

MDM001 DIREC-CAD:
MODELOS DE CÁLCULOS ELÉCTRICOS PARA REDES DE BAJA TENSIÓN

1. PARÁMETROS DE CONDUCTORES

1.1. PARÁMETROS ELÉCTRICOS LONGITUDINALES:

- $R \Leftrightarrow RESISTENCIA \Rightarrow Ohmios$
- $L \Leftrightarrow INDUCTANCIA \Rightarrow Henrios$

Existen otras magnitudes que matemáticamente sirven de nexo de unión de los parámetros anteriores, algunas de las más importantes son:

$$Z = (R + jX) \Leftrightarrow IMPEDANCIA \Rightarrow Ohmios$$
$$X_L = L \cdot \omega = L \cdot 2\pi \cdot f \Leftrightarrow REACTANCIA INDUCTIVA$$

1.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CONDUCTOR A OTRA TEMPERATURA.

Para determinar la resistencia de corriente continua para otras temperaturas, deben ser corregidos utilizando los coeficientes de temperatura de la resistencia a 20 ° C; para materiales conductores típicos se dan en la tabla N°1.

En un rango de temperatura moderada, tal como 0 ° a 140 ° C, la resistencia y la temperatura se consideran relacionadas linealmente. Sin embargo, hay alguna evidencia de que a temperaturas por encima de los conductores 140 ° C esta relación se hace no lineal. Por lo tanto, la resistencia a cualquier temperatura dada puede calcularse a partir de una resistencia conocida a una temperatura especificada por:

$$R_{t_2} = R_{t_1}(1 + \alpha(t_2 - t_1))$$

Donde:

R_{t_2} = Resistencia del conductor a la máxima temperatura de operación. (Ω/km)

R_{t_1} = Resistencia del conductor a la temperatura base (20°C). (Ω/km)

α = Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura. (C^{-1})

t_2 = Temperatura máxima de operación. (°C)

t_1 = Temperatura base o inicial. (20°C)

Tabla N°1.1

Material	Coefficiente de temperatura de resistencia, α @ 20°C
Cobre. % IACS:	
101.00	0.003973
100.00	0.00393
98.40	0.00387
98.16	0.00386
97.80	0.00384
97.66	0.00384
97.40	0.00383
97.16	0.00382
96.66	0.00380
96.16	0.00378
94.16	0.00370
93.15	0.00366
Aluminio 1350, % IACS:	
64.0	0.00423
63.0	0.00416
62.0	0.00410
61.8	0.00408
61.5	0.00406
61.4	0.00406
61.3	0.00405
61.2	0.00404
61.0	0.00403
Aleación de Aluminio, % IACS: 6201-T81	
52.5	0.00347
Aluminio revestido de Acero, Especificación B 415	
	0.0036
Cobre revestido de Acero:	
Grado 30 A, HS, EHS	0.00378
Grado 40 A, HS, EHS	0.00378

1.3. CÁLCULO DE LA REACTANCIA DE LA LÍNEA.

Para el cálculo de la reactancia se requerirá calcular la Inductancia de la Línea.

La inductancia Industrial de una Línea en (H), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 2 \cdot \ln \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot l \cdot 10^{-4} \cdot long \quad [H]$$

Donde,

n = Número de cables por fase

D_e = Distancia media geométrica entre fases (mm)

R_e = Radio equivalente (mm)

l = Longitud de la línea (km)

μ = Permeabilidad

La inductancia en las Líneas se acostumbra a determinar en (H/km), de forma que la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$L_K = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 2 \cdot \ln \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot 10^{-4} [H/km]$$

Pasando de logaritmos neperianos a logaritmos decimales, obtenemos:

$$L_K = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,6 \cdot \log \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot 10^{-4} [H/km]$$

La permeabilidad depende de las características del material y de las condiciones eléctricas a las que esté sometido:

Permeabilidad: Permeabilidad absoluta: Permeabilidad relativa:	$\mu = \mu_o \cdot \mu_r$ $\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ $\mu_r \rightarrow (Tablas)$	}	$\mu = 1 \Rightarrow \text{Cu, Al, aleaciones}$ $\mu = 200 \Rightarrow \text{Acero galvanizado}$
--	--	---	---

Como normalmente se utilizan conductores de cobre, aluminio o aleaciones de este último, y prácticamente todos disponen del mismo coeficiente de permeabilidad, podemos sustituir este valor en la fórmula anterior, resultando:

$$L_K = \left[\frac{1}{2 \cdot n} + 4,6 \cdot \log \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot 10^{-4} [H/km]$$

Esta es la fórmula en la que nos basaremos para expresar la inductancia de los diferentes circuitos. Esta inductancia depende del radio equivalente (r_e), y de la distancia media

geométrica entre fases (D_e). Estas dos magnitudes son función de la geometría del circuito, y por tanto, de la disposición de los cables en la estructura.

