremos la intensidad más restrictiva para el cálculo de la potencia. De acuerdo con el criterio de máxima tensión:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) < 5 \% \text{ (instalaciones receptoras de otros usos)}$$

$$\Delta U_{\text{máxima}} = 5 \% \cdot U_{\text{nom}} = 0,05 \cdot 220 = 11 \text{ V}$$

Empleando la ecuación 5.13:

$$I_{\max} = \frac{\Delta U_{\text{máxima}}}{\cos \varphi \rho \frac{2l}{S}} = \frac{11}{1 \cdot 0,018 \cdot \frac{2 \cdot 25}{2,5}} = 30,55 \text{ A}$$

Como es más restrictiva la intensidad obtenida por el criterio de máxima intensidad admisible, la potencia máxima que se puede instalar será:

$$S = U_{\text{nom}} \cdot I_{\max} = 220 \cdot 22 = 4.840 \text{ VA}$$

- 3** Consultando el REBT y aplicando los criterios de la máxima caída de tensión admisible y de la máxima intensidad admisible, determinar la sección de los conductores que alimentan a un motor trifásico (380 V) de un ascensor que tiene una potencia de 20 CV y un factor de potencia de 0,79. Se seleccionan conductores tripolares de cobre y aislamiento de PVC. La longitud del cable es de 15 m y se instala en tubos empotados en obra.

Datos:

- Según ITC-BT-47 «En los motores de ascensores, grúas y aparatos de elevación en general, tanto de corriente continua como de alterna, se computará como intensidad normal a plena carga la necesaria para elevar las cargas fijadas como normales a la velocidad de régimen, una vez pasado el periodo de arranque, multiplicada por el coeficiente 1,3».
- Se puede considerar una caída de tensión máxima del 1%.
- $\rho_{Cu} (40^{\circ}\text{C}) = 0,018 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.

Solución

Calculamos la intensidad que alimenta al motor del ascensor:

$$\begin{aligned} P &= 20 \text{ CV} \cdot 735,5 = 14.710 \text{ kW} = \sqrt{3} U_{\text{línea}} I_{\text{línea}} \cos \varphi \Rightarrow \\ &\Rightarrow I_{\text{línea}} = \frac{14.710}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,79} = 28,29 \text{ A} \end{aligned}$$

Intensidad que se debe mayorar según la ITC-BT-47 para obtener la intensidad de diseño:

$$I_B = 1,3 \cdot 28,29 = 36,77 \text{ A}$$

Consultando la tabla de la instrucción técnica 19 del REBT (tabla 5 de nuestro manual), para una instalación trifásica de conductores tripolares de cobre, aislamiento de PVC y tubos empotrados en obra (instalación tipo B2), la intensidad normalizada superior a 36,77 A es 40 A, que se corresponde con una sección de 10 mm².

Para estos datos se comprueba que cumple con el criterio de la caída de tensión:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{1}{S} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 40 \cdot 0,79}{380} 0,018 \frac{15}{10} = 0,39 \% < 1 \%$$

Luego, la instalación cumple ambos criterios.

- 4** Consultando el REBT y aplicando los criterios de la máxima caída de tensión admisible y de la máxima intensidad de corriente admisible, calcular la sección de la línea general de alimentación de un edificio de 16 viviendas y 2 locales comerciales cuya previsión de potencia es la que se indica en la siguiente tabla:

	Previsión potencia (kW)
Vivienda	5,5
Local comercial	5,75
Garaje común	12
Zonas comunes	17

La línea general de alimentación estará compuesta por conductores unipolares de cobre con aislamiento XLPE, instalados en un tubo empotrado en obra cuya longitud es de 10 m. Los contadores se instalarán totalmente centralizados.

Datos:

- Según ITC-BT-14 «La caída de tensión máxima permitida para líneas generales de alimentación destinadas a contadores totalmente centralizados será del 0,5 %».
- Tensión de alimentación = 380 V.
- Factor de potencia de la instalación = 0,9.
- ρ_{Cu} (40 °C) = 0,018 Ωmm²/m.

Solución

Calculamos la previsión de potencia de la línea:

$$P_{\text{total}} = 16 \cdot 5,5 + 2 \cdot 5,75 + 12 + 17 = 128,5 \text{ kW}$$

Como es una línea trifásica, la intensidad de corriente máxima de la línea será:

$$I_{\text{línea}} = \frac{128.500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 216,92 \text{ A}$$

La instalación se ejecutará con conductores unipolares de Cu y aislamiento XLPE en tubo empotrado en obra, por lo que según la ITC-BT-19 del REBT (tabla 5 de nuestro manual), es una instalación tipo B. Consultando en esa tabla, para la columna 3xXLPE, la intensidad máxima normalizada superior a la máxima de la línea es de 245 A, que se corresponde con una sección de 95 mm².

Comprobamos que esta sección cumple el criterio de la caída de tensión admisible:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{nom}}} (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} I \cos \varphi}{U_{\text{nom}}} \rho \frac{1}{S} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 245 \cdot 0,9}{380} \cdot 0,018 \frac{10}{95} = 0,19 \% < 0,5 \%$$

Que es inferior a la permitida por la ITC-BT-14, de acuerdo con el enunciado, luego, S = 95 mm².

5 Aplicando la instrucción técnica complementaria ITC-BT-07 del REBT, determinar la intensidad admisible para un conjunto de dos líneas de aluminio tetrapolares de aislamiento de PVC para 1 kV y 35 mm² de sección, si se instalan enterradas en tubos independientes de PVC, con una separación de 7 cm entre tubos, en arena seca a 20°C (resistividad arena seca 1,4 Km/W).

Solución

Según la tabla 4 de la ITC-BT-07, para cable tetrapolar de Al con aislamiento de PVC y sección 35 mm², la intensidad máxima admisible es de 120 A. Los valores de la tabla 4 son para las siguientes condiciones:

- T del terreno = 25°C.
- Profundidad de la instalación = 0,7 m.
- Resistividad térmica del terreno = 1 Km/W.
- Un solo cable en la zanja.

Para considerar las condiciones de la instalación del enunciado hay que aplicar los siguientes coeficientes de corrección (apartado 3.1.2.2 de la ITC-BT-07):

- Para una T de terreno 20 °C, k = 1,05 (tabla 6 de la ITC-BT-07).
- Para una resistividad térmica de 1,4 Km/W, k' = 0,89 (tabla 7 de la ITC-BT-07).

- Por instalar dos cables en la misma zanja a una distancia de 7 cm, $k'' = 0,85$ (tabla 8 de la ITC-BT-07).
- Por estar entubados los cables 0,8 (apartado 3.1.3 de la ITC-BT-07, cable tripolar (o tetrapolar en este caso) en un tubo).

Luego,

$$I_{\text{admisible}} = 120 \cdot 1,05 \cdot 0,89 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = 76,25 \text{ A}$$

Bibliografía

- Bayod Rújula, Á. (2008). *Fundamentos de sistemas eléctricos*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Guía de aplicación del Reglamento electrotécnico para baja tensión. (2003). Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Guirado Torres, R., Asensi Orosa, R., Jurado Melguizo, F. y Carpio Ibáñez, J. (2006). *Tecnología eléctrica*. McGraw-Hill.
- Mujal Rosas, R. (2002). *Cálculo de líneas y redes eléctricas*. Ediciones UPC.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. (REBT).

