# Vademecum de fórmulas de cálculo en electrotecnia

**Resumen:**

En este artículo se publican y explican un variado surtido de fórmulas de cálculo, algunas estrictas y otras empíricas, para la resolución de problemas electrotécnicos.

**Desarrollo:**

En algunas de las fórmulas siguientes se emplea la fuente “symbol” para su notación. Si los símbolos de las letras 'alfa beta delta' no aparecen así: [α β δ], entonces deberá instalarse la fuente citada para una lectura adecuada.

Por otra parte, en todas las fórmulas se utilizan las unidades del Sistema Internacional (SI), salvo expresa indicación en contrario.

## 1 - Algunas fórmulas básicas de la electrotecnia

### - Potencia en una resistencia

La potencia **P** disipada en una resistencia **R** atravesada por una corriente **I** que produce una caída de tensión **V** vale:

$$\mathbf{P = V\,I = V^2 / R = I^2\,R}$$

### - Energía en una resistencia

La energía **W** consumida en un tiempo **t**, para entregar una potencia constante **P** disipada en una resistencia **R** atravesada por una corriente **I** con una caída de tensión **V** vale:

$$\mathbf{W = P\,t = V\,I\,t = V^2\,t / R = I^2\,R\,t}$$

Para obtener el resultado en calorías, y como **1 cal = 4,186 J**, resulta:

$$\mathbf{W_{[cal]} = 0{,}23889\,I^2\,R\,t}$$

Cabe señalar que la fórmula anterior puede aplicarse para el dimensionamiento de resistencias calefactoras. Por otro lado, las necesidades de calefacción en oficinas rondan los 25 a 35 cal / h por metro cúbico.

### - Energía almacenada en el campo

La energía **W** almacenada en el campo de una capacidad **C** para alcanzar una tensión **V** con una carga **Q** vale:

$$\mathbf{W = C\,V^2 / 2 = Q\,V / 2 = Q^2 / 2\,C}$$

La energía **W** almacenada en el campo de una inductancia **L** para llevar una corriente de carga **I** con un flujo concatenado **Ψ** vale:

$$W = L I^2 / 2 = \Psi I / 2 = \Psi^2 / 2L$$

Donde el flujo concatenado **Ψ** es igual al producto del número de vueltas **N** de la inductancia por el flujo magnético **Φ**:

$$\Psi = N \Phi = L I$$

- <u>Potencia de CA en una impedancia serie</u>

Si una tensión **V** (tomada como referencia) se aplica a una impedancia **Z** formada por una resistencia **R** en serie con una reactancia **X**, la corriente **I** vale:

$$I = V / Z = V (R / |Z|^2 - jX / |Z|^2) = V R / |Z|^2 - j V X / |Z|^2 = I_P - jI_Q$$

La corriente activa $I_P$ y la corriente reactiva $I_Q$ valen:

$$I_P = V R / |Z|^2 = |I| \cos\phi$$
$$I_Q = V X / |Z|^2 = |I| \operatorname{sen}\phi$$

El valor de la potencia aparente **S**, la potencia activa **P**, y la potencia reactiva **Q** es:

$$S = V |I| = V^2 / |Z| = |I|^2 |Z|$$
$$P = V I_P = I_P^2 |Z|^2 / R = V^2 R / |Z|^2 = |I|^2 R = V |I| \cos\phi$$
$$Q = V I_Q = I_Q^2 |Z|^2 / X = V^2 X / |Z|^2 = |I|^2 X = V |I| \operatorname{sen}\phi$$

El factor de potencia **cosϕ** resulta:

$$\cos\phi = I_P / |I| = P / S = R / |Z|$$

- <u>Potencia de CA trifásica</u>

Para una carga equilibrada en **estrella** con una tensión de línea $V_{lin}$ y una corriente de línea $I_{lin}$ se tiene:

$$V_{estr} = V_{lin} / \sqrt{3}$$
$$I_{estr} = I_{lin}$$
$$Z_{estr} = V_{estr} / I_{estr} = V_{lin} / \sqrt{3} I_{lin}$$
$$S_{estr} = 3 V_{estr} I_{estr} = \sqrt{3} V_{lin} I_{lin} = V_{lin}^2 / Z_{estr} = 3 I_{lin}^2 Z_{estr}$$

Para una carga equilibrada en **triángulo** con una tensión de línea $V_{lin}$ y una corriente de línea $I_{lin}$ se tiene:

$$V_{triang} = V_{lin}$$
$$I_{triang} = I_{lin} / \sqrt{3}$$
$$Z_{triang} = V_{triang} / I_{triang} = \sqrt{3} V_{lin} / I_{lin}$$
$$S_{triang} = 3 V_{triang} I_{triang} = \sqrt{3} V_{lin} I_{lin} = 3 V_{lin}^2 / Z_{triang} = I_{lin}^2 Z_{triang}$$

La potencia aparente **S**, la potencia activa **P**, y la potencia reactiva **Q** valen:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$
$$P = S \cos\phi = \sqrt{3} V_{lin} I_{lin} \cos\phi$$

