

voltimum

CONCEITOS DE SUBESTAÇÕES DE MUITO ALTA, ALTA E MÉDIA TENSÃO – MANUAL



**Fascículo 5 – Cálculos e
Dimensionamentos**

**Autor
Manuel Bolotinha**

CONCEITOS DE SUBESTAÇÕES DE MUITO ALTA, ALTA E MÉDIA TENSÃO – MANUAL

AUTOR: Manuel Bolotinha¹, MSc – Engenheiro Electrotécnico

Fascículo 5 – Cálculos e Dimensionamentos

¹ O Autor **não** segue o Novo Acordo da Língua Portuguesa

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS E FIGURAS	4
SIGLAS E ACRÓNIMOS	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	6
2.1. O QUE É UM CURTO-CIRCUITO?	6
2.2. TIPOS DE DEFEITOS	7
2.3. CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	8
2.4. COMPONENTES SIMÉTRICAS	9
2.5. IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DOS ELEMENTOS DA REDE	10
2.7. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS E MECÂNICAS DE BARRAS E TUBOS CONDUTORES	14
2.9. EXEMPLO DE APLICAÇÃO – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	17
DESAFIO	19
3. DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS DAS SE	20
3.1. INTRODUÇÃO	20
3.2. BARRAMENTOS RÍGIDOS	20
3.3. BARRAMENTOS TENDIDOS	22
4. REDE DE TERRAS	24
BIBLIOGRAFIA	27

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Lista de tabelas

Descrição
<i>Capítulo 2</i>
Tabela 1 – Valores do factor de tensão (c)
Tabela 2 – Valores típicos de u_k
Tabela 3 – Valores típicos de u_R
Tabela 4 – Valores típicos de Z_0
Tabela 5 – Características da barra de cobre
Tabela 6 – Características da barra de alumínio
Tabela 7 – Características do tubo de cobre
Tabela 8 – Características do tubo de alumínio
Tabela 9 – Valor máximo de σ_{02}
<i>Capítulo 4</i>
Tabela 10 – Valores típicos de ρ

Lista de figuras

Descrição
<i>Capítulo 2</i>
Figura 1 – Circuito entre fase e neutro, em situação normal (a) e com curto-circuito (b)
Figura 2 – Diagramas de curto-circuito
Figura 3 – Componentes simétricas
Figura 4 – Diagrama em π de uma linha aérea
Figura 5 – Factores de correcção da temperatura
Figura 6 – Esquema unifilar simplificado
Figura 7 – Diagrama de impedâncias
<i>Capítulo 3</i>
Figura 8 – Factor “m”
Figura 9 – Factor “n”
Figura 10 – Gráfico de ζ

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC – *Alternating Current*

Al – Símbolo químico do alumínio

AT – Alta Tensão

C – Corrigenda

ca – Corrente Alternada

cc – Corrente Contínua

Cu – Símbolo químico do cobre

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *International Electrical and Electronic Engineers (USA)*.

RSLEAT – Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão

RSSPTS – Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e Seccionamento

SE – Subestação

1. INTRODUÇÃO

Neste **Fascículo** serão abordados os seguintes temas:

- Correntes de curto-circuito
- Dimensionamento de barramentos das SE (rígidos e flexíveis)
- Rede de terras

2. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

2.1. O QUE É UM CURTO-CIRCUITO?

Os **curto-circuitos** são os *defeitos nas instalações eléctricas* que **mais ocorrem** e que **mais acidentes provocam**, quer nas *pessoas* quer nos *equipamentos*, e têm como principal causa a existência de um **contacto**, *franco ou não*, entre **dois elementos condutores** que se encontram a **potenciais diferentes**, verificando-se *consequentemente* uma **drástica redução da resistência** da instalação.

Veja-se como se comporta um *circuito eléctrico* de *Baixa Tensão* em que ocorre um **curto-circuito**, que por facilidade de explicação se admite **sólido** (ver Capítulo 2.1).

Atente-se na Figura 1, onde se representa um *circuito eléctrico* estabelecido entre uma *fase (F)* e o *neutro (N)*, alimentando uma *carga* com uma *resistência* R_{CG} com uma *tensão aplicada*, U , sendo R_c a *resistência do cabo* do circuito:

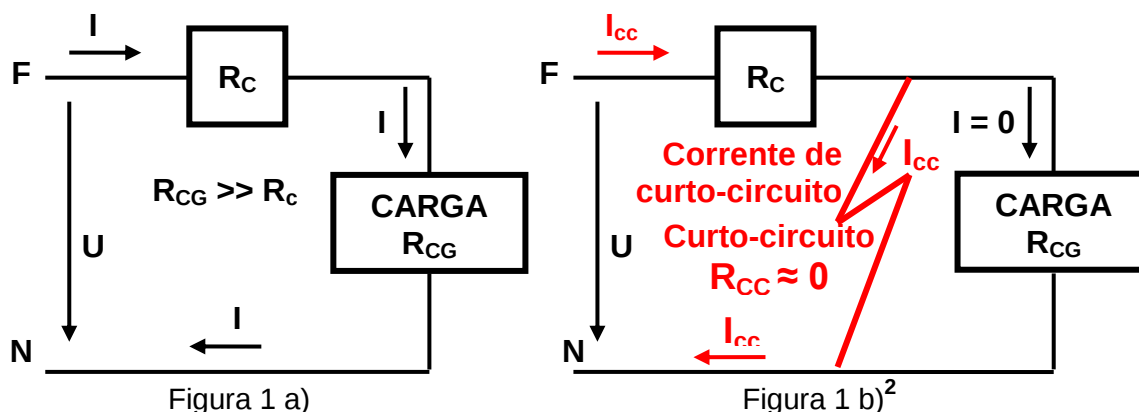


Figura 1 – Circuito entre fase e neutro, em situação normal (a) e com curto-circuito (b)

Sabe-se que num *circuito*, aplicando a **lei de Ohm**:

$$U = R \times I \iff I = U/R$$

No exemplo anteriormente referido, têm-se:

Na Figura 1a): $U = (R_c + R_{CG}) \times I \iff I = U/(R_c + R_{CG})$

Na Figura 1b): $U = R_c \times I_{cc} \iff I_{cc} = U/R_c$

Pode-se assim concluir que:

² A corrente através da carga é = 0, porque a corrente eléctrica escolhe sempre o caminho mais fácil e nesta situação $R_{cc} \ll R_{CG}$.

$$I_{cc} \gg I$$

Da expressão anterior constata-se que devido ao **curto-circuito**, verifica-se um **grande aumento da corrente** no *circuito*, que *assume valores geralmente elevados*, da ordem dos **kA** (*dependendo do valor da tensão da rede e da impedância da malha de defeito* pode atingir valores $\approx 80-90$ kA) que é **responsável** pelas *consequências gravosas deste tipo de defeito nas instalações eléctricas*.

2.2. TIPOS DE DEFEITOS

Os **defeitos** numa rede eléctrica podem classificar-se como **activos** e **passivos**.

Um defeito *activo* acontece devido a curto-circuitos na instalação, e a principal causa dos defeitos *passivos* são sobrecargas, sub e sobre tensões e frequências e oscilações de cargas.

Os *defeitos activos* podem classificar-se como **sólidos** e **incipientes**. Um defeito *sólido* acontece quando existe um contacto franco entre dois elementos em tensão ou entre um elemento em tensão e a terra, e é *incipiente* quando esse contacto não é franco.

A experiência mostra que, habitualmente, um defeito *incipiente*, se não eliminado em tempo útil, evolui para um defeito *sólido*.

