

ANEXO B1

CALCULO ELECTRICO DE CONDUCTORES

B1.1 RESISTENCIA

$$1 + \alpha_{20}$$

El valor de la resistencia por unidad de longitud, en corriente continua y a la temperatura θ , vendrá dada por la siguiente expresión:

$$R'_{cc,\theta} = R'_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta - 20)]$$

Siendo:

$R'_{cc,\theta}$: Resistencia del conductor con corriente continua a la temperatura θ °C (Ω/km).

R'_{20} : Resistencia del conductor con corriente continua a la temperatura de 20 °C (Ω/km).

α_{20} : Coeficiente de variación de la resistividad a 20 °C en función de la temperatura. Esta variable adopta un valor de 0,00393 para el cobre suave y 0,00403 para el aluminio (°C⁻¹).

θ : Temperatura de servicio del conductor (°C).

Para los cálculos del presente Proyecto Tipo despreciamos el efecto pelicular, y por lo tanto, suponemos equivalentes los valores de resistencia del conductor con corriente continua y con corriente alterna.

En la tabla B1.1 se presenta los valores de resistencia para los distintos conductores normalizados.

Tabla B1.1 - Resistencia de conductores Normalizados

Conductor	R'20 (Ω/km)	R'60(Ω/km)	R'90 (Ω/km)
Cu #8 AWG	2,10	2,43	2,68
Cu #6 AWG	1,32	1,53	1,68
Cu #4 AWG	0,83	0,96	1,06
Al #6 AWG	2,17	2,52	2,78
Al #4 AWG	1,36	1,58	1,75
Al #2 AWG	0,86	1,00	1,10
AAC #2 AWG	0,86	0,99	1,10
AAAC #2 AWG	0,98	1,11	1,21
AAC 1/0 MCM	0,54	0,63	0,69
AAAC 1/0 MCM	0,61	0,70	0,76
AAC 4/0 MCM	0,27	0,31	0,34
AAAC 4/0 MCM	0,31	0,35	0,38

En los conductores concéntricos de cobre y aluminio se toma la resistencia del neutro igual a la de las fases, por ser los valores muy parecidos.

B1.2 REACTANCIA INDUCTIVA

La reactancia X del conductor varía con el diámetro y la separación de los conductores.

En el caso de los conductores trenzados en haz se adopta el valor de $X = 0,1 \, \Omega/\text{km}$, que se puede introducir en los cálculos sin error apreciable.

Este valor también se puede emplear para los cálculos relativos a los conductores concéntricos de cobre y aluminio debido a que en éstos el valor real de la reactancia será incluso menor.

B1.3 CONSTANTE DE REGULACION.

Podemos expresar la caída de tensión en una línea trifásica como:

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

Con:

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

Reemplazando:

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

Siendo:

ΔU : Caída de tensión compuesta (kV).

I: Intensidad (A).

Z: Impedancia por fase y por kilómetro de línea (Ω/km).

L: Longitud del tramo de línea (km).

P: Potencia trifásica consumida al final de la línea (kW).

U: Tensión entre fases en el punto receptor de la línea (kV).

φ : Ángulo de fase ($^\circ$).

R: Resistencia de la línea por fase y por kilómetro (Ω /km).

X: Reactancia de la línea por fase y por kilómetro (Ω /km).

Se simplifica la expresión anterior definiendo la siguiente variable:

$$\Psi = R + X \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Por lo tanto, la expresión resultante será la siguiente:

$$\Delta U = \frac{P \cdot \Psi \cdot L}{U}$$

Finalmente se calcula la caída de tensión en porcentaje, tanto para líneas trifásicas:

$$\% \Delta V = \frac{P \cdot L \cdot \Psi}{U^2} \cdot 100$$

Donde:

P: Potencia activa total consumida por la/s carga/s conectada/s a la línea (kW).

L: Longitud del tramo de línea (m).

Ψ : Impedancia del conductor entre el $\cos \varphi$ de la línea. Según sean líneas trifásicas o bifásicas se empleará el coeficiente definido en cada caso (Ω /km).

U: Tensión entre fases (kV).

