

DIMENSIONAMENTO DE CABOS ISOLADOS

Manuel Bolotinha, MSc, Engenheiro Electrotécnico ^{*i}

1. CONDIÇÕES E FORMULÁRIO DE CÁLCULO

1. 1. PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO

A **secção dos condutores** dos *cabos isolados* deve ser calculada de acordo com os **seguintes parâmetros**, conforme estabelecido na *Norma HD¹ 603*:

- Corrente permanente admissível, comparada com a corrente nominal da instalação e/ou equipamento.
- Queda de tensão.
- Esforços térmicos da corrente de curto-circuito.

1. 2. CORRENTE PERMANENTE ADMISSÍVEL

A **corrente permanente admissível** nos *condutores e cabos isolados*, para cada **tipo** (*designadamente material do condutor e do isolamento*), **tensão estipulada**, **número de condutores** e *tipo de montagem (enterrados ou ao ar – para cabos monopolares dependem também se são instalados em esteira ou trevo juntivo)* é indicada nos *regulamentos e normas aplicáveis* e também nos *catálogos dos fabricantes*.

Esses valores são válidos em **determinadas condições** (*definidas nos documentos referidos*), devendo ser **afectados de factores correctivos** (*também indicados nos mesmos documentos*), se as *condições reais de instalação forem diferentes* das *especificadas*. Esses factores têm em consideração, designadamente, os seguintes aspectos:

- Resistividade térmica do solo (cabos enterrados) – habitualmente considerado **1 k.m/W**.
- Temperatura do solo (cabos enterrados) – habitualmente considerado **20 °C**.
- Temperatura ambiente (cabos ao ar) – habitualmente considerado **30 °C**.
- Tipo e número de caminho de cabos, número de cabos no mesmo caminho e afastamento entre cabos.

1. 3. QUEDA DE TENSÃO

Os valores da **queda de tensão** *não devem ultrapassar* os **valores referidos nos regulamentos aplicáveis** (em Portugal devem ser considerados os *RTIEBT* e *RSRDEEBT*² – ver Tabela 1), nem os **valores que ponham em causa a estabilidade da rede e o funcionamento dos equipamentos** (*por exemplo, um motor com uma*

¹ HD: Norma CENELEC; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization (Normas Europeias).

² RTIEBT: Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão. RSRDEEBT: Regulamento de Segurança das Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão.

queda de tensão em fase de arranque superior a 10% não consegue fornecer o binário suficiente nessa fase e não arranca).

Tabela 1 – Valores regulamentares máximos da queda de tensão nas redes e instalações BT de acordo com os regulamentos portugueses

Regulamento	Instalação		$\Delta U_{\max}^3$ (%)
RTIEBT	Circuitos de iluminação		3
	Circuitos para outros fins		5
	Colunas montantes e alimentações	Entre os ligadores de saída da portinhola e a origem da instalação – alimentações individuais	1,5
		Troço correspondente à entrada de uma coluna ligada a uma caixa de coluna	0,5
		Troço correspondente à coluna	1
RSRDEEBT	Rede de distribuição BT		8 (em centros urbanos é recomendável que não exceda 5%)
	Rede de iluminação pública		3

A queda de tensão, nos circuito trifásicos é calculada pela expressão:

$$\Delta U [V] = \sqrt{3} \times I \times (R_{20} \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad [1]$$

Onde:

- I : Corrente nominal da instalação.
- R_{20} : Resistência do cabo a 20 °C.
- X^4 : Reactância indutiva do cabo:
- φ : Desfasagem entre a tensão e a corrente do circuito em análise.

Por outro lado:

$$\Delta U [\%] = (\Delta U [V] / U) \times 100 \quad [2]$$

Onde U é a tensão nominal da instalação.

1. 4. ESFORÇOS TÉRMICOS DE CURTO-CIRCUITO

A **secção mínima do cabo** para suportar os **esforços térmicos de curto-circuito** é calculada pela seguinte expressão:

$$S = I_{K3}'' \times \frac{\sqrt{t}}{K} \quad [3]$$

³ Para os circuitos de iluminação e tomadas regidos pelas RTIEBT a queda de tensão deve ser considerada a partir da origem da instalação.

⁴ $X = \omega L = 2\pi fL$, onde ω é a velocidade angular (rad/s), f é a frequência (Hz) e L é a indutância (mH).

Onde:

- I''_{K3} : corrente de curto-circuito trifásico
- t : tempo de duração do defeito
- K é um factor que depende do material do condutor e do isolamento (Tabela 2).