Os *defeitos de curto-circuito*, cujos *diagramas* simplificados se representam na Figura 2, têm como principais causas:

- **Ruptura dieléctrica³ dos materiais isolantes** (*envelhecimento, condições severas de sobreaquecimento e sobretensões, acções mecânicas intensas e corrosão química estão entre as principais causas deste fenómeno*).
- **Diminuição das distâncias de segurança e de isolamento.**
- **Descargas parciais** (*efeito de coroa*).

³ A **ruptura dieléctrica** de um **material isolante** acontece quando o **valor do campo eléctrico** a que fica submetido é **muito intenso**, tornando esse material **condutor**. Para o ar, essa *ruptura* ocorre para *campos eléctricos* da ordem de 3×10^6 V/m. Diz-se que, nestas circunstâncias, se dá uma **disrupção**.

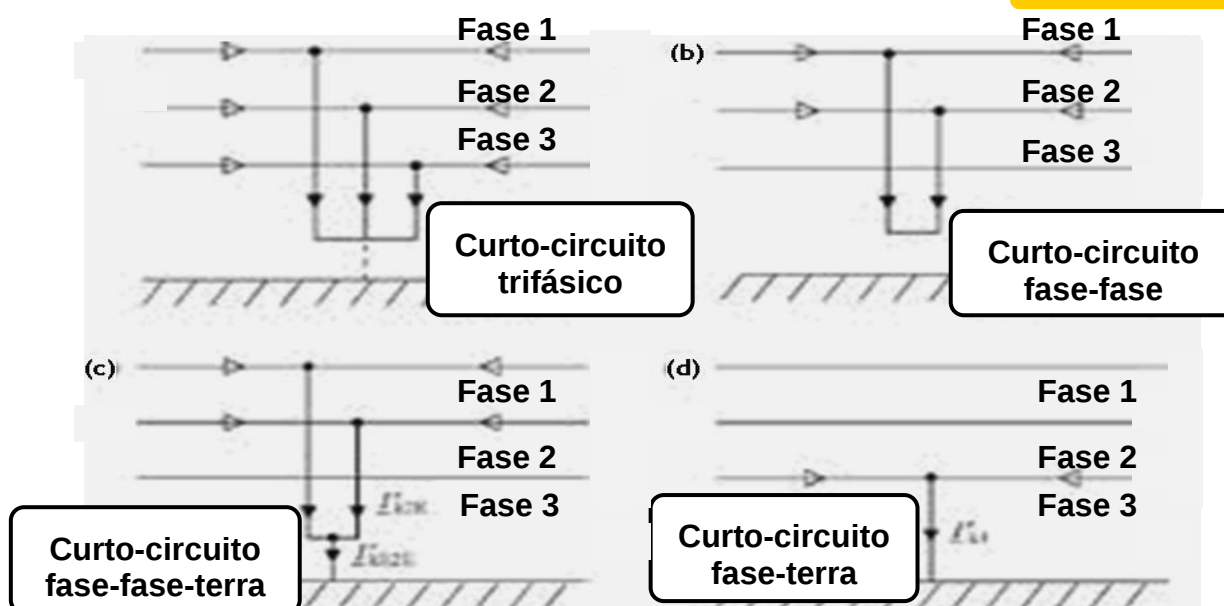


Figura 2 – Diagramas de curto-circuito

Os *curto-circuitos* **fase-fase** e **fase-fase-terra** podem **evoluir** para um **curto-circuito trifásico**, devido à **ruptura dielétrica** causada pelo *elevado valor das correntes de defeito*.

Defeitos simétricos e assimétricos

Quando o curto-circuito envolve igualmente as **três fases**, o defeito é classificado como **simétrico**.

Contudo, a maior parte dos defeitos afecta apenas duas fases, sendo mais frequentes os curto-circuitos **fase-terra**, **fase-fase** e **fase-fase-terra**, designando-se este tipo de defeitos por **assimétrico** (*no caso das linha aéreas apenas cerca de 5% dos defeitos são simétricos*).

As principais causas dos *defeitos assimétricos* são:

- *Fase-fase e fase-fase-terra*: ionização do meio ou contacto accidental entre as fases (exemplo: rotura de um isolador).
- *Fase-terra*: contacto accidental entre uma fase e terra (exemplo: rotura de um isolador), ou fenómenos de descargas atmosféricas.

Acontece que em alguns *defeitos* se dá a **ruptura de um condutor**, com ou sem contacto com a terra, dando origem a um “**circuito aberto**”, situação que dificulta a **detecção do defeito** (*não há circulação de corrente*), e que pode causar **desequilíbrio de cargas na rede e sobreaquecimento dos geradores**.

2.3. CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

As **fórmulas** utilizadas para **cálculo das correntes de curto-circuito**, de acordo com a *Norma IEC 60909* são:

Curto-circuito entre fases

- *Trifásico*
 - $I''_{k3} = c x U_n / (\sqrt{3} x Z_d)$ – máximo

- $I''_{k3} = c x U_n / (\sqrt{3} x Z_d) - \text{mínimo}$
- Fase-fase
 - $I''_{k2} = c x U_n / (Z_d + Z_i) = c x U_n / (2 x Z_d) - \text{máximo}$
 - $I''_{k2} = c x U_n / (Z_d + Z_i) = c x U_n / (2 x Z_d) - \text{mínimo}$

Curto-circuito entre fase-terra

- $I''_{k1} = c x U_n / (Z_d + Z_i + Z_0) = c x U_n / (2 x Z_d + Z_0) - \text{máximo}$
- $I''_{k1} = c x U_n / (Z_d + Z_i + Z_0) = c x U_n / (2 x Z_d + Z_0) - \text{mínimo}$

Onde⁴:

- Z_d : Impedância directa ou síncrona equivalente, no ponto de defeito
- Z_i : Impedância inversa equivalente, no ponto de defeito.
- Na prática faz-se $Z_d = Z_i$
- Z_0 : Impedância homopolar equivalente, no ponto de defeito
- c – Factor de tensão

Tabela 1 – Valores do factor de tensão (c)

Tensão nominal da rede U_n (kV)	Valor do factor c	
	I''_{k3} máximo	I''_{k3} mínimo
Baixa Tensão ($U_n \leq 1$ kV)	1,05-1,10	0,95
Média Tensão $1 < U_n \leq 35$ kV	1,10	1,00
Muito Alta e Alta Tensão $U_n > 35$ kV		

Os **valores máximos** são usados para o *dimensionamento dos equipamentos*, enquanto os **valores mínimos** são normalmente utilizados para a *definição dos set-points das protecções e para os estudos de selectividade e coordenação de protecções*.

2.4. COMPONENTES SIMÉTRICAS

As redes e equipamentos têm uma impedância interna que pode ser dividida em **três componentes simétricas**, associadas à **rotação do campo electromagnético**, que no caso de um sistema não equilibrado são as seguintes:

- *Componente directa ou síncrona* (X_d / Z_d) – o campo electromagnético gira no **sentido dos ponteiros do relógio**, com uma **desfasagem entre fases de 120°**.
- *Componente inversa* (X_i / Z_i) – o campo electromagnético gira no **sentido contrário ao dos ponteiros do relógio**, sendo a **desfasagem igualmente 120°**.

⁴ Ver Capítulo 2.4.

- *Componente homopolar (X_0 / Z_0)* – o campo electromagnético é **estático e não há desfasagem entre fases**.