**$Q = S \operatorname{sen}\phi = \sqrt{3}\, V_{lin}\, I_{lin} \operatorname{sen}\phi$**

## 2 - Constantes y conversión de unidades eléctricas

### - Constantes

| | |
|---|---|
| $\mu_0 = 4\,\pi\,10^{-7}$ H / m | **permeabilidad del vacío** |
| $\varepsilon_0 = 8{,}85418\ 10^{-12}$ F / m | **permitividad del vacío** |
| $e = 1{,}60218\ 10^{-19}$ C | **carga del electrón** |
| $c = 2{,}99792\ 10^{8}$ m / s $= (\mu_0 \cdot \varepsilon_0)^{-0{,}5}$ | **velocidad de la luz en el vacío** |
| $\rho_{cu} = 1{,}72414\ 10^{-8}$ Ohm . m | **resistividad del cobre normal a 20 °C** $(1 / 58\ 10^{6})$ |
| $\rho_{cu} = 0{,}0172414$ Ohm . mm$^2$ / m | |
| $\alpha_{cu} = 3{,}93\ 10^{-3}$ °C$^{-1}$ | **coef. variación resistencia con la temp. del cobre a 20 °C** |
| $\rho_{al} = 2{,}85714\ 10^{-8}$ Ohm . m | **resistividad del aluminio normal a 20 ° C** $(1 / 35\ 10^{6})$ |
| $\rho_{al} = 0{,}0285714$ Ohm . mm$^2$ / m | |
| $\alpha_{al} = 4{,}03\ 10^{-3}$ °C$^{-1}$ | **coef. variación resistencia con la temp. del aluminio a 20 °C** |

### - Conversión de unidades gaussianas al SI

**1 Maxwell = $10^{-8}$ Wb**
**1 Gauss = $10^{-4}$ T**
**1 Oersted = 79,577472 A / m**

### - Conversión de unidades de energía, trabajo y calor

**1 J = 1 N . m = 1 W . s = 1 V . C**
**1 kW. h = 3,6 $10^{6}$ J**
**1 erg = 1 dina . cm = $10^{-7}$ J**
**1 kgf . m = 9,80666 J**
**1 eV = 1,60218 $10^{-19}$ J**
**1 libra . pie = 1,3558 J**
**1 HP . h = 2,685 $10^{6}$ J**
**1 kcal = $10^{3}$ cal = 4186 J**
**1 BTU = 1055 J**

### - Conversión de unidades de potencia

**1 W = 1 J / s = $10^{-3}$ kW**
**1 kgf . m / s = 9,80666 W**
**1 CV = 735,499 W**
**1 HP = 1,0139 CV = 745,7 W**
**1 kcal / h = 1 frig / h = 1,1628 W**
**1 BTU / h = 0,2931 W**

## 3 - Fórmulas eléctricas diversas

### - Fuerza entre conductores

Si dos conductores paralelos rectilíneos, de gran longitud **l** y de sección pequeña frente a las demás dimensiones, llevan una corriente **I** y se encuentran a una distancia **d** entre sí, entonces la fuerza **F** que aparece entre los mismos vale:

$$\mathbf{F = (l \cdot I^2 \cdot 2\ 10^{-7}\ H / m) / d}$$

### - Resistencia de un conductor

Un conductor rectilíneo homogéneo de resistividad $\rho$, de longitud **l** y de sección transversal constante **S**, tiene una resistencia **R** que vale:

$$\mathbf{R = \rho \cdot l / S}$$

### - Resistencia en función de la temperatura

Un conductor metálico homogéneo de resistencia $\mathbf{R_{T0}}$ a la temperatura $\mathbf{T_0}$ y de coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura $\boldsymbol{\alpha_{T0}}$ a la temperatura $\mathbf{T_0}$ , tiene una resistencia $\mathbf{R_T}$ a la temperatura **T** que vale:

$$\mathbf{R_T = R_{T0} \cdot [1 + \alpha_{T0} \cdot ( T - T_0 )]}$$

### - Inductancia de una bobina recta larga

Una bobina rectilínea de gran longitud **l**, de **N** vueltas, de sección transversal **S** y permeabilidad $\mu$, tiene una inductancia **L** que vale:

$$\mathbf{L = \mu \cdot N^2 \cdot S / l}$$

### - Inductancia de una bobina recta corta

Una bobina rectilínea de longitud **l**, de **N** vueltas, de sección transversal circular **S**, de diámetro **d** y permeabilidad $\mu$, tiene una inductancia **L** que vale:

$$\mathbf{L = \mu \cdot N^2 \cdot S / (l + 0{,}45 \cdot d)}$$

### - Inductancia de una línea trifásica ideal

Si se tiene una línea trifásica rectilínea de longitud **l**, cuyas fases se encuentran transpuestas secuencialmente cada **l/3** metros y si la distancia entre conductores mucho es menor que de estos a la tierra, entonces su inductancia por fase **L** vale:

$$\mathbf{L = l \cdot (\mu_0 / (2\ \pi)) \cdot \ln (DMG/rmg) = l \cdot 2\ 10^{-7}\ H \cdot m^{-1} \cdot \ln (DMG/rmg)}$$

Donde **DMG** es la distancia media geométrica entre los conductores y **rmg** es el radio medio geométrico de los conductores de fase.
Estos valores dependen de la disposición geométrica de la línea y de la posible existencia de varios subconductores por fase; estando perfectamente tabulados para los diferentes casos posibles.

