

Cálculo de distribuidores de B.T. considerando su temperatura

Miguel Angel Rodríguez Pozueta, José Ramón Landeras Díaz, Fernando Mantilla Peñalba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética
E.T.S.I.I. y T., Universidad de Cantabria

Resumen. Se presenta un método para el cálculo de líneas de distribución de B.T. que considera tanto el efecto de la temperatura del cable sobre su resistividad como la caída de tensión por reactancia.

Para tener en cuenta la influencia de la temperatura se siguen las recomendaciones del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Se puede incluir el efecto de la temperatura sustituyendo, en el cálculo de la caída de tensión por resistencia, las longitudes reales L de los tramos de la línea por unas longitudes equivalentes L_{eq} , que se calculan utilizando el factor de temperatura.

En una carga distribuida, la caída de tensión por resistencia se analiza sustituyéndola por una carga concentrada colocada a una distancia $L_{ef}/2$ del punto inicial.

Se analizan los distribuidores alimentados por ambos extremos a igual tensión. Se muestra cómo calcular el reparto de corrientes por los tramos de la línea considerando los efectos de la reactancia y de la temperatura. También se indica la forma de determinar el punto de mínima tensión, incluso en el caso de que esté situado dentro de un tramo con carga distribuida.

Se ha implementado este método en un software y se muestra un ejemplo de utilización.

Palabras llave

Redes de distribución, baja tensión, resistividad, temperatura.

1. Introducción

El método clásico de cálculo de la caída de tensión en redes de distribución en B.T. a base de cables aislados sólo tiene en cuenta el efecto de su resistividad, la cual se la supone constante e invariable con la carga. Con estas suposiciones, se puede aplicar la conocida fórmula de los momentos eléctricos ([1], [2], [6]) para obtener la caída de tensión o para determinar la sección de un cable según el criterio de la caída de tensión.

Tradicionalmente estos cálculos se han realizado empleando el valor de la resistividad del material conductor del cable a 20°C. Pero la resistividad de un conductor varía con la temperatura, y ésta, a su vez, varía con la corriente que lo recorre. Por lo tanto, esta forma de operar puede dar lugar a subestimar la caída de tensión y seleccionar secciones excesivamente pequeñas. Por esta

razón la “Guía Técnica de Aplicación del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión” [7] -que denominaremos simplemente “Guía” a partir de este momento-recomienda utilizar en los cálculos la resistividad $\rho_{máx}$ a la temperatura máxima que aguanta el cable. En este caso, se puede pecar de pesimismo y escoger un cable con una sección innecesariamente grande.

Si se desea realizar un cálculo más preciso, la Guía da un método bastante aproximado de determinación de la temperatura a la que se encuentra un cable para, a partir de ella, obtener su resistividad.

En un trabajo previo [12] se comprobó que si se quiere aumentar la precisión del cálculo de la caída de tensión considerando la temperatura del cable, no tiene sentido el despreciar su reactancia. Por lo tanto, aquí se tendrán en cuenta tanto el efecto de la temperatura sobre la resistividad ρ de los cables, como la caída de tensión debida a la reactancia de los mismos.

Para ello se tendrá presente que la reactancia por unidad de longitud x varía poco de un cable a otro, especialmente para secciones elevadas, que son donde el efecto de la reactancia es más importante.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad se puede incluir en los cálculos mediante el factor de temperatura k_θ (ver [12]).

Basándose en estas premisas los autores en el presente artículo proponen un método de análisis de las caídas de tensión en una red de distribución considerando los efectos de la temperatura y de la reactancia.

Este método está basado en calcular la caída de tensión por resistencia suponiendo que la resistividad del cable es constante e igual a $\rho_{máx}$, pero sustituyendo la longitud real de cada tramo de la red por una longitud equivalente. De esta manera se puede seguir aplicando la fórmula de los momentos eléctricos.

Además, en este artículo se presenta un software (un libro de cálculo Excel[®]) que los autores han desarrollado para implementar este método y se muestra un ejemplo de aplicación.

2. Influencia de la temperatura sobre la resistividad

Llamaremos $\theta_{\text{máx}}$ a la temperatura máxima que aguanta un cable, la cual se producirá cuando circula por él la corriente $I_{\text{máx}}$ si la temperatura ambiente es θ_0 . Las resistividades a estas dos temperaturas son $\rho_{\text{máx}}$ y ρ_0 , respectivamente.

Cuando el cable está recorrido por la corriente I se encuentra a la temperatura θ y tiene la resistividad ρ . En estas condiciones, definimos el factor de temperatura ([12]) como la siguiente relación

$$k_{\theta} = \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}} \quad (1)$$

La Guía establece que el incremento de temperatura de un cable con respecto a la ambiente es proporcional al cuadrado de la corriente que lo recorre. De ahí hemos deducido esta expresión:

$$k_{\theta} = k_{\theta_0} + (1 - k_{\theta_0}) \cdot \left(\frac{I}{I_{\text{máx}}} \right)^2 \quad (2)$$

donde k_{θ_0} es el factor de temperatura a la temperatura ambiente θ_0 ; es decir, cuando no circula intensidad por el cable (columna de corriente nula en la tabla I).

Como los coeficientes de variación de la resistividad con la temperatura del cobre y del aluminio son prácticamente iguales, se pueden usar los mismos valores de k_{θ} para ambos materiales (Tabla I). Nótese en la tabla I que el menor valor posible para k_{θ} es 0,8.