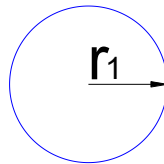
Vamos a definir el radio equivalente y la distancia media geométrica entre fases, en función de las características de los circuitos de transporte de energía eléctrica más usuales.

Radio Equivalente

Si se tiene n conductores por fase dispuestos simétricamente sobre un círculo de radio R , el radio medio geométrico del grupo de n conductores es:

$$r_{eq} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{r \cdot n}{R}} = \sqrt[n]{\frac{r \cdot n \cdot R^n}{R}} = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot R^{n-1}}$$

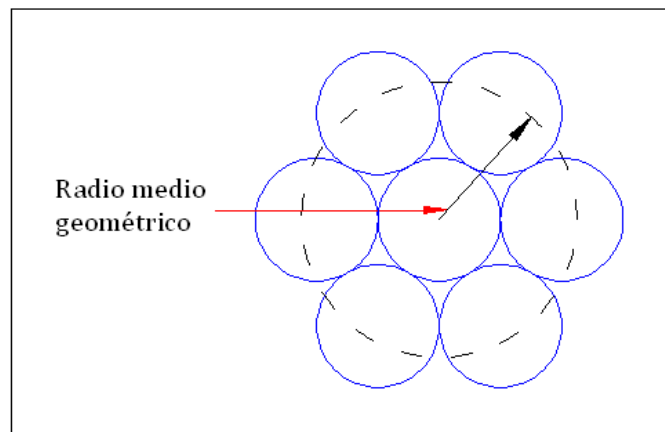
Para un conductor ($n=1$):



$$r_1 = \sqrt[1]{r \cdot 1 \cdot R^0} = r$$

CASO 1.

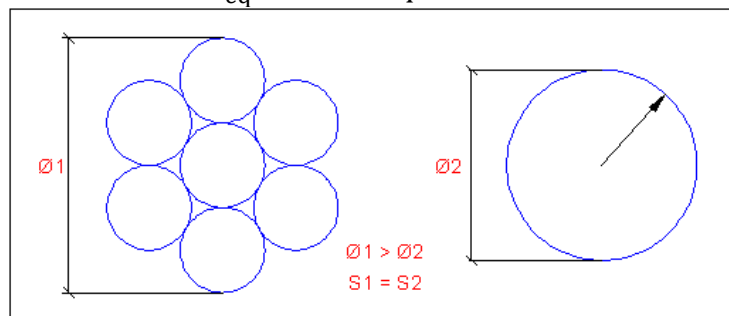
En el cálculo de la reactancia inductiva se considerará el radio equivalente, radio de un conductor de un solo hilo que tiene la misma sección transversal que el conductor de varios hilos.



$$r_{eq} = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{1/2}$$

S=Sección

r_{eq} = Radio equivalente



CASO 2.

Puede definirse el radio medio geométrico para un conductor no magnético de cualquier forma como el radio exterior de un conductor tubular de espesor infinitesimal (de manera que todo el flujo sea exterior al conductor) que, para la misma corriente, produce el mismo flujo total que el conductor real al cual sustituye.

La expresión de la inductancia en función del radio medio geométrico puede generalizarse para un conductor de cualquier tipo de construcción (cableado concéntrico, hueco, etc) utilizando el RMG, correspondiente.

En la tabla 1.2 se da el radio medio geométrico de diversos conductores en función de su radio exterior r.

Tabla 1.2, Radio medio geométrico de diversos conductores en función de su radio exterior r.

	RMG
Alambre cilíndrico	0,779r

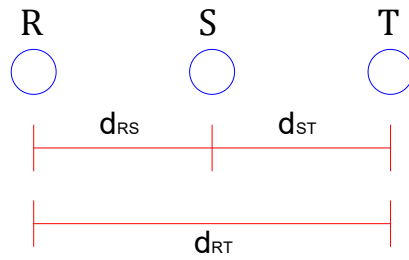
Cable de un solo material:

Nº Hilos	RMG_{3Ø}
7	0,726r
19	0,758r
37	0,768r

R = Es el radio exterior del conductor.