Con fines orientativos, a continuación se presentan los valores correspondientes a una línea con **un solo** conductor por fase de radio $r_f$ y con una disposición de los mismos en forma de triángulo de lados $D_{1-2}$, $D_{2-3}$ y $D_{1-3}$:

$$DMG = (D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3})^{1/3}$$

$$rmg = r_f \cdot e^{-0,25} = r_f \cdot 0,7788$$

- <u>Capacidad de una línea trifásica ideal</u>

Si se tiene una línea trifásica rectilínea de longitud **l**, cuyas fases se encuentran transpuestas secuencialmente cada **l/3** metros y si la distancia entre conductores mucho es menor que de estos a la tierra, entonces su capacidad al neutro por fase $C_n$ vale:

$$C_n = l \cdot 2\,\pi \cdot \varepsilon_0 / (\ln (DMG/rmg))$$

Donde **DMG** es la distancia media geométrica entre los conductores y **rmg** es el radio medio geométrico de los conductores de fase.
Estos valores dependen de la disposición geométrica de la línea y de la posible existencia de varios subconductores por fase; estando perfectamente tabulados para los diferentes casos posibles.

Con fines orientativos, a continuación se presentan los valores correspondientes a una línea con **un solo** conductor por fase de radio $r_f$ y con una disposición de los mismos en forma de triángulo de lados $D_{1-2}$, $D_{2-3}$ y $D_{1-3}$:

$$DMG = (D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3})^{1/3}$$

$$rmg = r_f$$

- <u>Transformadores</u>

En un transformador ideal de dos arrollamientos, con una tensión primaria de fase $V_1$ aplicada en un bobinado de $N_1$ espiras por el que circula una corriente $I_1$ de fase, y con una tensión secundaria de fase $V_2$ inducida en un bobinado de $N_2$ espiras por el que circula una corriente $I_2$ de fase, se cumplen las siguientes relaciones aproximadas:

$$V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = a$$
$$I_1 / I_2 = N_2 / N_1 = 1 / a$$

Donde **a** es la relación de transformación. La impedancia $Z_{21}$ referida al lado primario, equivalente a la impedancia $Z_2$ en el lado secundario, es:

$$Z_{21} = Z_2 \cdot (N_1 / N_2)^2 = Z_2 \cdot a^2$$

La potencia aparente **S** para un transformador monofásico vale:

$\mathbf{S = V_1 \,.\, I_1 = S_1 = V_2 \,.\, I_2 = S_2}$

Para un transformador equilibrado de **m** fases:

$\mathbf{S = m \,.\, V_1 \,.\, I_1 = S_1 = m \,.\, V_2 \,.\, I_2 = S_2}$

- Autotransformadores

En un autotransformador ideal, con una tensión primaria de fase $\mathbf{V_1}$ aplicada en un bobinado de $\mathbf{N_1}$ + $\mathbf{N_2}$ espiras por el que circula una corriente $\mathbf{I_1}$ de fase, y con una tensión secundaria de fase $\mathbf{V_2}$ inducida en un bobinado de $\mathbf{N_2}$ espiras por el que circula una corriente $\mathbf{I_2}$ de fase, se cumplen las siguientes relaciones aproximadas:

$\mathbf{V_1 / V_2 = (N_1 + N_2) / N_2 = a}$
$\mathbf{I_1 / I_2 = N_2 / (N_1 + N_2) = 1 / a}$

- Cálculo de pequeños transformadores

En un transformador monofásico pequeño de dos arrollamientos, con una tensión primaria $\mathbf{V_1}$ aplicada en un bobinado de $\mathbf{N_1}$ espiras por el que circula una corriente $\mathbf{I_1}$ y con una tensión secundaria $\mathbf{V_2}$ inducida en un bobinado de $\mathbf{N_2}$ espiras por el que circula una corriente $\mathbf{I_2}$, que trabaja a una frecuencia **f** y cuyo circuito magnético tiene una sección transversal $\mathbf{S_{Fe}}$ y trabaja con una inducción **B**, se cumplen las siguientes relaciones aproximadas:

$\mathbf{V_1 / N_1 = V_2 / N_2 = V_e}$
$\mathbf{I_1 / I_2 = N_2 / N_1}$

$\mathbf{V_e = \sqrt{2} \,.\, \pi \,.\, f \,.\, B \,.\, S_{fe}}$ $\mathbf{S_{fe} = V_e / (\sqrt{2} \,.\, \pi \,.\, f \,.\, B)}$

$\mathbf{V_e = A \,.\, (V_2 \,.\, I_2)^{1/2}}$ $\mathbf{S_{fe} = A \,.\, (V_2 \,.\, I_2)^{1/2} / (\sqrt{2} \,.\, \pi \,.\, f \,.\, B)}$

Donde **A** es un coeficiente empírico que vale de 0,033 a 0,045 para núcleo acorazado y servicio permanente. Por su parte, la inducción **B** se toma cercana a 1 Tesla y la densidad de corriente en los bobinados de cobre primarios y secundarios puede adoptarse entre 2 y 4 A / mm$^2$.