TABLA I. – Factor de temperatura

θ_0	$\theta_{\text{máx}}$	$I/I_{\text{máx}}$																
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1		
25°C	70°C	0,853	0,855	0,859	0,866	0,877	0,890	0,906	0,915	0,925	0,936	0,947	0,959	0,972	0,986	1		
	90°C	0,801	0,803	0,809	0,819	0,833	0,851	0,873	0,885	0,898	0,913	0,928	0,945	0,962	0,981	1		
40°C	70°C	0,902	0,903	0,906	0,911	0,918	0,927	0,937	0,943	0,950	0,957	0,965	0,973	0,981	0,990	1		
	90°C	0,847	0,848	0,853	0,861	0,871	0,885	0,902	0,912	0,922	0,933	0,945	0,957	0,971	0,985	1		

3. Definiciones, convenios y relaciones básicas

Nudo de una línea es un punto de la misma donde se da, al menos, una de estas circunstancias:

- se alimenta a la línea.
- la línea se ramifica, es decir, se conecta una línea derivada.
- se conecta una carga concentrada.
- se inicia o termina una carga uniformemente distribuida.

El origen de la línea es el nudo por donde se la alimenta. En el caso de línea alimentada por ambos extremos es uno de los dos nudos por donde se la alimenta y respecto al cual se miden las distancias L_j a los demás nudos. Los

nudos se numeran de forma consecutiva a medida que aumenta su distancia con respecto al origen. El origen, por lo tanto, es siempre el nudo 1 y el otro nudo de alimentación, si existe, es el nudo final de la línea (nudo n en la Fig. 1).

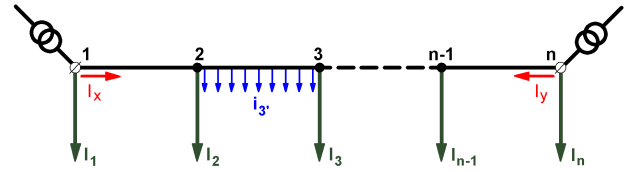


Fig. 1: Distribuidor alimentado por ambos extremos

Tramo de una línea es una zona de la misma situada entre dos nudos consecutivos. Por lo tanto, o bien por un tramo circula la misma corriente en toda su longitud, o bien existe una carga uniformemente distribuida.

En la Fig. 2 se representa el tramo de una línea comprendido entre los nudos $j-1$ y j , el cual incluye una carga uniformemente distribuida con una densidad lineal de corriente i_j' . En esta figura se muestran la nomenclatura y los convenios de signos para las corrientes que se van a utilizar en este trabajo.

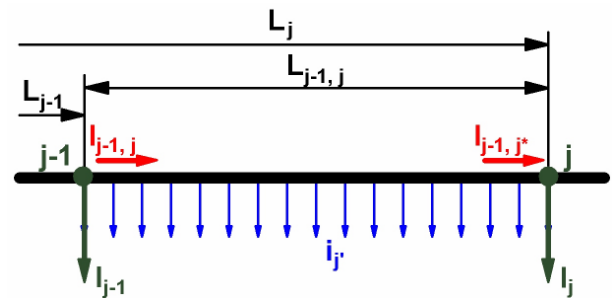


Fig. 2: Tramo de una línea con carga distribuida

Nótese que se verificará lo siguiente:

$$\bar{I}_{j-1,j} = \bar{I}_{j-1,j*} + (L_{j-1,j} \cdot \bar{i}_j') \quad (3)$$

Lo que en el caso de tramos sin cargas distribuidas se convierte en

$$\bar{I}_{j-1,j} = \bar{I}_{j-1,j*} \quad (4)$$

La caída de tensión e a lo largo de una línea se puede calcular con bastante precisión como suma aritmética de la caída de tensión por resistencia e_R y por reactancia e_X :

$$e = e_R + e_X \quad (5)$$

Si consideramos una línea alimentada por un extremo y sin cargas distribuidas, se tiene que:

$$\begin{aligned} e_R &= \frac{K_F \cdot \rho}{S} \cdot \sum_j L_{j-1,j} \cdot I_{j-1,j} = \\ &= \frac{K_F \cdot \rho}{S} \cdot \sum_j L_j \cdot I_{j,a} \end{aligned} \quad (6)$$

$$e_X = K_F \cdot x \cdot \sum_j L_{j-1,j} \cdot I_{j-1,jr} =$$

$$= K_F \cdot x \cdot \sum_j L_j \cdot I_{jr} \quad (7)$$

donde el coeficiente K_F vale 2 en líneas monofásicas y $\sqrt{3}$ en líneas trifásicas y los sumatorios se aplican a todos los tramos o a todos los nudos de la línea, respectivamente. Por otra parte, el subíndice “a” indica la componente activa de una corriente ($I \cos \phi$) y el subíndice “r” su componente reactiva ($I \sin \phi$).

El último término de la expresión (6) es formalmente análogo a la ley de los momentos de la mecánica. Por esta razón, esta relación es conocida como de los momentos eléctricos ([1], [6]).

4. Longitudes equivalentes y efectivas

Sigamos considerando, de momento, líneas alimentadas por un solo extremo y sin cargas distribuidas. Examinando las relaciones (1) y (6) nos percatamos de que el cálculo de la caída de tensión por resistencia, e_R , se puede realizar suponiendo que la resistividad es la misma en todos los tramos de la línea y de valor $\rho_{\max}$, si se sustituyen las longitudes reales $L_{j-1,j}$ de cada tramo de la línea por otras equivalentes $L_{eq\ j-1,j}$:

$$L_{eq\ j-1,j} = k_{\theta\ j-1,j} \cdot L_{j-1,j} \quad (8)$$

donde el factor de temperatura del tramo $k_{\theta\ j-1,j}$ se calcula mediante la expresión (2) (o la Tabla I) en la que se da a la corriente I el valor de $I_{j-1,j}$.