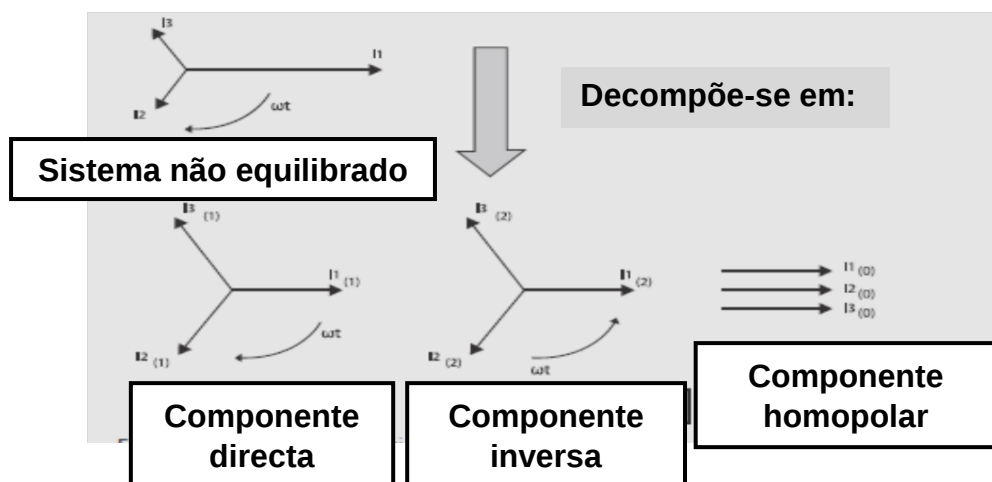


Figura 3 – Componentes simétricas

O sistema é **dividido nas suas componentes simétricas**, resolvendo-se individualmente cada sistema, **sobrepondo-se os resultados** para se obter a solução final.

Os valores de cada uma das componentes são habitualmente fornecidos pelos fabricantes, sendo *prática comum*, para equipamento estático, não rotativo, considerar a **componente inversa igual à componente directa** ($X_d = X_i$ / $Z_d = Z_i$).

A **componente homopolar** varia com o método de ligação à terra do neutro da instalação e com o tipo de equipamento.

2.5. IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DOS ELEMENTOS DA REDE

As impedâncias equivalentes dos equipamentos e da rede a montante são:

Geradores

- $Z_G = R_G + jX''_G = R_G + j(x''_G(\%) \times U_G^2 / (100 \times S_G))$
- $R_G = 0,05 \times X''_G$ ($S_G \geq 100$ MVA)
- $R_G = 0,07 \times X''_G$ ($S_G < 100$ MVA)

Rede a montante

- $Z_N = R_N + jX_N$
- $|Z_N| = 1,1 \times U_n / \sqrt{3} \times I''_{k3}$ ou $|Z_N| = 1,1 \times U_n^2 / S''_{k3}$
- $R_N = 0,1 - 0,15 \times X_N$ (valor empírico)

Transformadores e reactâncias

- $Z_T = R_T + jX_T$
- $|Z_T| = u_k(\%) \times U_n^2 / 100 \times S_n$
- $R_T = P_{cu} / (3 \times I_n^2)$
- $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$

Motores

- $Z_M = jX_M$
- $X_M = U_n / ((I_{start}/I_n) \times \sqrt{3} I_n)$
- $I''_{KM} = 1,1 \times U_n / \sqrt{3} X_M$

Cabos

- $Z_C = \rho_{20^\circ C} x l / s + j 2 \pi x f x L$
- $R_C = \rho_{20^\circ C} x l / s$
- $X_C = 2 \pi x f x L$
- $|Z_C| = \sqrt{(\sum R_C^2 + \sum X_C^2)}$

Linhas aéreas

Para efeitos de cálculo, uma linha aérea pode ser representada pelo **diagrama em π** .

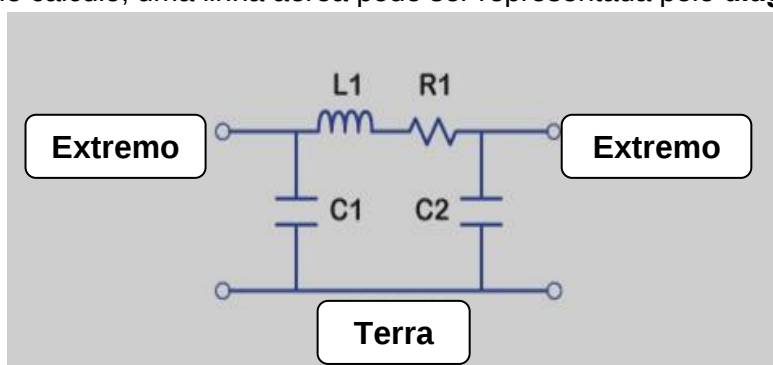


Figura 4 – Diagrama em π de uma linha aérea

Este diagrama é considerado **rigoroso** para *linhas com comprimentos até 200 km*; para comprimentos superiores é necessário considerar vários diagramas em π , associados em série.

Nas *linhas MAT e AT* a *resistência dos condutores* é habitualmente **desprezável** quando *comparada com a reactância indutiva*, ao **contrário do que sucede** nas *linhas BT e MT*.

No cálculo de *correntes de curto-circuito* que **não envolvam defeitos à terra**, a *reactância capacitiva* não é considerada.

As **impedâncias equivalentes** de uma *linha aérea* são calculadas de acordo com as seguintes expressões:

- $R_{LA} = (\rho_{20^\circ C} x l_1 / s) - \Omega$
- $X_{LA} = 2 \pi x f x (\mu_0 / 2 \pi) x (\log_n (d/r_e) + (1/4 x n)) - \Omega/km$ (*linha simples*)
- $X_{LA} = 2 \pi x f x (\mu_0 / 2 \pi) x (\log_n (d x d' / r_e x d'') + (1/4 x n)) - \Omega/km$ (*linha dupla*)
 - $d = \sqrt[3]{(d_{12} \times d_{23} \times d_{31})}$
 - $d' = \sqrt[3]{(d'_{12} \times d'_{23} \times d'_{31})}$
 - $d'' = \sqrt[3]{(d''_{11} \times d''_{22} \times d''_{33})}$
- $|Z_{LA}| = \sqrt{(\sum R_{LA}^2) + (\sum X_{LA}^2)}$

Impedância equivalente total

- $Z_d = \sqrt{(\sum R^2) + (\sum X^2)}$

Legenda

- d, d', d'' : Média geométrica das distâncias entre as três fases da linha aérea
- $d''_{11}, d''_{22}, d''_{33}$: Distância entre as fases 1 (2 e 3) da linha 1 e da linha 2 [mm]
- d_{12}, d'_{12} : Distância entre os condutores das fases 1 e 2 (linha 1 e linha 2) [mm]
- d_{23}, d'_{23} : Idem fases 2 e 3 [mm]
- d_{31}, d'_{31} : Idem fases 3 e 1 [mm]
- f : Frequência [Hz]
- $I''k_3$: Corrente de curto-circuito [A]
- I_n : Corrente nominal [A]
- l : Comprimento do cabo [m]
- L : Inductância [H]
- l_1 : Comprimento da linha aérea [m]
- $\log_n$: Logaritmo natural (ou neperiano)
- n : Número de condutores individuais que constituem o cabo
- P_{cu} : Perdas no cobre do transformador [W]
- R : Resistência [Ω]
- r_e : Raio equivalente do feixe de condutores do cabo [mm]
- s : Secção do condutor [mm²]
- S''_{k3} : Potência de curto-circuito [MVA]
- S_G : Potência aparente nominal do gerador ($S_G = P_G/0,85$)
- S_n : Potência nominal [kVA]
- U_G : Tensão nominal do gerador [kV]
- u_k : Tensão de curto-circuito do transformador (também pode ser representada por u_{cc}) [%]
- U_n : Tensão nominal [kV]
- X : Reactância
- X'' : Reactância sub-transitória
- x''_G : Reactância sub-transitória relativa do gerador
- Z : Impedância
- Z_0 : Impedância homopolar

- Z_d : Impedância síncrona
- μ_0 : Permeabilidade magnética espacial [$4\pi \times 10^{-4}$ H/km]
- ρ : Resistividade
 - $\rho_{20^\circ\text{C}} = 1/33 \text{ } \Omega \cdot \text{m/mm}^2 - \text{Al}$
 - $\rho_{20^\circ\text{C}} = 1/56 \text{ } \Omega \cdot \text{m/mm}^2 - \text{Cu}$
- $|Z|$: Módulo de Z

No caso de *algumas (ou todas) impedâncias equivalentes não serem conhecidas*, situação que surge normalmente na fase de **Estudo Prévio**, podem utilizar-se **valores típicos**, que se indicam seguidamente.

a) Geradores

Valores típicos: $9\% \leq x''_G \leq 22\%$

É habitual assumirem-se valores entre **10% e 15%**.

b) Valores Típicos de u_k de Transformadores e de Reactâncias

Tabela 2 – Valores típicos de u_k

Tensão nominal primária (kV)	u_k (%)
5-20	3,5-8
30	6-9
60	7-10
110	9-12
220	10-14
400	10-16

Quando as **perdas no cobre não são conhecidas**, pode-se utilizar a seguinte aproximação:

$$R_T = u_R [\%] \times U_n^2 / (100 \times S_n)$$

Onde U_n e S_n são a *tensão e potência nominais*, respectivamente, e u_R é a *queda de tensão interna óhmica*.