- Rendimiento

El rendimiento por unidad $\eta$ de una máquina eléctrica con una potencia de entrada $\mathbf{P_{ent}}$, una potencia de salida $\mathbf{P_{sal}}$ y una potencia de pérdidas $\mathbf{P_{per}}$ vale:

$\mathbf{\eta = P_{sal} / P_{ent} = P_{sal} / (P_{sal} + P_{per}) = (P_{ent} - P_{per}) / P_{ent}}$

$\mathbf{P_{ent} = P_{sal} + P_{per} = P_{sal} / \eta = P_{per} / (1 - \eta)}$
$\mathbf{P_{sal} = P_{ent} - P_{per} = P_{ent} \,.\, \eta = P_{per} \,.\, \eta / (1 - \eta)}$
$\mathbf{P_{per} = P_{ent} - P_{sal} = P_{ent} \,.\, (1 - \eta) = P_{sal} \,.\, (1 - \eta) / \eta}$

De estas fórmulas pueden deducirse una gran variedad de ecuaciones, en función de las aplicaciones prácticas y de las unidades a utilizar.

Por ejemplo, la potencia eléctrica $\mathbf{P_{ent}}$ en W que toma un motor con rendimiento porcentual $\eta_{[\%]}$ y que entrega una potencia mecánica $\mathbf{P_{m\,[HP]}}$ en HP, vale:

$$\mathbf{P_{ent} = P_{sal} / \eta = P_{m\,[HP]} \,.\, 745{,}7 \,.\, 100 / \eta_{[\%]}}$$

- <u>Potencia mecánica de motores eléctricos</u>

La potencia mecánica $\mathbf{P_m}$ de un motor que gira con velocidad angular $\omega$ y cuyo accionamiento tiene un par resistente $\mathbf{M}$ vale:

$$\mathbf{P_m = M \,.\, \omega}$$

Si el motor gira a $\mathbf{N_{[RPM]}}$ RPM y tiene un par resistente de $\mathbf{M_{[kgf.m]}}$ kgf.m, entonces:

$$\mathbf{P_m = 1{,}02695 \,.\, M_{[kgf.m]} \,.\, N_{[RPM]}} \qquad \mathbf{(1/0{,}974)}$$

Expresando la potencia mecánica en HP:

$$\mathbf{P_{m\,[HP]} = 1{,}37716\ 10^{-3} \,.\, M_{[kgf.m]} \,.\, N_{[RPM]}} \qquad \mathbf{(1/726)}$$

Si se trata de una carga $\mathbf{G}$ que describe un movimiento rectilíneo uniforme con velocidad $\mathbf{v}$ (por ejemplo un ascensor), la potencia mecánica $\mathbf{P_m}$ vale:

$$\mathbf{P_m = G \,.\, v}$$

Si la carga es de $\mathbf{G_{[kgf]}}$ kgf y tiene una velocidad de $\mathbf{v}$ m/s, entonces:

$$\mathbf{P_m = 9{,}80666 \,.\, G_{[kgf]} \,.\, v}$$

El par resistente equivalente $\mathbf{M_{ER}}$ aplicado a un motor que gira con velocidad angular $\omega$ y mueve una carga $\mathbf{G}$ que describe un movimiento rectilíneo uniforme con velocidad $\mathbf{v}$ resulta:

$$\mathbf{M_{ER} = P_m / \omega = G \,.\, v / \omega}$$

Si el motor gira a $\mathbf{N_{[RPM]}}$ RPM y la carga es de $\mathbf{G_{[kgf]}}$ kgf con una velocidad de $\mathbf{v}$ m/s, entonces:

$$\mathbf{M_{ER} = 93{,}6467 \,.\, G_{[kgf]} \,.\, v / N_{[RPM]}}$$

Expresando el par resistente equivalente en kgf.m:

$$\mathbf{M_{ER[kgf.m]} = 9{,}5493 \,.\, G_{[kgf]} \,.\, v / N_{[RPM]}}$$

- <u>Influencia de la transmisión</u>

Si la transmisión entre el motor y la máquina accionada se realiza por medio de engranajes o correas, el par resistente $\mathbf{M}$ y la velocidad angular $\omega$ de cada parte se vinculan mediante la relación ideal:

$$\mathbf{M_1 \,.\, \omega_1 = M_2 \,.\, \omega_2}$$

$\mathbf{M_1 = M_2 \cdot \omega_2 / \omega_1 = M_2 \cdot N_{[RPM]2} / N_{[RPM]1}}$