Por lo tanto la distancia equivalente $L_{eq\ j}$ desde el origen 1 hasta el nudo j vale:

$$L_{eq\ j} = \sum_{h=2}^j L_{eq\ h-1,h} \quad (9)$$

Luego, utilizaremos esta expresión para el cálculo de e_R :

$$e_R = \frac{K_F \cdot \rho_{\max}}{S} \cdot \sum_j L_{eq\ j-1,j} \cdot I_{j-1,ja} =$$

$$= \frac{K_F \cdot \rho_{\max}}{S} \cdot \sum_j L_{eq\ j} \cdot I_{ja} \quad (10)$$

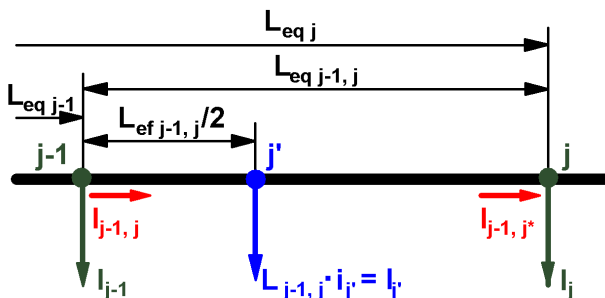


Fig. 3: Tramo equivalente al de la Fig. 2 para e_R

La caída de tensión resistiva e_R en el caso de líneas alimentadas por un extremo que tienen tramos con cargas distribuidas se puede calcular como si tuviera sólo cargas concentradas. Para ello un tramo con carga distribuida, como el de la Fig. 2, se sustituye por otro equivalente con cargas concentradas como el representado en la Fig. 3. De esta manera es posible seguir empleando la expresión (10) en estas líneas.

La longitud equivalente $L_{eq\ j-1,j}$ de la Fig. 3 se determina ahora también por la expresión (8), si en ella se introduce el factor de temperatura equivalente $k_{\theta\ eq\ j-1,j}$. Este factor se obtiene mediante (2) o la Tabla I empleando ahora la intensidad equivalente $I_{eq\ j-1,j}$ que se calcula así:

$$I_{eq\ j-1,j}^2 = \frac{I_{j-1,j}^2 + I_{j-1,j*}^2}{2} - \frac{(i_{j'} \cdot L_{j-1,j})^2}{6} =$$

$$= I_{j-1,j}^2 - \frac{J_{j-1,j}}{2} L_{j-1,j} + \frac{(i_{j'} \cdot L_{j-1,j})^2}{3} \quad (11)$$

donde el término $J_{j-1,j}$ es

$$J_{j-1,j} = 2 (I_{j-1,ja} \cdot i_{j'a} + I_{j-1,jr} \cdot i_{j' r}) \quad (12)$$

Análogamente, la longitud efectiva $L_{ef\ j-1,j}$ de la Fig. 3 se determina ahora por la expresión (13). En ella el factor de temperatura efectivo $k_{\theta\ ef\ j-1,j}$ se obtiene mediante la relación (2) o la Tabla I empleando la intensidad efectiva $I_{ef\ j-1,j}$ que se calcula con la expresión (14).

$$L_{ef\ j-1,j} = k_{\theta\ ef\ j-1,j} \cdot L_{j-1,j} \quad (13)$$

$$I_{ef\ j-1,j}^2 = \frac{2 I_{j-1,j}^2 + I_{j-1,j*}^2}{3} - \frac{(i_{j'} \cdot L_{j-1,j})^2}{6} =$$

$$= I_{j-1,j}^2 - \frac{J_{j-1,j}}{3} L_{j-1,j} + \frac{(i_{j'} \cdot L_{j-1,j})^2}{6} \quad (14)$$

Nótese que estas longitudes equivalentes y efectivas se utilizan para la obtención de la caída de tensión por resistencia e_R . La caída de tensión por reactancia e_X se sigue calculando mediante la relación (7) en la que se emplean las longitudes reales de la línea.

5. Distribuidores en anillo o alimentados por ambos extremos a igual tensión

Estos dos casos se analizan de igual manera, pues un anillo se puede abrir por el nudo de alimentación y considerarlo como una línea alimentada por ambos extremos a igual tensión ([1], [6]).

Es sabido que en este caso lo primero es determinar el reparto de corrientes en los tramos de la línea, lo cual requiere el conocer las corrientes en sus tramos extremos, $\bar{I}_x (= \bar{I}_{1,2})$ e $\bar{I}_y (= -\bar{I}_{n-1,n})$ (ver la Fig. 1). Si la resistividad de la línea fuera la misma en todos sus tramos sabemos ([1], [6]) que se cumple que:

$$I_{y a} = \frac{\sum_j L_j \cdot I_{j a}}{L} = \frac{\sum_j L_{j-1,j} \cdot I_{j-1,j a}}{L} \quad (15)$$

$$I_{x a} = \left(\sum_j I_{j a} \right) - I_{y a} \quad (16)$$

$$I_{y r} = \frac{\sum_j L_j \cdot I_{j r}}{L} = \frac{\sum_j L_{j-1,j} \cdot I_{j-1,j r}}{L} \quad (17)$$

$$I_{x r} = \left(\sum_j I_{j r} \right) - I_{y r} \quad (18)$$

donde L es la longitud total de la línea.

Si se tiene en cuenta el efecto de la temperatura sobre la resistividad se debe sustituir la relación (15) por:

$$I_{y a} = \frac{\sum_j L_{eq j} \cdot I_{j a}}{L_{eq}} = \frac{\sum_j L_{eq j-1,j} \cdot I_{j-1,j a}}{L_{eq}} \quad (19)$$

Las longitudes equivalentes y efectivas de cada tramo dependen de la corriente que circula por dicho tramo. Esto indica que la determinación del reparto de corrientes utilizando la fórmula (19) requeriría, en principio, de un proceso iterativo.