Os *valores típicos* de u_R para **transformadores e reactâncias** são os seguintes:

Tabela 3 – Valores típicos de u_R

Potência nominal (MVA)	u_R (%)
0,25	1,4-1,7
0,63	1,2-1,5
2,5	0,9-1,1
6,3	0,7-0,85
12,5	0,6-0,7
31,5	0,5-0,6
> 31,5	< 0,5

c) *Valores Típicos de Impedâncias Homopolares*

Tabela 4 – Valores típicos de Z_0

Equipamento	Z_0
Transformadores e Reactâncias	
Sem ligação do neutro	∞ (infinito)
Yyn ou Zyn	10 a $15X_d$
Dyn ou YNyn	X_d
Dzn ou Yzn	0,1 a $0,2X_d$
Máquinas Rotativas	
Síncronas	$0,5Z_d$
Assíncronas	zero
Linhas Aéreas e Cabos	$3Z_d$

2.7. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS E MECÂNICAS DE BARRAS E TUBOS CONDUTORES

Para permitir efectuar o **cálculo dos barramentos rígidos** das SE indicam-se, nas Tabelas 5 a 9, as **características eléctricas e mecânica** de *barras e tubo de Cu e Al*.

Tabela 5 – Características da barra de cobre

Dimensões (mm)	Secção (mm ²)	Peso (kg/m)	Classe do material	Corrente admissível (A)		Valores estáticos			
						 F		 F	
				Pintado	Nu	W (cm ³)	J (cm ⁴)	W (cm ³)	J (cm ⁴)
15x3	44,5	0,21	F 37	185	170	0,113	0,084	0,023	0,003
20x5	99,1	0,88	F 30	325	295	0,333	0,333	0,083	0,021
25x5	124	1,11		395	350	0,521	0,651	0,104	0,026
30x5	149	1,33		450	400	0,750	1,130	0,125	0,031
40x5	199	1,77		600	520	1,330	2,670	0,167	0,042
40x10	399	3,55	F 25	850	760	2,670	5,330	0,667	0,333
50x5	249	2,22	F 30	720	630	2,080	5,210	0,208	0,052
50x10	499	4,44	F 25	1030	920	4,170	10,400	0,833	0,417
60x10	599	5,33		1200	1060	6,000	18,000	1,000	0,500
80x10	799	7,11		1560	1380	10,700	42,700	1,330	0,667
100x10	999	8,89		1880	1700	16,700	83,300	1,670	0,833
160x10	1600	10,70		2800	2500	42,700	341,000	2,670	1,330

Tabela 6 – Características da barra de alumínio

Dimensões (mm)	Secção (mm ²)	Peso (kg/m)	Classe do material	Corrente admissível (A)		Valores estáticos			
						 F		 F	
				Pintado	Nu	W (cm ³)	J (cm ⁴)	W (cm ³)	J (cm ⁴)
15x3	44,5	0,12	F 11	150	115	0,113	0,084	0,023	0,003
20x5	99,1	0,27		260	195	0,333	0,333	0,083	0,021
25x5	124	0,34		310	230	0,521	0,651	0,104	0,026
30x5	149	0,40		360	270	0,750	1,130	0,125	0,031
40x5	199	0,54		460	350	1,330	2,670	0,167	0,042
40x10	399	1,08	F 10	670	515	2,670	5,330	0,667	0,333
50x5	249	0,67		560	425	2,080	5,210	0,208	0,052
50x10	499	1,35		820	625	4,170	10,400	0,833	0,417
60x10	599	1,62		960	730	6,000	18,000	1,000	0,500
80x10	799	2,16	F 9	1250	940	10,700	42,700	1,330	0,667
100x10	999	2,70		1520	1150	16,700	83,300	1,670	0,833
100x15	1500	4,04		1850	1450	25,000	125,000	3,750	2,810
160x10	1600	4,32	F 6,5	2300	1750	42,700	341,000	2,670	1,330
160x15	2400	6,47		2750	2100	64,000	512,000	6,000	4,500
200x15	3000	8,09		3300	2550	100,00	1,000,00	7,500	5,630

Tabela 7 – Características do tubo de cobre

Diâmetro exterior (mm)	Espessura (mm)	Secção (mm ²)	Peso (kg/m)	Classe do material	Corrente admissível – condutor nu (A)		Valores estáticos	
							W (cm ³)	J (cm ⁴)
20	4	201	1,01	F 30	430	500	0,684	0,684
32	3	273	2,43		640	800	1,820	2,900
	4	352	3,13		730	910	2,200	3,520
40	3	349	3,10		790	950	3,000	6,000
	4	452	4,03		900	1080	3,710	7,420
	5	550	4,89		1000	1190	4,290	8,580
50	4	578	5,15		1120	1310	6,160	15,400
	5	707	6,29		1240	1450	7,240	18,100
63	4	741	6,60		1400	1610	10,300	32,400
	5	911	8,11		1540	1780	12,300	38,600
	6	1060	9,56	F 25	1670	1930	14,000	44,100

Tabela 8 – Características do tubo de alumínio

Diâmetro exterior (mm)	Espessura (mm)	Secção (mm ²)	Peso (kg/m)	Classe do material	Corrente admissível – condutor nu (A)		Valores estáticos	
					Interior	Exterior	W (cm ³)	J (cm ⁴)
32	3	273	0,74	F 10	480	640	1,820	2,900
	4	352	0,95		550	730	2,200	3,520
40	3	349	0,94		590	760	3,000	6,000
	4	452	1,22		670	860	3,710	7,420
	5	550	1,48		740	950	4,290	8,580
50	4	578	1,56		830	1050	6,160	15,400
	5	707	1,91		920	1160	7,240	18,100
	6	829	2,24		990	1250	8,160	20,100
63	4	741	2,00		1030	1290	10,300	32,400
	5	911	2,46		1140	1430	12,300	38,600
	6	1060	2,90		1230	1550	14,000	44,100

As **correntes admissíveis** indicadas nas Tabelas 5 a 8 consideram uma *temperatura ambiente* de **35 °C** e uma *temperatura final do condutor* de **65 °C**. Para outras condições devem ser aplicados os **factores de correcção (K)** indicados na Figura 4, onde θ_1 é a temperatura ambiente e θ_2 é a temperatura final do condutor.