Al producto $M = P \cdot L$ se le denomina momento eléctrico de la carga P, situada a la distancia L del origen de la energía.

Se define la constante de regulación como:

$$K_v = \frac{\Psi}{10 \cdot U^2} \cdot 100$$

Para una **línea bifásica** la caída de tensión se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot Z \cdot L$$

Con:

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}$$

Reemplazando:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot P \cdot Z \cdot L}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot P(R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \cdot L}{U \cdot \cos \varphi}$$

Siendo:

ΔU : Caída de tensión compuesta (kV).

I: Intensidad (A).

Z: Impedancia por fase y por kilómetro de línea (Ω /km).

L: Longitud del tramo de línea (m).

P: Potencia bifásica consumida la final de la línea (kW).

U: Tensión entre fases en el punto receptor de la línea (kV).

φ : Ángulo de fase ($^{\circ}$).

R: Resistencia de la línea por fase y por kilómetro (Ω /km).

X: Reactancia de la línea por fase y por kilómetro (Ω /km).

Se simplifica la expresión anterior definiendo la siguiente variable:

$$\Psi = \left((R_f + R_n) + (2 \cdot X \cdot \tan \varphi) \right)$$

Por lo tanto la expresión resultante será la siguiente:

$$\Delta U = \frac{P \cdot L \cdot \Psi}{U}$$

Finalmente se calcula la caída de tensión en porcentaje, tanto para líneas trifásicas:

$$\% \Delta V = \frac{P \cdot L \cdot \Psi}{10 \cdot U^2} \cdot 100$$

Donde:

P: Potencia activa total consumida por la/s carga/s conectada/s a la línea (kW).

L: Longitud del tramo de línea (km).

Ψ : Impedancia del conductor entre el $\cos\phi$ de la línea. Según sean líneas trifásicas o bifásicas se empleará el coeficiente definido en cada caso (Ω/km).

U: Tensión entre fases (kV).

Al producto $M = P \cdot L$ se le denomina momento eléctrico de la carga P, situada a la distancia L del origen de la energía.

Se define la constante de regulación como:

$$K_v = \frac{\Psi}{10 \cdot U^2} \cdot 100$$

B1.4 PÉRDIDAS DE POTENCIA

B1.4.1 Cálculo.

Las pérdidas de potencia en una línea serán las debidas al efecto Joule causado por la resistencia de la misma. Para una **línea trifásica** vendrán dadas por la siguiente expresión:

$$P_p = 3 \cdot R_f \cdot L \cdot I^2$$

Con:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi}$$

Donde:

R_f : Resistencia del conductor de fase por kilómetro (Ω/km).

L: Longitud de la línea (m).

I: Intensidad de la línea (A).

P_p : Pérdida de potencia (kW)

P: Potencia trifásica transportada por la línea(kW)

U: Tensión compuesta (fase-fase) de la línea (kV).

$\cos\varphi$: Factor de potencia de la carga.

El porcentaje de potencia perdida en la línea vendrá dado por el cociente entre la potencia perdida y la potencia transportada:

$$\Delta P (\%) = \frac{P_p}{P} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot R_f \cdot L \cdot I}{U \cdot \cos\varphi} \cdot 100 = P \cdot L \cdot K_p$$

Con la constante de pérdidas dada por:

$$K_p = \frac{R_f}{U^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot 100$$

Si realizamos el mismo proceso para el caso de una **línea bifásica** obtenemos los siguientes resultados.

$$P_p = (R_f + R_n) \cdot L \cdot I^2$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi}$$

Donde:

R_f : Resistencia del conductor de fase por kilómetro (Ω/km).

R_n : Resistencia del conductor neutro por kilómetro (Ω/km).

L: Longitud de la línea (m).

I: Intensidad de la línea (A)

P_p : Pérdida de potencia (kW)

P: Potencia bifásica transportada por la línea (kW)

U: Tensión compuesta (fase-fase) de la línea (kV).

$\cos\varphi$: Factor de potencia de la carga.