En realidad, el reparto de corrientes en la línea apenas cambia al considerar el efecto de la temperatura. En consecuencia, se utilizará, salvo en casos excepcionales, el reparto de corrientes obtenido considerando la resistividad constante mediante las relaciones (15) a (18) y no se realizarán iteraciones.

Seguidamente se determina el nudo de mínima tensión k (o de máxima caída de tensión total). Para ello se sustituyen las cargas distribuidas por sus equivalentes concentradas (Fig. 3) y se obtienen los puntos kR de máxima caída de tensión resistiva y kX de máxima caída de tensión por reactancia.

El nudo de máxima caída de tensión resistiva kR es aquel donde las componentes activas de las corrientes de tramo cambian de signo:

$$I_{kR-1,kR a} \geq 0 ; I_{kR,kR+1 a} \leq 0 \quad (20)$$

Análogamente, el nudo de máxima caída de tensión reactiva kX es aquel donde las componentes reactivas de las corrientes de tramo cambian de signo:

$$I_{kX-1,kX r} \geq 0 ; I_{kX,kX+1 r} \leq 0 \quad (21)$$

Normalmente ambos nudos, kR y kX , son el mismo y éste será el nudo de mínima tensión total k . En el caso de que los nudos kR y kX no coincidieran, normalmente el

nudo de mínima tensión k coincidirá con el de máxima caída de tensión resistiva kR .

En los pocos casos en los que los nudos kR y kX no coinciden y la corriente activa en el tramo o tramos entre kR y kX es notablemente inferior a su componente reactiva, pudiera suceder que el nudo de mínima tensión k no coincidiera con el nudo kR (sobre todo en líneas de sección grande). En este caso, habrá que calcular el coeficiente de impedancia o de refuerzo $k_{Z j-1,j}$ (ver [1] y [12]) en cada uno de los tramos comprendidos entre los nudos kR y kX :

$$k_{Z j-1,j} = 1 + \frac{x}{\rho} S \operatorname{tg} \varphi_{j-1,j} \quad (22)$$

El nudo k de mínima tensión será aquel en el que se verifique que:

$$I_{k-1,k a} \cdot k_{Z k-1,k} \geq 0 ; I_{k,k+1 a} \cdot k_{Z k,k+1} \leq 0 \quad (23)$$

El punto de mínima tensión g coincidirá con el nudo de mínima tensión k , a no ser que este nudo k se refiera a una carga concentrada equivalente a una carga uniformemente distribuida (Fig. 3). En este caso, el punto de mínima tensión está situado en el interior de un tramo de carga distribuida. Llamemos ahora k al nudo de comienzo de esta carga distribuida y $k+1$ a su nudo final (Fig. 4). La distancia del punto de mínima tensión g al nudo k inicial del tramo es ℓ ($\ell = L_{kg}$).

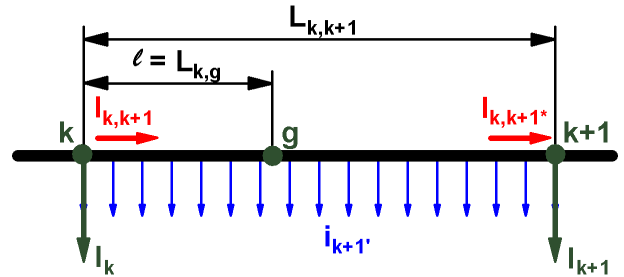


Fig. 4: Punto de mínima tensión g en una carga distribuida

En el supuesto de que la resistividad en este tramo fuera constante e igual a $\rho_{m\acute{a}x}$, la distancia ℓ se calcula así:

$$\ell = \frac{I_{k,k+1 a} + \frac{x \cdot S}{\rho_{m\acute{a}x}} I_{k,k+1 r}}{i_{k+1' a} + \frac{x \cdot S}{\rho_{m\acute{a}x}} i_{k+1' r}} \quad (24)$$

Si se considera la variación de la resistividad con la temperatura, se obtiene esta primera relación:

$$\ell = \frac{I_{k,k+1 a} + \frac{x \cdot S}{\rho_{m\acute{a}x} k_{\theta eq \ell}} I_{k,k+1 r}}{i_{k+1' a} \left(2 - \frac{k_{\theta ef \ell}}{k_{\theta eq \ell}} \right) + \frac{x \cdot S}{\rho_{m\acute{a}x} k_{\theta eq \ell}} i_{k+1' r}} \quad (25)$$

donde $k_{\theta_{eq} \ell}$ y $k_{\theta_{ef} \ell}$ son los factores de temperatura equivalente y efectivo no de todo el tramo de carga distribuida entre k y $k+1$, sino sólo del trozo de longitud ℓ (tramo entre k y g) y se obtienen mediante las relaciones (2), (11), (12), (13) y (14). Por lo tanto, la aplicación de la expresión (24) exigiría un proceso iterativo en el que con un valor inicial la longitud ℓ se determinan los valores de $k_{\theta_{eq} \ell}$ y $k_{\theta_{ef} \ell}$. Con estos valores y la relación (25) se calcula un nuevo valor de ℓ . Con esta longitud ℓ se calculan unos nuevos valores para $k_{\theta_{eq} \ell}$ y $k_{\theta_{ef} \ell}$, y así sucesivamente.

En realidad, basta con utilizar en la relación (25) los valores de $k_{\theta_{eq} \ell}$ y $k_{\theta_{ef} \ell}$ correspondientes a la longitud ℓ obtenida como primera aproximación mediante (24). Este resultado es suficientemente preciso y no se necesitan realizar iteraciones.