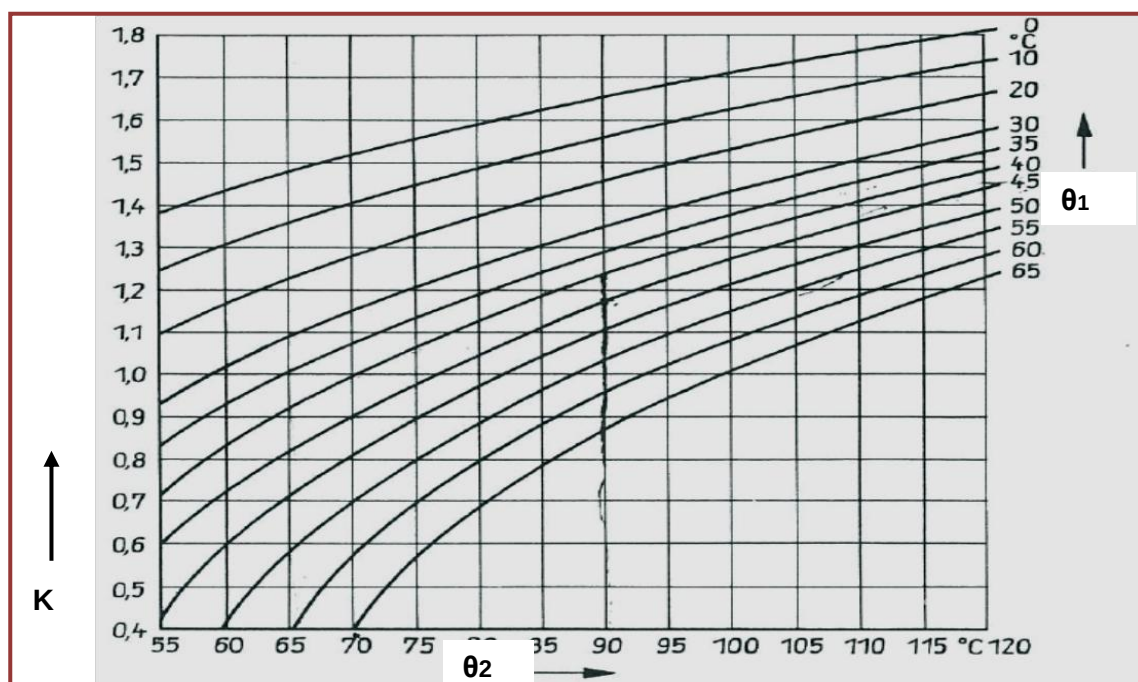


Figura 5 – Factores de correcção da temperatura

O valor máximo da tensão mecânica admissível (σ_{02}) depende do tipo e natureza do material, estando indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valor máximo de σ_{02}

Material		σ_{02} N ⁵ /mm ²
Cobre	Classe	
	F 25	290
	F 30	360
	F 37	400
Alumínio	Classe	
	F 6,5	80
	F 9	100
	F 10	120
	F 11	140

2.9. EXEMPLO DE APLICAÇÃO – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Considere-se a instalação cujo *esquema unifilar simplificado* se representa na Figura 5. Pretende-se calcular a **corrente de curto-circuito** no *barramento* de 10 kV.

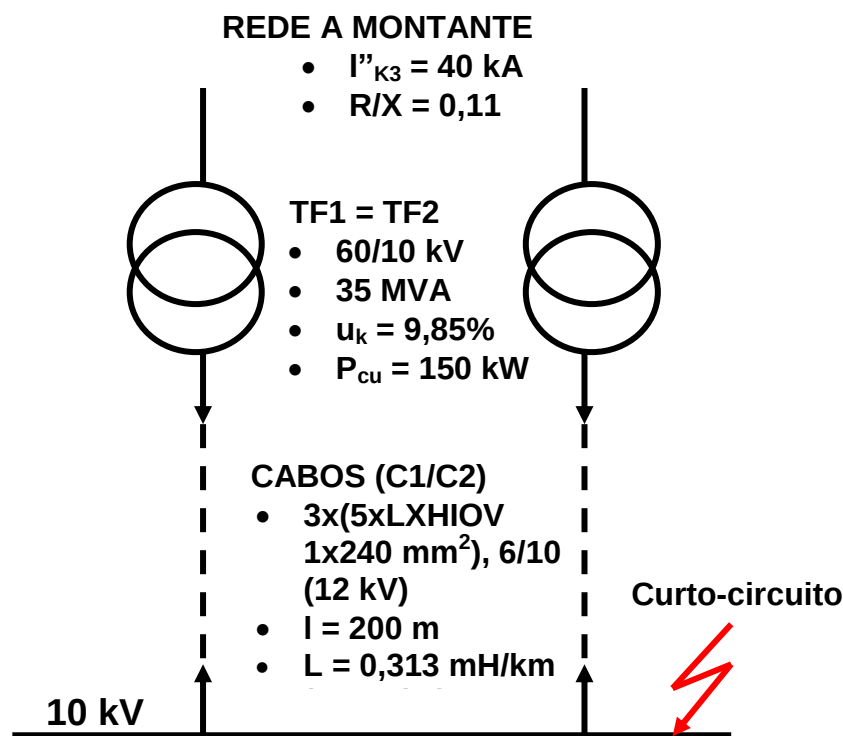


Figura 6 – Esquema unifilar simplificado

Estabeleça-se o **diagrama das impedâncias** a *montante do defeito*, o que se representa na Figura 6.

⁵ 1 N = 0,102 kg

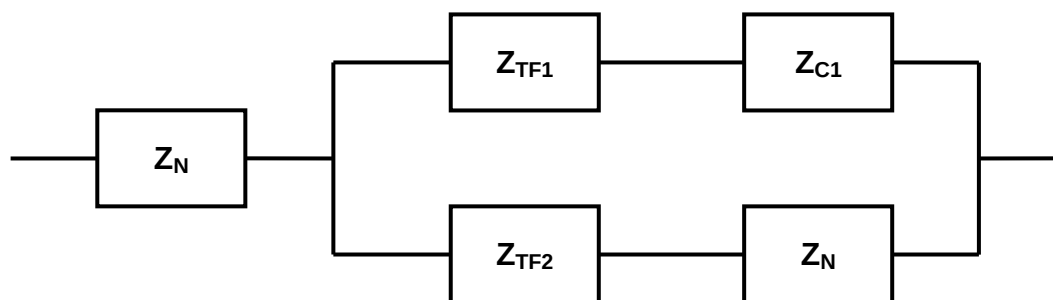


Figura 7 – Diagrama de impedâncias

Calcule-se agora o valor das impedâncias, na forma $R+jX$.

Rede a montante

$$|Z_N| = 1,1xU_n / \sqrt{3}I''k_3 = 1,1x10x10^3 / \sqrt{3}x40x10^3 \approx 0,159 \Omega$$

$$|Z_N| = \sqrt{(R_N^2 + X_N^2)} = \sqrt{((0,11X_N)^2 + X_N^2)} = X_N \times \sqrt{(1+0,11^2)}$$

$$X_N = 0,16 / \sqrt{(1+0,11^2)} \approx 0,158 \Omega$$

$$R_N = 0,11X_N \approx 0,017$$

$$Z_N = 0,017 + j0,158 \Omega$$

Transformadores

$$|Z_{TF1}| = |Z_{TF2}| = |Z_T| = u_k(\%)xU_n^2 / 100xS_n = 9,85x(10x10^3)^2 / 100x35x10^6 \approx 0,281 \Omega$$

$$I_2 = S_n / (\sqrt{3}xU_n) = 35x10^6 / (\sqrt{3}x10x10^3) \approx 2021 \text{ A}$$

$$R_T = P_{cu} / 3I_n^2 = 150x10^3 / (3x2021^2) \approx 0,012 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} \approx \sqrt{(0,281^2 - 0,012^2)} \approx 0,280 \Omega$$

$$Z_T = 0,012 + j0,280 \Omega$$

Cabos⁶

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C = (1/5)x \rho_{20^\circ C} x l / s = 1/5x((1/33)x200/240) \approx 0,005 \Omega$$

$$X_{C1} = X_{C2} = X_C = (1/5)x2x\pi x f x L = (1/5)x100x\pi x 0,313x10^{-3}x0,2 \approx 0,004 \Omega$$

$$Z_C = 0,005 + j0,004 \Omega$$

Transformador TF1 + Cabo C1 – Z_1 = Transformador TF2 + Cabo C2 – Z_2

$$Z_1 = Z_2 = Z = (R_T+R_C) + j(X_T+X_C) = (0,012+0,005) + j(0,280+0,004) = 0,017 + j0,284 \Omega$$