- Tiempo de arranque de motores

Partiendo del par medio de aceleración $\mathbf{M_{pr[kgfm]}}$ en kgf.m y del momento de impulsión total $\mathbf{GD^2_{[kgfm2]}}$ en kgf.m$^2$ del motor y la máquina accionada, se puede determinar aproximadamente el tiempo de duración del arranque $\mathbf{t_a}$ en segundos, desde el reposo hasta una velocidad $\mathbf{N_{[RPM]}}$ RPM, mediante:

$$\mathbf{t_a = 2{,}666\ 10^{-3} \cdot GD^2_{[kgfm2]} \cdot N_{[RPM]} / M_{pr[kgfm]}} \qquad \mathbf{(1/375)}$$

- Arranque de motores asincrónicos trifásicos

| | | | |
|---|---|---|---|
| Arr. directo: | 100% tensión | 100% corriente | 100% cupla |
| Arr. estrella-triángulo: | 58% tensión | 33% corriente | 33% cupla |
| Arr. autotrafo 80%: | 80% tensión | 64% corriente | 64% cupla |
| Arr. autotrafo 65%: | 65% tensión | 42% corriente | 42% cupla |
| Arr. autotrafo 50%: | 50% tensión | 25% corriente | 25% cupla |
| Arr. reactor serie 80%: | 80% tensión | 80% corriente | 64% cupla |
| Arr. reactor serie 65%: | 65% tensión | 65% corriente | 42% cupla |

- Velocidad de motores asincrónicos

La expresión que nos da el valor de la velocidad angular $\omega$ de un motor asincrónico es:

$$\mathbf{\omega = (1 - s) \cdot \omega_s}$$

Donde **s** representa el resbalamiento y $\omega_s$ la velocidad angular sincrónica.

Por otro lado, el valor de la velocidad $\mathbf{N_{[RPM]}}$ de un motor asincrónico en RPM es:

$$\mathbf{N_{[RPM]} = (1 - s) \cdot N_{s\ [RPM]} = (1 - s)\ 60\ f / p_p}$$

Donde $\mathbf{N_{s\ [RPM]}}$ simboliza las RPM sincrónicas, **f** la frecuencia de red y $\mathbf{p_p}$ el número de pares de polos del motor.

$$\mathbf{s = (N_{s\ [RPM]} - N_{[RPM]}) / N_{s\ [RPM]}}$$

- Velocidad de motores de continua

La expresión que nos da el valor de la velocidad angular $\omega$ de un motor de corriente continua es:

$$\mathbf{\omega = (U_a - I_a \cdot R_a) / (k_\omega \cdot \phi) = (k_\omega\ \phi\ U_a - T_m\ R_a) / (k_\omega\ \phi)^2}$$

Donde $\mathbf{U_a}$ es la tensión aplicada, $\mathbf{I_a}$ es la corriente del inducido, $\mathbf{R_a}$ es la resistencia del inducido, $\mathbf{T_m}$ es el par motor, $\mathbf{k_\omega}$ es una constante y $\phi$ es el flujo magnético (función de las corrientes en el inducido y en el campo).

Por otro lado, el valor de la velocidad $\mathbf{N_{[RPM]}}$ de un motor de corriente continua en RPM es:

$$\mathbf{N_{[RPM]} = (U_a - I_a \cdot R_a) / (k \cdot \phi) = (k\, \phi\, U_a - T_m R_a) / (k\, \phi)^2}$$

Donde **k** es una constante que depende de las unidades.

- <u>Corrección del factor de potencia</u>

Si una carga inductiva con un consumo de potencia activa **P** y un factor de potencia en atraso sin corregir $\mathbf{\cos\phi_1}$ se quiere llevar a un valor de factor de potencia en atraso corregido $\mathbf{\cos\phi_2}$ , las potencias reactivas sin corregir y corregida $\mathbf{Q_1}$ y $\mathbf{Q_2}$, son respectivamente:

$$\mathbf{Q_1 = P \tan\phi_1 = P\ (1 / \cos^2\phi_1 - 1)^{½}}$$
$$\mathbf{Q_2 = P \tan\phi_2 = P\ (1 / \cos^2\phi_2 - 1)^{½}}$$

La potencia reactiva en adelanto (capacitiva) $\mathbf{Q_C}$ que debe conectarse con la carga es:

$$\mathbf{Q_C = Q_1 - Q_2 = P (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) = P\ [(1 / \cos^2\phi_1 - 1)^{½} - (1 / \cos^2\phi_2 - 1)^{½}]}$$

La potencia activa **P** puede hallarse por medición directa o a partir del cociente entre la energía facturada y el período de facturación.