En la expresión (25) no se ha tenido en cuenta la variación de $k_{\theta_{eq} \ell}$ y $k_{\theta_{ef} \ell}$ con ℓ . Si se quiere tener en cuenta esta variación se debe utilizar la expresión (26), mucho más complicada.

$$\ell = \frac{1}{\left(2 - \frac{k_{\theta_{ef} \ell}}{k_{\theta_{eq} \ell}}\right) i_{k+1' a} + \frac{x \cdot S}{\rho_{\max} k_{\theta_{eq} \ell}} i_{k+1' r}} \times \left[\left(I_{k,k+1 a} + \frac{x \cdot S}{\rho_{\max} k_{\theta_{eq} \ell}} I_{k,k+1 r} \right) + \frac{I_{k,k+1 a}}{k_{\theta_{eq} \ell}} \frac{1 - k_{\theta 0}}{I_{\max}^2} \left(\frac{2}{3} (i_{k+1' a} \cdot \ell)^2 - \frac{J_{k,k+1}}{2} \ell \right) - \frac{i_{k+1' a}}{k_{\theta_{eq} \ell}} \frac{1 - k_{\theta 0}}{I_{\max}^2} \left(\left(\frac{i_{k+1' a}^2 \cdot \ell^3}{2} \right) - \frac{J_{k,k+1}}{3} \ell^2 \right) \right] \quad (26)$$

Para aplicar la expresión (26) se seguiría un proceso iterativo similar al indicado anteriormente.

El error cometido al emplear la expresión (25) en lugar de la (26) es muy pequeño. Por lo tanto, no tiene sentido la utilización de la relación (26), con su correspondiente proceso iterativo, salvo que se trate de un cálculo mediante un programa informático.

La caída de tensión resistiva hasta el punto g , de mínima tensión, se puede calcular mediante la fórmula (6) si se corta idealmente la línea por el punto de máxima caída de tensión resistiva gR . De forma análoga, la caída de tensión reactiva hasta el punto g se calcula mediante la relación (7), cortando idealmente la línea por el punto de máxima caída de tensión inductiva gX .

6. Cálculo de la sección de un distribuidor

Es sabido que cálculo de la sección de un cable de B.T. se realiza de forma que cumpla estos tres criterios:

- El criterio térmico o de calentamiento: La sección del cable debe ser lo suficientemente grande como para evitar que alcance temperaturas peligrosas, las cuales son debidas al calentamiento que producen las corrientes que circulan por él.
- El criterio de caída de tensión: La sección de un cable debe ser lo suficientemente grande como para que la caída de tensión no supere la máxima admisible e_{adm} que señalen el REBT y las normas.
- El criterio de la corriente de cortocircuito: La sección de un cable debe ser tal que cuando se produzca un cortocircuito sea capaz de soportar, durante el tiempo que tardan en actuar las protecciones, la elevada corriente que va a circular por él. Este criterio no suele ser determinante en instalaciones de B.T.

A continuación se muestra un método para encontrar la sección de una línea de una red de distribución de acuerdo con los criterios térmico y de caída de tensión. En él se tendrán en consideración la variación de la resistividad con la temperatura y la caída de tensión en la reactancia de la línea. Posteriormente habrá que realizar una comprobación final de que la sección obtenida cumple también con el criterio de la corriente de cortocircuito.

Distinguiremos varios valores de sección del conductor:

- S'' es la sección que da lugar a la caída de tensión e_{adm} si la resistividad es $\rho_{\max}$ y se tiene en cuenta la caída de tensión reactiva e_x .
- S_- es la sección normalizada inmediatamente inferior a S'' .
- S_+ es la sección normalizada inmediatamente superior a S'' .
- S_θ es la menor sección normalizada que soporta las corrientes que van a circular por el cable de acuerdo con el criterio térmico.
- S es la sección del cable que finalmente se utilizará.

El método propuesto comienza realizando un cálculo preliminar de la sección, utilizando una resistividad constante e igual a $\rho_{\max}$ y teniendo en cuenta la reactancia del cable. Para los parámetros $\rho_{\max}$ y x se utilizarán unos valores promedio (donde $x = 0,086 \Omega/\text{km}$, según [12]) válidos para todas las secciones. Mediante este cálculo preliminar se determinan las secciones S_θ y S'' .

Como se trata de un cálculo preliminar, no es necesario conseguir una gran precisión. Por este motivo, en el caso de necesitar utilizar las expresiones (22) o (24) -dado que el efecto de la reactancia es menor que el de la resistencia- se introducirá un valor orientativo de la sección igual a S_θ .

Si la sección S_θ es mayor que S'' , es más exigente el criterio térmico y se elegirá la sección S_θ . En caso contrario es más exigente el criterio de caída de tensión y habrá que decidir entre utilizar la sección S_- o la sección S_+ .

Para ello, en principio, habrá que realizar el cálculo de la caída de tensión que se produce cuando la sección es S_- y se consideran tanto los efectos de la temperatura como los de la reactancia. Para este cálculo preciso es mejor utilizar, si se conocen, los valores de los parámetros $\rho_{\text{máx}}$ y x del cable de sección S_- . Si esta caída de tensión es inferior a la admisible, se puede utilizar la sección S_- . En caso contrario, habrá que elegir la sección S_+ .