Daqui resulta que:

$$Z_1 // Z_2 = Z/2 = Z_{//} \approx 0,009 + j0,142 \Omega$$

A impedância total do defeito é:

$$Z_d = Z_n + Z_{//} = (0,017+0,017) + j(0,158+0,284) = 0,034 + j0,442 \Omega$$

$$|Z_d| = \sqrt{(0,034^2 + 0,442^2)} \approx 0,443 \Omega$$

⁶ Os valores de R_{C1} , R_{C2} , X_{C1} e X_{C2} são 1/5 da resistência e da reactância indutiva de cada um dos cabos LXHIOV 1x240 mm² uma vez que são instalados 5 cabos por fase.

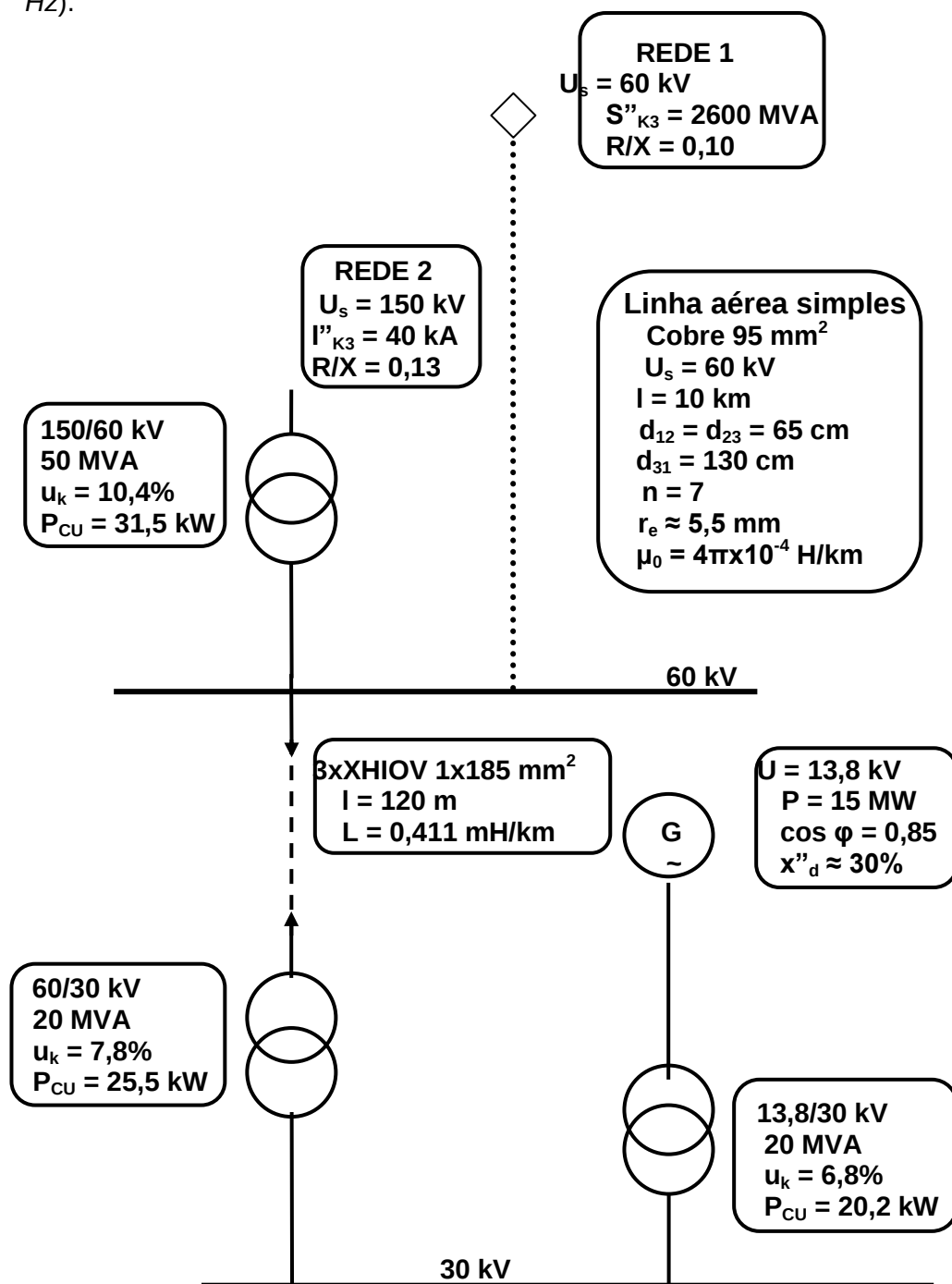
O valor da *corrente de curto-circuito* nos **10 kV** é pois:

$$I''_{k3} = 1,1 \times U_n / (\sqrt{3} \times Z_d) = 1,1 \times 10 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 0,443)$$

$$I''_{k3} \approx 14,3 \text{ kA}$$

DESAFIO

Calcule o valor da **corrente de curto-circuito** no **barramento de 60 kV** ($f = 50$ Hz).



3. DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS DAS SE

3.1. INTRODUÇÃO

Os *curto-circuitos* causam nos equipamentos **esforços térmicos e electrodinâmicos**. Os *esforços térmicos* resultam do **sobreaquecimento** dos *cabos e condutores* (por efeito de **Joule**), podendo dar origem a **ruptura do isolamento e à fusão dos materiais condutores**. Os **esforços electrodinâmicos** são o resultado da **força electromagnética**, que é **proporcional ao valor da corrente**.

Os **barramentos** devem ser dimensionados, tendo não só em atenção a *corrente de serviço*, mas também os **esforços térmicos e electrodinâmicos da corrente de curto-circuito**, calculados de acordo com a *Norma IEC 60865-1 e 2*.

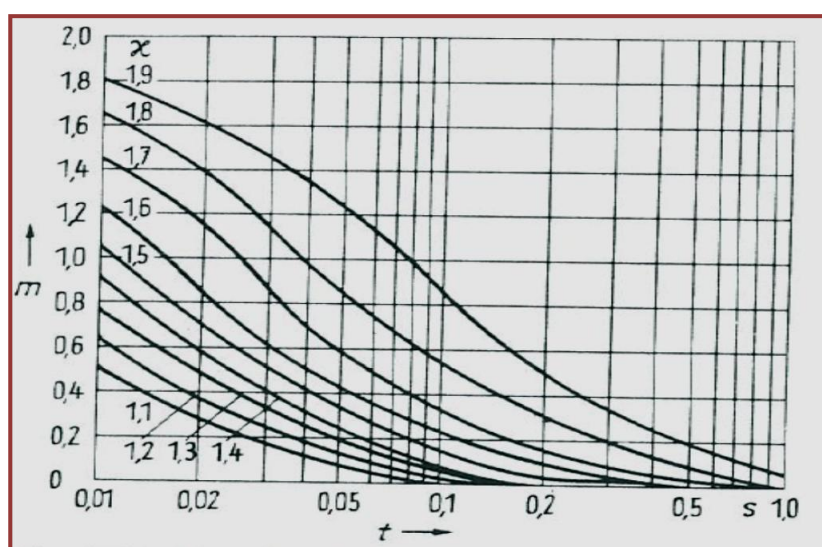
3.2. BARRAMENTOS RÍGIDOS

Esforço térmico

- $I_{th} = I''_{k3} \chi \sqrt{(m+n)}$
- $s [mm^2] = (I_{th} / \alpha) \chi \sqrt{(t/\Delta\theta)}$