Las potencias aparentes sin corregir y corregida $\mathbf{S_1}$ y $\mathbf{S_2}$, se relacionan mediante:

$$\mathbf{S_1 \cos\phi_1 = P = S_2 \cos\phi_2}$$

Comparando las corrientes de carga sin corregir y corregida $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$, se tiene:

$$\mathbf{I_2 / I_1 = S_2 / S_1 = \cos\phi_1 / \cos\phi_2}$$

Para capacitores conectados en **estrella**, cada uno con una capacidad $\mathbf{C_{estr}}$ e instalados en derivación en un sistema trifásico con tensión de línea $\mathbf{V_{lin}}$ y frecuencia **f**, la potencia reactiva en adelanto (capacitiva) $\mathbf{Q_{Cestr}}$ y la corriente de línea reactiva $\mathbf{I_{lin}}$ valen:

$$\mathbf{Q_{Cestr} = V_{lin}^2 / X_{Cestr} = 2\pi f\ C_{estr} V_{lin}^2}$$
$$\mathbf{I_{lin} = Q_{Cestr} / \sqrt{3} V_{lin} = V_{lin} / \sqrt{3} X_{Cestr}}$$
$$\mathbf{C_{estr} = Q_{Cestr} / 2\pi f\ V_{lin}^2}$$

Para capacitores conectados en **triángulo**, cada uno con una capacidad $\mathbf{C_{triang}}$ e instalados en derivación en un sistema trifásico con tensión de línea $\mathbf{V_{lin}}$ y frecuencia **f**, la potencia reactiva en adelanto (capacitiva) $\mathbf{Q_{Ctriang}}$ y la corriente de línea reactiva $\mathbf{I_{lin}}$ valen:

$$\mathbf{Q_{Ctriang} = 3V_{lin}^2 / X_{Ctriang} = 6\pi f\ C_{triang} V_{lin}^2}$$
$$\mathbf{I_{lin} = Q_{Ctriang} / \sqrt{3} V_{lin} = \sqrt{3} V_{lin} / X_{Ctriang}}$$
$$\mathbf{C_{triang} = Q_{Ctriang} / 6\pi f\ V_{lin}^2}$$

Nótese que para tener el mismo valor de $\mathbf{Q_C}$:

$$\mathbf{X_{Ctriang} = 3X_{Cestr}}$$
$$\mathbf{C_{triang} = C_{estr} / 3}$$

- <u>Puesta a tierra</u>

La resistencia aproximada $\mathbf{R_j}$ de una jabalina de largo **l** enterrada en un terreno de resistividad eléctrica $\mathbf{G_t}$ (Ohm . m), vale:

$\mathbf{R_j = 0{,}33\ G_t}$ **para jabalinas de 3 m.**

$\mathbf{R_j = 0{,}55\ G_t}$ **para jabalinas de 1,50 m.**

$\mathbf{R_j = G_t / l}$ **para jabalinas de otras longitudes.**

La resistencia aproximada $\mathbf{R_m}$ de una malla de puesta a tierra de área $\mathbf{A_m}$ enterrada en un terreno de resistividad eléctrica $\mathbf{G_t}$ (Ohm . m), es:

$$\mathbf{R_m = 0{,}5\ G_t / (A_m)^{1/2}}$$

- <u>Verificación de la corriente de cortocircuito de cables</u>

La sección de un cable debe satisfacer la siguiente desigualdad:

$$\mathbf{(\ I_{cc}\ .\ (t)^{1/2}\ /\ K\ ) \subseteq S_{[mm^2]}}$$

Donde $\mathbf{I_{cc}}$ es la corriente de cortocircuito, **t** es el tiempo de desconexión de la protección, **K** es un coeficiente que depende de la naturaleza del conductor y de sus temperaturas al principio y al final del cortocircuito y $\mathbf{S_{[mm^2]}}$ es la sección del conductor en mm².

- K = 115 en cables de cobre aislados en PVC
- K = 74 en cables de aluminio aislados en PVC
- K = 143 en cables de cobre aislados en XLPE
- K = 92 en cables de aluminio aislados en XLPE

- <u>Caída de tensión en cables</u>

La caída de tensión que se produce en un cable puede calcularse en base a las siguientes fórmulas aproximadas:

$$\mathbf{\Delta U_{[\%]} = 2\ .\ l\ .\ I\ .\ (r\ .\ \cos\varphi + x\ .\ \mathrm{sen}\,\varphi)\ .\ 100\ /\ U_L}$$ **Para circuitos monofásicos**

$$\mathbf{\Delta U_{[\%]} = \sqrt{3}\ .\ l\ .\ I\ .\ (r\ .\ \cos\varphi + x\ .\ \mathrm{sen}\,\varphi)\ .\ 100\ /\ U_L}$$ **Para circuitos trifásicos**

Donde $\mathbf{\Delta U_{[\%]}}$ es la caída de tensión porcentual, $\mathbf{U_L}$ es la tensión de línea, **l** es la longitud del circuito, **I** es la intensidad de corriente de fase del tramo del circuito, **r** es la resistencia del conductor por unidad de longitud en C.A. a la temperatura de servicio, **x** es la reactancia del conductor por unidad de longitud a la frecuencia de red y **cos φ** es el factor de potencia de la instalación.