Ahora bien, muchas veces no será necesario realizar todo el proceso de cálculo de la caída de tensión para S_- . En efecto, unas comprobaciones previas (27) pueden bastar para decidir qué sección hay que usar:

$$S_- / S'' \leq 0,8 \rightarrow S = S_+ \quad (27a)$$

$$S_- / S \leq k_{\theta 0} \rightarrow S = S_+ \quad (27b)$$

$$S_- / S \leq k_{\theta \text{ menor}} \rightarrow S = S_+ \quad (27c)$$

$$S_- / S \geq k_{\theta \text{ menor}} \rightarrow S = S_- \quad (27d)$$

0,8 es el mínimo valor posible para k_{θ} (Tabla I). $k_{\theta \text{ menor}}$ y $k_{\theta \text{ mayor}}$ son los factores de temperatura obtenidos introduciendo en la relación (2) o en la tabla I las corrientes de tramo de menor y mayor valor eficaz, respectivamente.

Las comprobaciones (27) se irán realizando de forma sucesiva. Si se cumple una de ellas se interrumpe el cálculo y se adopta el valor de sección correspondiente a dicha comprobación.

Los autores han preparado un libro de cálculo Excel[®] que desarrolla todo este proceso de cálculo. Este libro de cálculo se ha denominado CALIN (CALculo de LINEas) y consta de varias hojas interrelacionadas. CALIN sirve para calcular distribuidores cuyas líneas no tengan más de 30 nudos. Está disponible de forma gratuita en la Web del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria (<http://saturno.diee.unican.es/>).

7. Ejemplo de aplicación

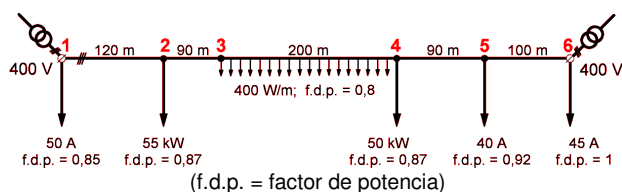


Fig. 5: Distribuidor a calcular

Seguidamente se va a calcular la sección de la línea trifásica de la Fig. 5, de tal forma que la caída de tensión máxima no supere el 3% ($e_{\text{adm}} = 3\% \cdot 400 = 12 \text{ V}$).

En esta instalación se utilizarán tres cables unipolares de cobre, aislados con polietileno reticulado (XLPE). Los cables se instalarán al aire en galerías ventiladas. No se colocarán otros cables en las proximidades, se instalarán de forma que exista una eficaz renovación del aire y la temperatura ambiente no superará los 40°C.

Dado que el XLPE admite una temperatura máxima de 90°C, se empleará, de momento, un valor de $\rho_{\text{máx}}$ igual a 0,024 $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ([12]). Para x se utilizará un valor de 0,086 Ω/km .

A. Determinación de la sección S_{θ}

Las corrientes en los nudos de la línea son:

Tabla II: Corrientes en los nudos de la línea

	I_1 (A)	I_2 (A)	i_4 (A/m)	I_4 (A)	I_5 (A)	I_6 (A)
$I \cos \phi$	42,5	79,4	0,577	72,2	36,8	45
$I \sin \phi$	14,8	45,0	0,433	40,9	15,7	0
Valor eficaz	45	91,2	0,722	83	40	45

Se sustituye la carga distribuida del tramo 3-4 por una concentrada equivalente (Fig. 6).

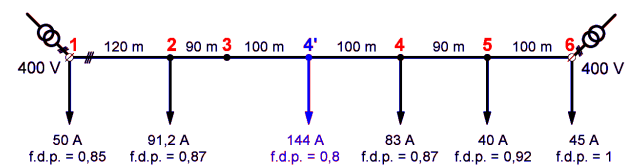


Fig. 6: Línea equivalente a la de la Fig. 5

Las cargas en los nudos extremos 1 y 6 no intervienen en el cálculo, pues se consideran fuera de la línea 1-6. Aplicando las relaciones (15) a (18) se obtiene el reparto de corrientes en la línea indicado en la tabla III.

Tabla III: Reparto de corrientes en los tramos de la línea

Fig. 5:	$I_{1,2}=I_x$	$I_{2,3}$	$I_{3,4}$	$I_{3,4'}$	$I_{4,5}$	$I_{5,6}=-I_y$
Fig. 6:	$I_{1,2}=I_x$	$I_{2,3}$	$I_{3,4'}$	$I_{4',4}$	$I_{4,5}$	$I_{5,6}=-I_y$
$I \cos \phi$	148	68,9	68,9	-46,5	-119	-156
$I \sin \phi$	93,4	48,4	48,4	-38,2	-79,1	-94,8
Valor eficaz	175	84,2	84,2	60,2	143	182

La mayor corriente de tramo vale 182 A y se da en el tramo 5-6. Consultando la tabla 12 de la ITC-BT-07 [8], se obtiene que la mínima sección normalizada que soporta esta corriente es 70 mm^2 (que aguanta hasta 230 A). Luego:

$$S_{\theta} = 70 \text{ mm}^2$$

B. Determinación de la sección S''

Observando la Tabla III se advierte que, tanto las componentes activas como reactivas de las corrientes de tramo, cambian de signo en el nudo 4' de la Fig. 6. Como este nudo representa una carga distribuida, esto significa que el punto de mínima tensión g está en el tramo 3-4 de la línea real (Fig. 5).