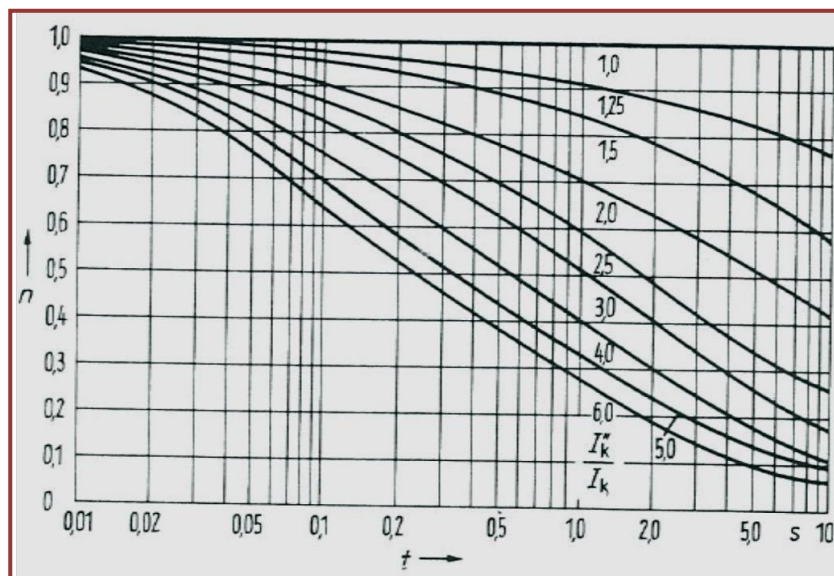
Onde:

- I''_{k3} : Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico [kA]
- I_{th} : Corrente de curto-circuito de curta duração [kA]
- m : Factor que traduz o efeito de aquecimento da componente cc (ver Figura 8)
- n : Factor que traduz o efeito de aquecimento da componente ca (ver Figura 9)
- s : Secção do condutor [mm²]
- t : Tempo de duração do defeito [s]
- α : **13** para condutores de *Cu* e **8,5** para condutores de *Al*
- $\Delta\theta$: Aumento de temperatura [°C]



- 1) t é o tempo de defeito
- 2) É habitual fazer-se $\chi = 1,8$

Figura 8 – Factor “m”



1) t é o tempo de defeito

2) I_k é o valor mantido da corrente de curto-circuito; numa rede estável $I_k''/I_k=1$.

Figura 9 – Factor “n”

Esforço electrodinâmico

- $I_s = 1,8 \times \sqrt{2} I_k''$
- $\sigma_{\max} \leq \sigma_{02}$
- $\sigma_{\max} [\text{N/mm}^2] = M_{\max} / W$ (W : mm^3)
- $M_{\max} [\text{Nmm}] = F \times l / 12$ (l : mm)
- $F [\text{N}^7] = 2,2 \times 10^7 \times I_s^2 \times \left(\sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - \frac{d}{l} \right)$ (d : mm)

Onde:

- d : Distância entre fases
- F : Esforço electrodinâmico
- I_k'' : Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico
- I_s : Corrente de curto-circuito (valor de pico)
- l : Comprimento do vão
- M : Momento da força
- W : Módulo de secção do condutor [cm^3]
- σ_{02} : Valor máximo da tensão mecânica admissível pelo material do barramento
- $\sigma_{\max}$: Valor máximo da tensão mecânica no condutor devido ao curto-circuito

Frequência de ressonância

- $f_r = 112 \times \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}}$

⁷ N: Newton.

Onde:

- E : Módulo de elasticidade ou de Young [kg/cm^2] – $0,12 \times 10^6$ para o Cu; $7,04 \times 10^5$ para o Al
- f_r : Frequência de ressonância [Hz]
- J : Momento de inércia [cm^4]
- l : Comprimento do vão [cm]
- p : Peso do condutor [kg/cm]

O objectivo deste cálculo é garantir que o **vão da instalação** (*distância entre apoios*) *não está compreendido* entre os **valores do vão de ressonância** a $\pm 10\%$ da *harmónica fundamental* (50 Hz) e da *segunda harmónica* (100 Hz), isto é, têm que ser calculados os *vãos de ressonância* a 45 Hz, 55 Hz, 90 Hz e 110 Hz (se a *frequência da rede* fosse 60 Hz, o cálculo seria feito para 54 Hz, 66 Hz, 98 Hz e 132 Hz).

Da expressão anterior resulta que o **vão em função da frequência de ressonância** é calculado pela expressão:

$$l = \sqrt[4]{\frac{112^2 \times E \times J}{p \times f_r^2}}$$

3.3. BARRAMENTOS TENDIDOS

Para além dos *esforços térmicos de curto-circuito*, calculados da mesma maneira que para os *barramentos rígidos*, o **dimensionamento dos barramentos tendidos** incluem os seguintes cálculos.

- Esforço electrodinâmico.
- Cálculos mecânicos:
 - Esforço de tracção.
 - Acção do vento.
 - Determinação da flecha máxima.

1) Esforço electrodinâmico

- $F_{st} = F_{0st} \times (1 + \phi \times \Psi)$ [kN]

a) Cálculo de F_{0st}

- $F_{0st} = 0,4 \times F'_{st}$ [kN]

b) Condição a satisfazer

- $F'_{st} > F_{st}$

c) Cálculo de ζ

- $\zeta = \left[\frac{g \times p' \times l^2}{24 \times F'_{st}} \right] \times \left[\frac{1}{\frac{1}{100 \times l} + \frac{1}{E \times s}} \right]$

d) Cálculo de φ

- $\varphi = 3 \times \left[\sqrt{1 + \left(\frac{F}{g \times p'} \right)^2} - 1 \right]$
- $F \text{ [N/m]} = 0,2 \times l''_{K2}{}^2 / d \quad [l''_{K2}{}^2 : \text{kA}; d : \text{m}]$

e) Cálculo de ψ

ψ é o **factor de reacção do vão**, sendo uma *função* de ζ e de um parâmetro φ , característico, e que depende do **esforço térmico de curto-circuito e do peso** (por unidade de comprimento) do **cabo e ligadores**.

- $F \text{ (N/m)} = 0,2 \times l''_{K2}{}^2 / d \quad [l''_{K2}{}^2 : \text{kA}; d : \text{m}]$
- $\Psi \text{ (N/m)} = f(\varphi; \zeta)$; esta função está representada na Figura 9

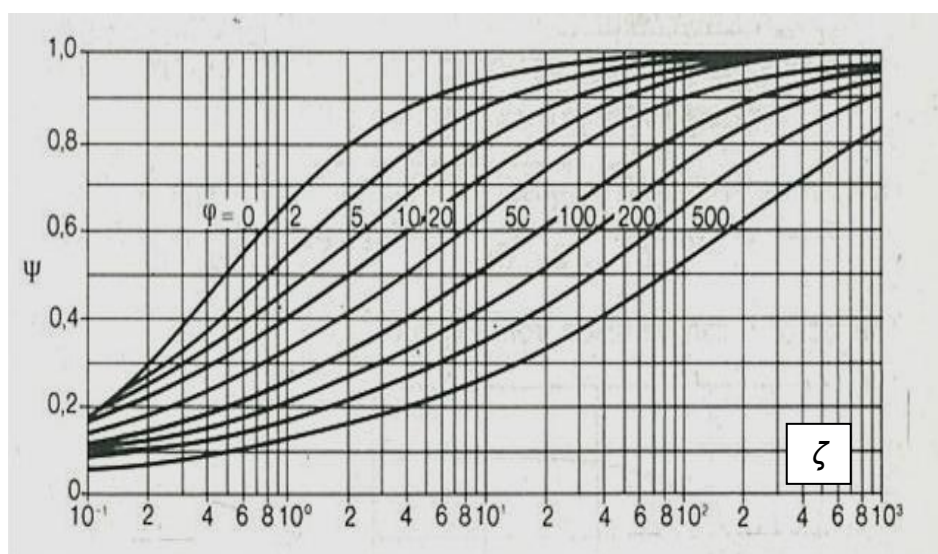


Figura 10 – Gráfico de ζ

2) Cálculo mecânico

a) Esforço de tracção

- Como calculado no ponto 1.

b) Acção do vento

De acordo com o art.º 10 do RSLEAT a **acção do vento F (N)** é calculada pela expressão:

- $F = Y \times C_x \times Q \times S$

Onde:

- C é o coeficiente de forma (artº 15 do RSLEAT)
- Q , medido em *pascal* [Pa] é a pressão dinâmica do vento, que de acordo com os artºs 11 a 13 do RSLEAT, para vento reduzido e altura até 30m, é 300 Pa.