Si se tienen **n** consumos iguales uniformemente distribuidos:

$$\mathbf{\Delta U_{[\%]} = \sqrt{3}\ .\ l\ .\ I\ .\ (r\ .\ \cos\varphi + x\ .\ \mathrm{sen}\,\varphi)\ .\ (n+1)\ .\ 50\ /\ (n\ .\ U_L\ )}$$ **Para circuitos trifásicos**

Donde cada consumo toma una corriente **(I / n)** y están equiespaciados a una distancia **(l / n)**.

- Cálculo simplificado de iluminación de interiores

El flujo luminoso total $\phi_T$ en un local de ancho **a** y largo **b** que requiere un nivel de iluminación **E**, vale:

$$\phi_T = E \;.\; a \;.\; b \;/\; (Ku \;.\; Kd)$$

**Ku** es el factor de utilización que depende del tipo de luminarias y de la geometría y colores del local, y orientativamente se puede aproximar a 0,6 para artefactos con louvers y 0,5 para gargantas.

**Kd** es el factor de depreciación que depende del grado de limpieza del ambiente, y vale 0,8 para locales con limpieza facil y 0,5 para locales con limpieza difícil.

El nivel de iluminación **E** se saca de tablas, y por ejemplo vale de 150 a 200 lux en oficinas.

Si se instalan lámparas de flujo luminoso unitario $\phi_L$, entonces la cantidad de lámparas $N_L$ a instalar vale:

$$N_L = \phi_T \;/\; \phi_L = E \;.\; a \;.\; b \;/\; (\phi_L \;.\; Ku \;.\; Kd)$$

- Bombas

La potencia $P_{b\,[HP]}$ en HP de una bomba para un líquido de peso específico $g_{[kg/l]}$ en kg/litro (1 para el agua), de rendimiento $\eta_b$ (0,6 a 0,8 en bombas centrífugas), considerando un caudal de circulación $Q_{[l/h]}$ en litros por hora y una altura manométrica (altura estática mas altura de pérdidas) a vencer **h** en metros, vale:

$$P_{b\,[HP]} = Q_{[l/h]} \;.\; h \;.\; g_{[kg/l]} \;/\; (3600 \;.\; 76 \;.\; \eta_b)$$

Suele tomarse como seguridad un 20% más del valor de potencia calculado.

- Ventilación forzada

El caudal de aire necesario $Q_{a\,[m3/s]}$ en $m^3/s$ de una instalación de ventilación forzada para evacuar una potencia calorífica $P_c$ en W y con un calentamiento del aire de refrigeración $\Delta T_a$ en grados centígrados, vale:

$$Q_{a\,[m3/s]} = 0{,}77\;10^{-3} \;.\; P_c \;/\; \Delta T_a$$

Desde otro punto de vista, el caudal de aire necesario $Q_{a\,[m3/s]}$ en $m^3/s$ de una instalación de ventilación para un local cuyo volumen es de $V_{ol}$ $m^3$ y que requiere $n_{[ren/h]}$ renovaciones de aire por hora (típico 6 a 9), vale:

$$Q_{a\,[m3/s]} = V_{ol} \;.\; n_{[ren/h]} \;/\; 60$$

La potencia $P_{v\,[HP]}$ en HP de un ventilador de rendimiento $\eta_v$ (0,6 o menos), considerando el caudal de circulación $Q_{a\,[m3/s]}$ en $m^3/s$ y una presión de impulsión $p_{i\,[mm\,H2O]}$ en mm de columna de agua, vale:

$$\mathbf{P_{v\,[HP]} = 0{,}01308\ Q_{a\,[m3/s]}\ .\ p_{i\,[mm\ H2O]}\ /\ \eta_v}$$

- <u>Potencia de refrigeración</u>

Como se indicó anteriormente, la potencia eléctrica $\mathbf{P_{ent}}$ en W que toma un equipo con rendimiento porcentual $\eta_{[\%]}$ y que entrega una potencia $\mathbf{P_{[HP]}}$ en HP, vale:

$$\mathbf{P_{ent} = P_{sal}\ /\ \eta = P_{[HP]}\ .\ 745{,}7\ .\ 100\ /\ \eta_{[\%]}}$$

Para trabajar en <u>frigorías</u> (numéricamente iguales a las kcal), y como **1 frig / h = 1,1628 W**, resulta:

$$\mathbf{P_{ent} = P_{sal}\ /\ \eta = P_{[frig/h]}\ .\ 0{,}86\ .\ 100\ /\ \eta_{[\%]}}$$

Sin embargo, en aire acondicionado muchas veces se trabaja con la REE (Relación de Eficiencia de Energía), que es el cociente entre las frigorías por hora y los watt de electricidad que utiliza la unidad; resultando la inversa del rendimiento. Con fines orientativos, digamos que en pequeños equipos toma valores comprendidos entre 1,25 y 1,50.

Por otro lado, las necesidades de refrigeración en oficinas rondan los 70 a 90 frig / h por metro cúbico.