La distancia ℓ desde el nudo 3 al punto g de mínima tensión se calcula ahora mediante la expresión (24). Como todavía no se conoce la sección de la línea y, por otra parte, en la expresión (24) el efecto de la reactancia x es pequeño frente al de la resistividad, utilizaremos el valor de S_{θ} ($= 70 \text{ mm}^2$) en esta expresión:

$$\ell = \frac{68,9 + \frac{0,086 / 1000 \cdot 70}{0,024} 48,4}{0,577 + \frac{0,086 / 1000 \cdot 70}{0,024} 0,433} = 118,2 \text{ m}$$

Los puntos de máxima caída de tensión resistiva gR e inductiva gX están situados a una distancia ℓ_R y ℓ_X , respectivamente, del nudo 3:

$$\ell_R = L_{3,gR} = \frac{I_{3,4a}}{i_{4'r}} = \frac{68,9}{0,577} = 119,4 \text{ m}$$

$$\ell_X = L_{3,gX} = \frac{I_{3,4r}}{i_{4'r}} = \frac{48,4}{0,433} = 111,8 \text{ m}$$

La caída de tensión por reactancia hasta el punto g se calcula cortando la línea por el punto gX y aplicando la relación (7) al trozo 6-gX:

$$L_{4,g} = (200 - 118,2) = 81,8 \text{ m}; \quad L_{4,g} / 2 = 40,9 \text{ m}$$

$$L_{g,gR} = 118,2 - 111,8 = 6,4 \text{ m}$$

$$I_{g'r} = L_{4,g} \cdot i_{4'r} = 81,8 \cdot 0,433 = 35,4 \text{ A}$$

$$I_{gR'r} = L_{g,gR} \cdot i_{4'r} = 6,4 \cdot 0,433 = 2,77 \text{ A}$$

$$e_X = \sqrt{3} \frac{0,086}{1000} \left(\frac{100 \cdot 15,7 + 190 \cdot 40,9 +}{+ 230,9 \cdot 35,4 + 271,8 \cdot 2,77} \right) = 2,72 \text{ V}$$

Luego, la caída de tensión resistiva máxima admisible es:

$$e_{R \text{ adm}} = e_{\text{adm}} - e_X = 12 - 2,72 = 9,28 \text{ V}$$

Lo que permite calcular la sección S'' de la expresión (6). Para ello se corta idealmente la línea por el punto gR y se aplica (6) al trozo 1-gR:

$$S'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,024}{9,14} \left(\frac{120 \cdot 79,4 + 269,1 \cdot 68,2 +}{+ 328,2 \cdot 0,692} \right) = 126 \text{ mm}^2$$

Como comprobación, recalculamos la distancia ℓ mediante la relación (24). Utilizaremos ahora la sección que acabamos de calcular de 126 mm^2 . Se obtiene un valor de 117,5 m, muy similar al utilizado previamente.

C. Criterio más exigente

Al ser la sección S'' mayor que la S_θ , en este caso es más exigente el criterio de la caída de tensión, por lo que seguimos el cálculo en el siguiente paso.

D. Efecto de la temperatura

De la ITC-BT-07 [8], se deduce que para $S'' = 126 \text{ mm}^2$ la sección S_- vale 120 mm^2 , la cual soporta hasta 335 A. Por otra parte, la sección S_+ es de 150 mm^2 .

Lo que sigue ahora es ir realizando sucesivamente las comprobaciones (27) hasta que se cumpla alguna de ellas. De no ser así, habrá que realizar el cálculo

completo de la caída de tensión cuando la sección es S_- y se consideran los efectos de la temperatura y de la reactancia.

Se tiene que:

$$S_- / S'' = 0,952 \quad k_{\theta 0} = 0,847$$

$$I_{\text{menor}} = 60,2 \text{ A} \quad k_{\theta \text{ menor}} = 0,852$$

$$I_{\text{mayor}} = 182 \text{ A} \quad k_{\theta \text{ mayor}} = 0,892$$

Luego, se comprueba que no se cumplen las condiciones (27a), (27b) y (27c), pero sí se verifica la (27d). Por lo tanto, la sección a utilizar será $S_- = 120 \text{ mm}^2$.

Aunque ya no hace falta, vamos a completar el cálculo de la caída de tensión para S_- .

De los datos dados por el fabricante [11] se deducen estos valores para los parámetros del cable de 120 mm^2 :

$$\rho_{\text{máx}_-} = 0,0236 \Omega \text{mm}^2/\text{m}; \quad x = 0,0847 \Omega/\text{km}$$

Usando las relaciones (2), (8), (9), (11), (12), (13) y (14) con el reparto de corrientes de la tabla III, se determinan las longitudes equivalentes y efectivas de la Tabla IV.

Tabla IV: Longitudes equivalentes y efectivas

Tramo:	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
$k_{\theta \text{ eq } j-1,j}$	0,889	0,857	0,849	0,875	0,892
$k_{\theta \text{ ef } j-1,j}$	--	--	0,850	--	--
$L_{\text{eq } j-1,j} \text{ (m)}$	106,7	77,1	169,8	78,8	89,2
$L_{\text{ef } j-1,j} \text{ (m)}$	--	--	170	--	--

La relación (19) nos da entonces un nuevo valor de I_{ya} igual a 155 A. Por lo tanto, la corriente I_y apenas varía (realmente varía 0,3 A, desde 155,5 A a 155,2 A). Se comprueba, pues, que se puede seguir usando la distribución de corrientes de la Tabla III. Por lo tanto, el punto g de mínima tensión sigue estando en el tramo 3-4 y las distancias ℓ_R y ℓ_X serán las mismas que en el paso B.

Con el mejor valor de ℓ calculado en el paso B (117,5 m) y las relaciones (2), (8), (9), (11), (12), (13) y (14) se obtiene para el tramo 3-g ($L_{3,g} = \ell$) lo siguiente:

$$J_\ell = 121,4 \text{ A}^2/\text{m}$$

$$I_{\text{eq } \ell}^2 = 2356 \text{ A}^2 \quad k_{\theta \text{ eq } \ell} = 0,850$$

$$I_{\text{ef } \ell}^2 = 3534 \text{ A}^2 \quad k_{\theta \text{ ef } \ell} = 0,852$$

Luego, la relación (25) da un valor de ℓ igual a 117,5 m, en este caso idéntico al calculado en el paso B.