Operando de la misma manera que para líneas trifásicas

$$\Delta P (\%) = P \cdot L \cdot K_p$$

Con la constante de pérdidas dada por:

$$K_p = \frac{(R_f + R_n)}{U^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot 100$$

En las siguientes tablas se muestran las constantes de pérdida de potencia, para las dos tensiones objeto de este proyecto y para varios valores del factor de potencia.

B1.4.2 Tablas de Constante de Pérdidas para Líneas Trifásicas y Bifásicas

Nota General: En la realización de estas tablas se ha utilizado el valor de la resistencia del conductor a 60°C.

Tabla B1.5 – Conductores Trenzados

CONDUCTOR		TENSIÓN (V)	FP = 0,8		FP = 0,9		FP = 1	
AI	Circuito monofásico							
	Tríplex #2	240	0,002603	·P·L	0,002057	·P·L	0,001666	·P·L
	Triplex 1/0		0,001638	·P·L	0,001294	·P·L	0,001048	·P·L
	Triplex 4/0		0,000818	·P·L	0,000646	·P·L	0,000523	·P·L
	Circuito trifásico							
	Cuádruplex 1/0	208	0,002181	·P·L	0,001723	·P·L	0,001396	·P·L
	Cuádruplex 4/0	208	0,001089	·P·L	0,000860	·P·L	0,000697	·P·L

Para determinar el porcentaje de pérdidas de potencia, en el caso de varias cargas conectadas a diferentes distancias, se realizará el sumatorio de cada uno de los productos, tal y como se muestra en la siguientes expresión.

$$\Delta P = 100 \frac{R_f \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} (\%)$$

$$\Delta P = 100 \frac{(R_f + R_n) \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} (\%)$$

B1.5 POTENCIA A TRANSPORTAR

B1.5.1 Cálculo

La potencia máxima que puede transportar la línea vendrá limitada por la intensidad máxima admisible del conductor y por la caída de tensión máxima permitida.

La máxima potencia de transporte de una **línea trifásica**, limitada por la intensidad máxima admisible, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{max} \cdot \cos \varphi_m$$

Siendo:

P_{max} : Potencia máxima que puede transportar la línea (kW).

U: Tensión nominal fase-fase (kV).

I_{max} : Intensidad máxima admisible del conductor (A).

$\cos \varphi_m$: Factor de potencia medio de las cargas receptoras.

La máxima potencia de transporte de una **línea bifásica**, limitada por la intensidad máxima admisible, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$P_{max} = U \cdot I_{max} \cdot \cos \varphi_m$$

Siendo:

P_{max} : Potencia máxima que puede transportar la línea (kW).

U: Tensión nominal de la línea entre conductores (kV).

I_{max} : Intensidad máxima admisible del conductor (A).

$\cos\phi_m$: Factor de potencia medio de las cargas receptoras.

Hay que tener en cuenta que el punto crítico de la línea es el tramo situado antes de la primera carga, ya que después de esta, la intensidad que circulará por la línea siempre será menor. En el caso de ramificaciones sucederá lo mismo, el punto más crítico estará al inicio de la ramificación.

La máxima potencia de transporte de una **línea trifásica o bifásica**, limitada por la caída de tensión, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{10 \cdot U^2}{\Psi} \cdot \frac{\Delta U\%}{L}$$

Siendo:

P: Potencia máxima que puede transportar la línea (kW).

U: Tensión nominal de la línea entre conductores (kV).

L: Longitud del tramo de línea (km).

Ψ : Impedancia del conductor (Ω/km).

$\Delta U\%$: Caída de tensión.

B1.5.2 Tablas de potencia máxima limitada por capacidad de conductor

**Tabla B1.14 - Potencia máxima limitada por intensidad máxima (kW)
Conductores de línea**

Conductor	Tensión	$\cos\varphi = 0,8$	$\cos\varphi = 0,9$	$\cos\varphi = 1$
Circuito monofásico				
Tríplex #2	240 V	28,80	32,40	36,00
Tríplex 1/0		38,40	43,20	48,00
Tríplex 4/0		59,14	66,53	73,92
Circuito trifásico				
Cuádruplex 1/0	208 V	51,88	58,36	64,85
Cuádruplex 4/0	208 V	79,26	89,17	99,07