Diámetro Medio Geométrico (Diámetro Equivalente)

El cálculo de las DMG entre fases para 1 circuito se realiza mediante la siguiente fórmula:



$$D_e = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{ST} \cdot d_{RT}} \text{ (m)}$$

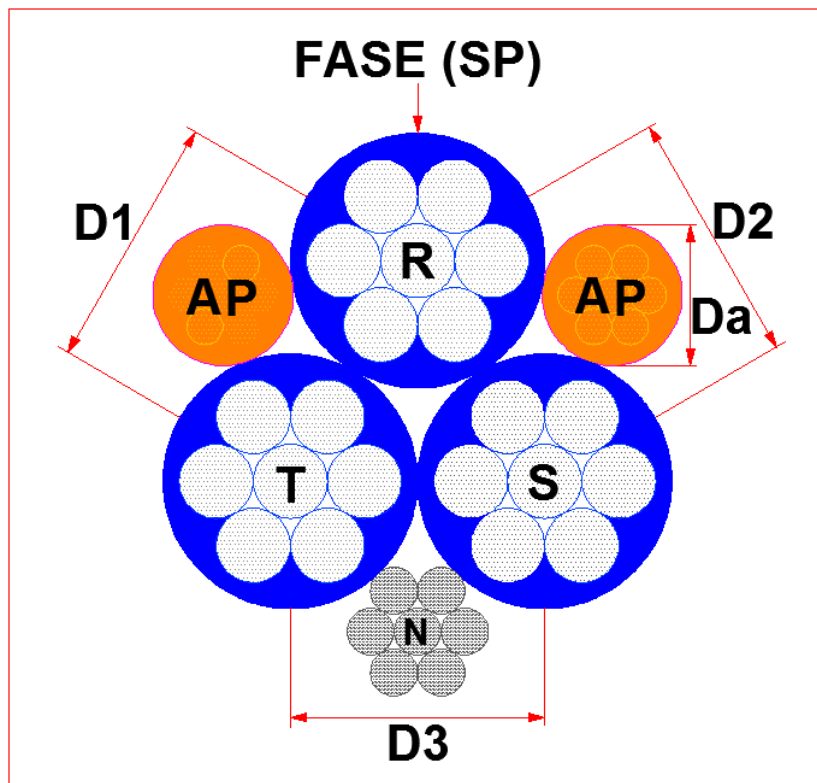
Recordar que el número de circuitos es el número de fases repetidas y no el número de conductores por fase.

Aplicando las fórmulas anteriores, podemos determinar la expresión matemática (L_{K1}) que debemos aplicar para un circuito simple.

$$L_K = \left[0.5 + 4,6 \cdot \log \left(\frac{D_e}{r} \right) \right] \cdot 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right]$$

Disposiciones más comunes de los circuitos eléctricos en las Estructuras de Redes Secundarias:

Para conductor Autoportante.



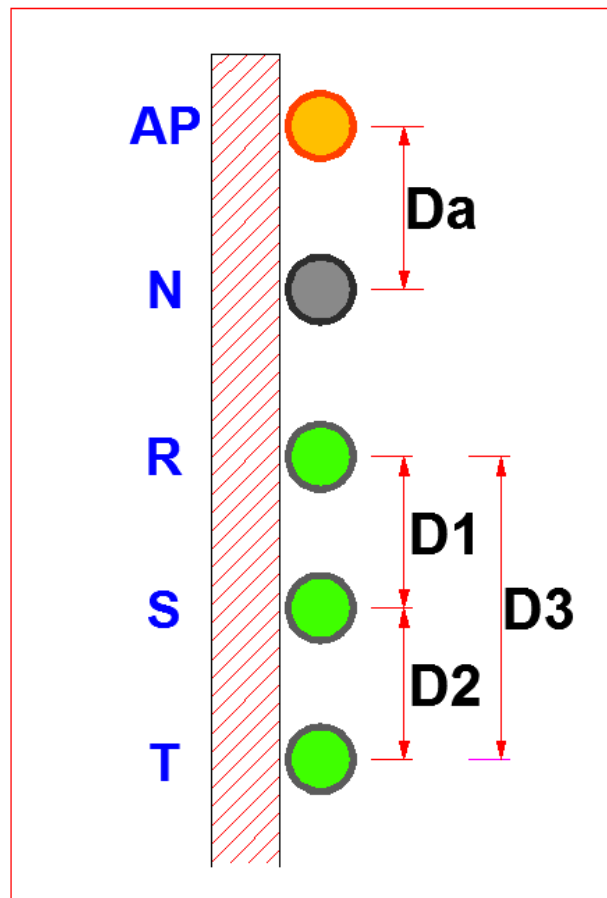
$$D_1 = D_{RS} = D_{ST} = D_{RT}$$

Donde:

D1 = Distancia entre ejes de los conductores (mm).

r = Radio del conductor (mm).