- $S [m^2]$ é a área da superfície batida pelo vento, considerado perpendicular ao cabo, isto é, é a área da semi-superfície cilíndrica, calculada por:
 - $S = (P \times l)/2$ e P é o perímetro da secção recta do condutor
- Y é o coeficiente de redução (*artº 14 do RSLEAT*).

c) Flecha máxima

Considerando que os *comprimentos dos vãos são normalmente muito curtos*, a fórmula de cálculo apresentada para a *flecha máxima* (f_M) é simplificada, desprezando-se o efeito de temperatura (considera-se apenas o **esforço de tracção máximo**), a força do vento a velocidade reduzida, o factor de ressonância estrutural (**factor de vão**) e o factor de rajada.

$$f_M = (k x p' x l^2) / (8 x s_{eq} x F_{0st})$$

Onde:

- k é o factor de sobrecarga e calculado pela expressão:

$$k = \frac{\sqrt{p'^2 + F^2}}{p}$$

- s_{eq} é a secção equivalente do condutor [mm^2]

Nas expressões do **cálculo dos barramentos tendidos** deve ser tomada em consideração:

- d : Distância entre fases [m]
- F : Esforço electrodinâmico [kN]
- F'_{st} : Carga de ruptura nominal do condutor [kN]
- F_{0st} : Esforço de tracção, que de acordo com o *RSLEAT* não deve ser **superior a 40% da carga de ruptura nominal** (*artº 24*)
- g : aceleração d gravidade – **9,81 m/s²**
- I''_{k2} : Corrente inicial de curto-circuito fase-fase [kA]
- l : Comprimento do vão [m]
- p : Peso do condutor [kg/cm]
- p' : Peso do condutor e ligadores [N/m]
- ζ : Parâmetro característico do vão

4. REDE DE TERRAS

A **secção do cabo da rede de terras** é calculada de acordo com o valor da **corrente de curto-circuito fase-terra**, embora seja **prática habitual** utilizar para este fim o valor da *corrente de curto-circuito trifásico*.

A expressão a utilizar para este efeito é:

$$s \text{ [mm}^2\text{]} = (I''_{K1}/13) \times \sqrt{(t_s/\Delta\theta)}$$

Onde:

- I''_{K1} é a corrente de defeito fase-terra [A].
- t_s é o tempo de duração do defeito [s].
- $\Delta\theta$ é a elevação de temperatura admissível no condutor [°C] – para o *cobre nu* $\Delta\theta = 150$ °C.

Recomenda-se que o **dimensionamento da rede de terras** seja feito de acordo com o estabelecido na *Norma IEEE Std. 80-2013, com a C1-2015 (IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding)*.

Os *valores máximos admissíveis* das **tensões de passo** (U_{passo}) e de **contacto** (U_{cont}) e da **corrente máxima através do corpo humano** (I_{ch}), bem como a **resistência da rede de terras** (R_T) são calculados pelas expressões:

Tensão de passo

- $U_{\text{passo}} = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0,116 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 50 kg
- $U_{\text{passo}} = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0,157 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 70 kg

Tensão de contacto

- $U_{\text{cont}} = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s) \times 0,116 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 50 kg
- $U_{\text{cont}} = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s) \times 0,157 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 70 kg

Corrente máxima admissível no corpo humano

- $I_{\text{ch}} = 0,116 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 50 kg
- $I_{\text{ch}} = 0,157 / \sqrt{t_s}$ – para um peso corporal de 70 kg

Resistência de terra

- $R_T = (\rho/4) \times \sqrt{(\pi/A)} + \rho/l_T$

Onde:

- A é a área total ocupada pela malha de terra [m²]
- C_s é o factor de depreciação da camada superficial do solo, sendo calculado pela expressão:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \times (1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0,09}$$

- h_s é a espessura da camada superficial [m]
- l_T é o comprimento total do cabo de cobre enterrado, incluindo os eléctrodos de terra [m]
- t_s é o tempo de duração do defeito [s]
- ρ é a resistividade do terreno abaixo da gravilha [Ωm]

- ρ_s é a resistividade superficial do terreno (usualmente a gravilha) [Ωm]

Caso não exista camada superficial, então $C_s=1$ e $\rho_s=\rho$

Na Tabela 10 apresentam-se *valores típicos* para ρ , para *diversos tipos de terreno*.

Tabela 10 – Valores típicos de ρ

Tipo de solo	Resistividade – ρ (Ωm)
Terreno pantanoso	0 a 30
Lodo	20 a 100
Terra vegetal	10 a 150
Turfa húmida	5 a 100
Argila plástica	50
Terra calcária ou argila compacta	100 a 200
Terra calcária do jurássico	30 a 40
Areia argilosa	50 a 500
Areia de sílica	200 a 3000
Solo rochoso nu	1500 a 3000
Solo rochoso nu coberto de relva	300 a 500
Calcário mole	100 a 300
Calcário compacto	1000 a 5000
Calcário gretado	500 a 1000
Xistos	50 a 300
Micaxisto	800
Granitos e grés alterados	1500 a 10.000
Granitos e grés muito alterados	100 a 600
Gravilha	≈ 2500
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6
Betão	1×10^6 a 1×10^9

Estes cálculos são iterativos, habitualmente realizados com recurso a *software* específico, preconizando-se que o cálculo se faça para uma *massa corporal* de **70 kg**.

Conforme referido, o *RSSPTS* impõe que a resistência de terra da subestação seja $\leq 1 \Omega$, o que **nas instalações em Portugal deve ser respeitado**.

Embora a norma seja explícita, afirmando que apenas se aplica a subestações exteriores, é habitual utilizá-la igualmente para o cálculo da rede de terras das subestações interiores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bolotinha, Manuel. Subestações: Projecto, Construção, Fiscalização – 2ª Edição. Quântica Editora/Engebook. Janeiro 2019.
- [2] Bolotinha, Manuel. Subestações – Montagem Electromecânica, Ensaios e Manutenção. Quântica Editora/Engebook. Janeiro 2019.
- [3] Bolotinha, Manuel. Transporte, Distribuição e Utilização de Redes Eléctricas de Muito Alta, Alta e Média Tensão. Publindústria/Engebook. Outubro 2019.
- [4] Bolotinha, Manuel. Basics of HV, MV and LV Installations. Editora Ómega. Janeiro 2017.
- [5] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. International Electrotechnical Vocabulary. IEC 60050-605. Suíça, 1983.
- [6] ELECTRIC POWER SUBSTATIONS ENGINEERING Edited by John D. McDonald CRC Press 2003
- [7] Guia Técnico Solidal.
- [8] Normas, Regulamentos e Outros Documentos de Referência citados no texto.