- <u>Máquinas-herramientas</u>

La potencia eléctrica $\mathbf{P_{ent}}$ en W que toma una máquina-herramienta (por ejemplo un torno) que tiene un rendimiento $\eta$, cuyo elemento de corte se desplaza con una velocidad $\mathbf{v_c}$ y ejerce una fuerza de corte $\mathbf{G_c}$, vale:

$$\mathbf{P_{ent} = G_c\ .\ v_c\ /\ \eta}$$

La fuerza de corte $\mathbf{G_c}$, es el producto del esfuerzo específico de corte $\boldsymbol{\sigma_c}$ y de la sección de viruta $\mathbf{S_c}$, y por lo tanto:

$$\mathbf{P_{ent} = \sigma_c\ .\ S_c\ .\ v_c\ /\ \eta}$$

El esfuerzo específico de corte varía con la composición del material y la sección de viruta. Con fines orientativos digamos que vale de 2,5 a 2,8 kgf/mm$^2$ para el acero duro y semiduro.

Si la sección de viruta resulta de $\mathbf{S_{c[mm2]}}$ mm$^2$, el esfuerzo específico de corte es de $\boldsymbol{\sigma_{c[kg\ f/mm2]}}$ kgf/mm$^2$, se tiene una velocidad de corte de **v** m/s y un rendimiento porcentual $\eta_{[\%]}$ entonces:

$$\mathbf{P_{ent} = 980{,}666\ S_{c[mm2]}\ .\ \sigma_{c[kg\ f/mm2]}\ .\ v_c\ /\ \eta_{[\%]}}$$

## <u>4 - Cálculo simplificado de cortocircuitos trifásicos en redes no malladas</u>

- <u>Corriente de cortocircuito</u>

La corriente de cortocircuito $\mathbf{I_{cc}}$ en un lugar de una instalación, con tensión entre fases $\mathbf{V_{lin}}$ e impedancia por fase estrella de cortocircuito $\mathbf{Z_{cc}}$ , vale:

$I_{cc} = V_{lin} / (\sqrt{3} \cdot Z_{cc})$

Donde la impedancia de cortocircuito $Z_{cc}$, con su parte activa $R_{cc}$ y reactiva $X_{cc}$, incluye todas las contribuciones desde los bornes del generador equivalente ideal y el punto de falla trifásica:

$Z_{cc} = (R^2_{cc} + X^2_{cc})^{½}$

- Contribución a la impedancia de cortocircuito de la red

La contribución $Z_{ccR}$ a la impedancia de cortocircuito de toda la red que se encuentra aguas arriba de un punto que se sabe que tiene una potencia de cortocircuito $S_{ccR}$ y con tensión entre fases $V_R$, resulta:

$Z_{ccR} = V^2_R / S_{ccR}$ **estimativamente puede tomarse $S_{ccR}$= 300 MVA para 13,2 kV**

$R_{ccR} = Z_{ccR} \cdot \cos \phi$ **estimativamente puede tomarse $\cos \phi = 0{,}06$**
$X_{ccR} = Z_{ccR} \cdot \operatorname{sen} \phi$

- Contribución a la impedancia de cortocircuito de un transformador

La contribución $Z_{ccT}$ a la impedancia de cortocircuito de un transformador, que tiene una potencia nominal $S_T$, una tensión de cortocircuito porcentual $V_{ccT(\%)}$, unas pérdidas en el cobre porcentuales $P_{cuT(\%)}$ y con tensión entre fases vale $V_T$, puede calcularse con:

$Z_{ccT(\%)} = V_{ccT(\%)}$
$Z_{ccT} = 0{,}01 \cdot V_{ccT(\%)} \cdot V^2_T / S_T$

$R_{ccT(\%)} = P_{cuT(\%)}$
$R_{ccT} = 0{,}01 \cdot P_{cuT(\%)} \cdot V^2_T / S_T$

$X_{ccT} = (Z^2_{ccT} - R^2_{ccT})^{½}$

- Contribución a la impedancia de cortocircuito de un cable

La contribución $Z_{ccC}$ a la impedancia de cortocircuito de un cable de longitud $l_C$, que tiene una resistencia por fase por unidad de longitud $r_C$ y una reactancia por fase por unidad de longitud $x_C$ a frecuencia de red, puede calcularse con:

$Z_{ccC} = (R^2_{ccC} + X^2_{ccC})^{½}$

$R_{ccC} = l_C \cdot r_C$
$X_{ccC} = l_C \cdot x_C$

## 5 - Otras datos complementarios

- Constantes

**R = 8,31434 J / mol K** **constante universal de los gases**

**$g_n$ = 9,80666 m / $s^2$** **aceleración de la gravedad normal**

**atm = 760 mm Hg = 101325 N / $m^2$** **presión atmosférica normal**
**atm = 1013,25 mbar = 1013,25 hPa**

- Conversión de unidades británicas

**1 pulgada = 25,4 mm = 0,0254 m**
**1 milla = 1609,344 m**
**1 libra = 0,45359 kgf = 4,4482 N**

**1 circular mil = 5,06707 $10^{-4}$ $mm^2$ = 5,06707 $10^{-10}$ $m^2$**

**grados Centígrados = (grados Fahrenheit - 32) . 5 / 9**