Para conductor Convencional o CPI.



1.4. Cálculo de la Reactancia Total (X_L)

Una vez determinada la inductancia (circuito simple) por Km de línea (L_K), calcularemos la inductancia total con solo multiplicar esta inductancia por la longitud de la línea en Km.

$$L[H] = L_K \left[\frac{H}{km} \right] \cdot Long[km]$$

Y finalmente la Reactancia Total resulta:

$$X_L = L \cdot w \quad [\Omega]$$

Donde:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$f = \text{frecuencia en Hz}$

Finalmente, la reactancia inductiva nos vendrá dada por la expresión:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Este es el valor que se puede considerar para la reactancia de la línea ya que el efecto capacitivo se suele considerar despreciable en cálculos para BT.

2. CÁLCULO DE CAÍDA DE TENSIÓN.

La expresión que se utiliza para el cálculo de la caída de tensión que se produce en una línea se obtiene considerando el circuito equivalente de una línea corta, mostrado en la figura siguiente, junto con diagrama vectorial.

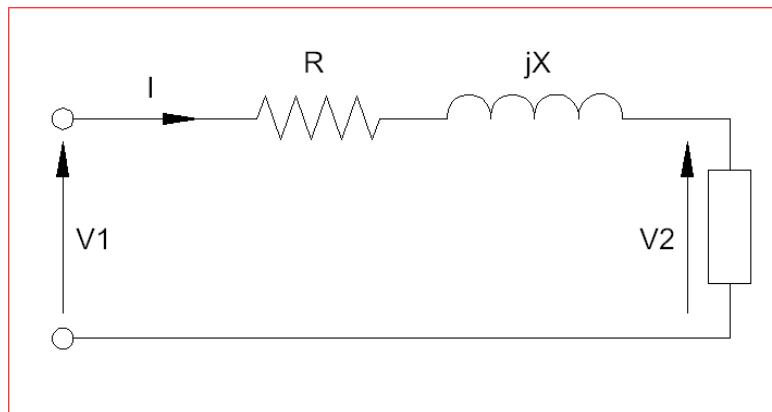


Fig. N°2.1 Circuito equivalente monofásico de una línea corta

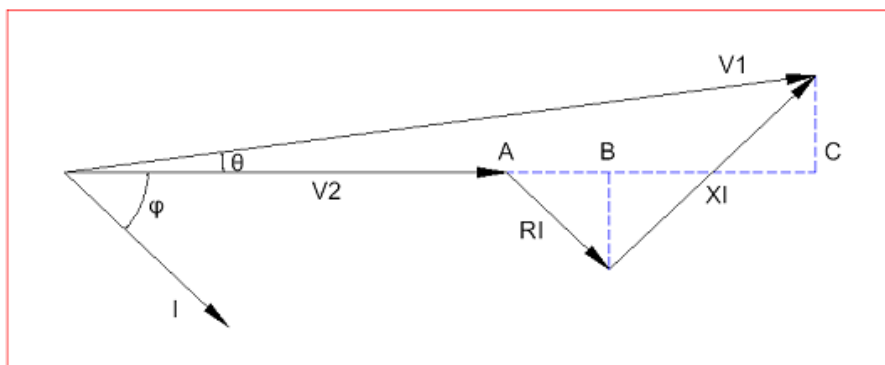


Fig. N°2.2 Diagrama vectorial

Debido al pequeño valor del ángulo θ , entre las tensiones en el origen y extremo de la línea, se puede asumir sin cometer prácticamente ningún error, que el vector V_1 es igual a su proyección horizontal, siendo por tanto el valor de la caída de tensión.

$$\Delta V = V_1 - V_2 \cong AB + BC$$

$$\Delta V = RI. \cos \varphi + XI. \sin \varphi$$

$$\Delta V = I. Z$$

$$Z = R. \cos \varphi + X. \sin \varphi$$

2.1. CÁLCULO DE FACTOR K POR CORRIENTE.

Para una red trifásica:

$$\frac{U}{\sqrt{3}} = V$$

$$\Delta U = \sqrt{3}. \Delta V = \sqrt{3}. I. Z$$

Sustituyendo el valor de la impedancia

$$\Delta U = \sqrt{3}. (R_1. \cos \varphi + X_1. \sin \varphi). I. L$$

La caída de tensión, por resistencia y reactancia de una línea (despreciando la influencia de la capacidad y la perditanca), viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta U = K. I. L$$