Si se usara el mismo valor de x que en el paso B se obtendría el mismo valor de e_X . Como no es así, calculamos el valor final de e_X a partir del antiguo proporcionalmente a sus respectivos valores de x :

$$e_X = 2,72 \frac{0,0847}{0,086} = 2,68 \text{ V}$$

El valor final de e_R es:

$$\ell_{eq} = \ell \cdot k_{\theta eq} = 99,9 \text{ m} ; \quad \ell_{ef} = \ell \cdot k_{\theta ef} = 100 \text{ m}$$

$$I_{g'a} = L_{3,g} \cdot i_{4'r} = 117,5 \cdot 0,577 = 67,8 \text{ A}$$

$$I_{gR'a} = L_{g,gR} \cdot i_{4'r} = 1,9 \cdot 0,577 = 1,10 \text{ A}$$

$$e_R = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,0236}{120} \left(106,7 \cdot 79,4 + 233,8 \cdot 67,8 + 283,7 \cdot 1,1 \right) = 8,39 \text{ V}$$

La caída de tensión total vale

$$e = 8,39 + 2,68 = 11,07 \text{ V}$$

Esta caída de tensión es inferior a la admisible ($e_{adm} = 12 \text{ V}$), lo que ratifica que se puede utilizar una sección de 120 mm^2 .

Utilizando el libro de cálculo CALIN (en el cual se realiza el cálculo iterativo del nuevo reparto de corrientes y del punto de mínima tensión) se obtiene un resultado de $11,10 \text{ V}$.

Para acabar habrá que comprobar que esta sección cumple también con el criterio de la corriente de cortocircuito.

8. Conclusiones

Si se quiere mejorar la precisión del cálculo de la caída de tensión de una línea incluyendo la variación de la resistividad con la temperatura, también habrá que considerar la caída de tensión debida a su reactancia.

Mediante la utilización de longitudes equivalentes y efectivas es posible tener en cuenta, de una forma sencilla, el efecto de la temperatura sobre la caída de tensión en un distribuidor. Estas longitudes se calculan empleando los factores de temperatura de los tramos de la línea.

En el caso de líneas alimentadas por ambos extremos, apenas se producen variaciones en el reparto de corrientes en los tramos de la línea cuando se tiene en cuenta la variación de la resistividad con la temperatura. Por esta razón, es suficientemente preciso utilizar el reparto de corrientes que se obtiene suponiendo que la resistividad es la misma en toda la línea (ecuaciones (15) a (18)).

En casos muy especiales será necesario emplear el coeficiente de impedancia k_Z para localizar el nudo de mínima tensión.

Si el punto de mínima tensión se encuentra sobre una carga distribuida, su distancia ℓ al nudo de inicio de ésta se puede calcular mediante las expresiones (24) o (25). No es preciso utilizar la relación (26).

Al calcular la sección de un distribuidor muchas veces no se necesitará realizar el cálculo preciso (incluyendo los

efectos de la temperatura y de la reactancia) de su caída de tensión. En efecto, las comprobaciones (27) permiten en muchos casos conocer rápidamente qué sección se puede usar.

Se ha comprobado la validez del método desarrollado y se ha elaborado un software que facilita su utilización.

Agradecimientos

Los autores desean manifestar su agradecimiento al profesor José Ramón Aranda Sierra, cuyas sugerencias y opiniones han contribuido a mejorar este trabajo.

Referencias

- [1] Carmona Fernández, Cálculo de instalaciones y sistemas eléctricos : proyectos a través de supuestos prácticos. Ediatec. Madrid (2002).
- [2] Carmona Fernández, D.; González Romera, E. y Álvarez Moreno, J. A. "Cálculo de líneas de baja tensión basado en la futura normativa". Energía, nº 172, pp. 73-81, julio-agosto 2003.
- [3] Carmona Fernández, D.; González Romera, E. y Álvarez Moreno, J.A. "Cálculo correcto de la sección de un cable eléctrico". Montajes e Instalaciones, nº 386, pp. 59-66, septiembre 2004.
- [4] Dufo López, R. "Cálculo de cables según el nuevo R.E.B.T.". Montajes e Instalaciones, nº 383, pp. 69-73, mayo 2004.
- [5] Dufo López, R. "Cálculo de cables BT teniendo en cuenta la temperatura real del cable". Electra, nº 125 (suplemento de cables de energía y telecomunicación), pp. 17-22, junio 2004.
- [6] Fraile Mora, J. Introducción a las instalaciones eléctricas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones. Madrid (2002).
- [7] Ministerio de Ciencia y Tecnología. Guía Técnica de Aplicación del Reglamento Electrotécnico para B. T. www.ffii.nova.es/puntoinfomcyt/guia_rbt.asp.
- [8] Ministerio de Ciencia y Tecnología. Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias. B.O.E. nº 224, 18 septiembre 2002.
- [9] Norma UNE 20-460-94 (Parte 5-523). Instalaciones eléctricas de edificios. Parte 5: Selección e instalación de materiales eléctricos. Capítulo 52: Canalizaciones. Sección 523: Corrientes admisibles.
- [10] Norma UNE 21144-1-1. Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible. Parte 1: Ecuaciones de intensidad admisible (factor de carga 100%) y cálculo de pérdidas. Sección 1: Generalidades. Mayo 1997.
- [11] Pirelli Cables y Sistemas, S.A. Catálogo de cables de Baja Tensión. www.pirelli.es.
- [12] Rodríguez Pozueta, M. A. Mantilla Peñalba, L. F. "Cálculo sencillo de cables eléctricos de B.T. teniendo en cuenta su temperatura." Montajes e Instalaciones, nº 394, mayo 2005.