El valor de la intensidad en red trifásica:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}. U. I$$

$$I = \frac{P. 10^3}{\sqrt{3}. U. \cos \varphi}$$

Para una red monofásica:

$$\Delta V = 2. I. Z$$

$$\Delta V = 2. (R_1. \cos \varphi + X_1. \sin \varphi). I. L$$

$$\Delta V = K. I. L$$

El valor de la intensidad en red monofásica:

$$S_{1\phi} = U. I$$

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{V \cdot \cos \varphi}$$

Donde deducimos las expresiones del factor K:

Para circuitos trifásicos: $K = \sqrt{3}(R_1 \cos \alpha + X_1 \sin \alpha)$

Para circuitos monofásicos: $K = 2(R_2 \cos \alpha + X_2 \sin \alpha)$

2.2. CÁLCULO DE FACTOR K POR POTENCIA.

Para una red trifásica:

$$\frac{U}{\sqrt{3}} = V$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot Z$$

Sustituyendo el valor de la impedancia:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (R_1 \cdot \cos \varphi + X_1 \cdot \sin \varphi) \cdot I \cdot L$$

El valor de la intensidad en red trifásica:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

Desarrollamos la fórmula

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \cdot I \cdot L = \sqrt{3} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \cdot L$$

Reduciendo y agrupando la siguiente expresión:

$$\Delta U = P \cdot L \cdot \frac{(R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)}{U \cdot \cos \varphi} \cdot 10^3$$

La caída de tensión, por resistencia y reactancia de una línea (despreciando la influencia de la capacidad y la perditancia), viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta U = K \cdot P \cdot L \cdot 10^3$$

Para una red monofásica:

$$\Delta V = 2 \cdot I \cdot Z$$

$$\Delta V = 2 \cdot (R_1 \cdot \cos \varphi + X_1 \cdot \sin \varphi) \cdot I \cdot L$$

El valor de la intensidad en red monofásica:

$$S_{1\phi} = U \cdot I$$
$$I = \frac{P \cdot 10^3}{V \cdot \cos \varphi}$$

Desarrollamos la fórmula

$$\Delta V = 2 \cdot (R_1 \cdot \cos \varphi + X_1 \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{P \cdot 10^3}{V \cdot \cos \varphi} \cdot L$$

Reduciendo y agrupando la siguiente expresión:

$$\Delta V = 2 \cdot \frac{(R_1 \cdot \cos \varphi + X_1 \cdot \sin \varphi)}{V \cdot \cos \varphi} \cdot 10^3 \cdot P \cdot L$$

Donde deducimos las expresiones del factor K:

Para circuitos trifásicos:
$$K = \frac{(R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)}{U \cdot \cos \varphi}$$

Para circuitos monofásicos:
$$K = 2 \cdot \frac{(R_1 \cdot \cos \varphi + X_1 \cdot \sin \varphi)}{V \cdot \cos \varphi}$$

Donde:

ΔU = Caída de tensión trifásica

ΔV = Caída de tensión monofásica

I = Corriente que recorre el circuito, en A

P = Potencia máxima/consumida (kW)

R = Resistencia (Ω /km)

XL= Reactancia Total (Ω/km)

L = Longitud del tramo (km)

K = Factor de caída de tensión

3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE POTENCIA.

Los sistemas primarios y secundarios están compuestos por líneas aéreas y/o subterráneas por las cuales circula la corriente necesaria para suplir la demanda de potencia requerida, asociadas a este proceso se presentan pérdidas debido a la resistencia de los conductores relacionada con la corriente que circula.

Suministro trifásico $\Delta P = 3RLI^2 \cdot 10^{-3}$

Suministro monofásico $\Delta P = 2RLI^2 \cdot 10^{-3}$

Donde:

ΔP → Perdidas de Potencia (kW)

I → Corriente que circula por el conductor (A)

R → Resistencia del conductor (Ω/km)

L → Longitud del tramo (m)

En los sistemas de distribución, donde los voltajes son relativamente bajos, las pérdidas por efecto corona suelen ser muy pequeñas; por lo cual dicho efecto se considera despreciable.

Los valores de susceptancia a tierra de la línea de distribución son muy pequeños por lo que también suelen despreciarse.

Referencias:

“Código Nacional de electricidad Suministro 2011” – Ministerio de Energía y Minas

“Cálculo de líneas y redes eléctricas” – Ramón M. Mujal

“Electrical Distribution Systems” – Dale R. Patrick; Stephen W. Fardo

“Overhead Conductor Manual” – Southwire Company




ABS INGENIEROS SAC

www.absingenieros.com

www.dired-cad.com

facebook.com/direcdadoficial

soporte_abs@absingenieros.com

 Soporte: (+51) 997 322 177

Lima - Perú