Tabela 2 – Factor K

Condutor	Isolamento	
	PVC	XLPE ⁵
Cobre	115	135
Alumínio	76	94

2. EXEMPLO 1 – CABO MT DE ALIMENTAÇÃO DE UM MOTOR

Considere-se um *motor trifásico* com as seguintes características:

- *Tensão nominal*: **U = 6 kV**
- *Potência eléctrica*: **P_{el} = 1000 kW**
- *Frequência nominal*: **f=50 Hz**
- *Corrente de arranque*: **I_{arr} = 4,5xI_n** (I_n: corrente nominal do motor)
- *Factor de potência em funcionamento normal*: **cosφ = 0,82⁶**
- *Factor de potência no arranque*: **cosφ = 0,59⁷**
- *Corrente de curto-circuito trifásico*: **I''_{K3} = 12 kA / 1,2 s**

Seja o cabo escolhido do tipo **LXHIV** (condutores de alumínio; isolamento em XLPE; bainha exterior em PVC), **monocondutor**, tensão estipulada **3,6/6(10) kV**.

O cabo é instalado em **trevo juntivo**, **ao ar** em *caminho de cabos tipo escada* (temperatura do ar: **θ₀ = 40 °C**), **juntamente** com **3 ternos** de outros circuitos (afastamento igual ao diâmetro), com um comprimento **l = 480m**. A **temperatura admissível** na alma condutora em **regime permanente** é **θ_p = 90 °C**.

Dimensionamento à corrente permanente admissível

A corrente nominal (I_n) do motor é:

$$P_{elec} = \sqrt{3} \times U \times I_n \times \cos \varphi \quad \longleftrightarrow \quad I_n = P_{elec} / (\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi)$$

$$I_n = 1000 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 6 \times 10^3 \times 0,82) \approx 117 \text{ A}$$

Os **factores de correcção** a aplicar ao cabo são tirados das Tabelas 3 e 4.

⁵ XLPE: polietileno reticulado.

⁶ sen φ = 0,57

⁷ sen φ = 0,81

Tabela 3 – Factor de correcção para temperaturas do ar diferentes de 30 °C

Temperatura do ar ($\theta_0 - ^\circ\text{C}$)	Temperatura admissível na <i>alma condutora</i> em regime permanente ($\theta_p - ^\circ\text{C}$)					
	70	75	80	85	90	95
15	1,17	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11
20	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07
25	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96
40	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
45	0,79	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88
50	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83

- **K1 = 0,91**

Tabela 4 – Factor de correcção para número de cabos/ternos ao ar no mesmo suporte físico

Montagem	Número de cabos/ternos no mesmo suporte físico				
	1	2	3	4	5
Tecto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66
Em caminho de cabos com circulação de ar	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75
Em consola	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80

- **K2 = 0,82**

A **corrente permanente admissível** (I_c) no cabo é assim:

$$I_c = I_n / (K1 \times K2) \quad \longleftrightarrow \quad I_c = 117 / (0,91 \times 0,82) \approx 157 \text{ A}$$

A **secção dos condutores do cabo**, de acordo com a **corrente permanente admissível** tira-se da Tabela 5, onde se indicam as características do **cabo monocondutor LXHIV 3,6/6(10) kV**

Tabela 5 – Principais características do cabo monocondutor LXHIV 3,6/10(12) kV

Secção nominal (mm ²)	Corrente permanente admissível ao ar – trevo juntivo (A)	Resistência em corrente alternada a 90 °C (Ω/km)	Indutância – L (mH/km)
35	154	1,113	0,419
50	184	0,822	0,403
70	230	0,568	0,378
95	280	0,410	0,361
120	324	0,324	0,346
150	368	0,264	0,337
185	424	0,210	0,324
240	502	0,160	0,313
300	577	0,128	0,304
400	673	0,100	0,295

De acordo com a *corrente permanente admissível* a **secção do cabo** é pois:

- $s = 50 \text{ mm}^2$

Dimensionamento à corrente de curto-circuito

De acordo com a expressão [3] e a Tabela 2, a **secção do cabo**, tendo em atenção os **esforços térmicos de curto-circuito**, é:

$$s = 12.000 \times \sqrt{1,2 / 94} \approx 140 \text{ mm}^2$$

A *secção comercial* que obedece a esta condição é **150 mm²**, verificando-se:

$$150 \text{ mm}^2 > 50 \text{ mm}^2$$

Verificação à queda de tensão

Esta verificação é feita para $s = 150 \text{ mm}^2$, a **maior das secções calculadas** para *corrente permanente admissível* e para os *esforços térmicos de curto-circuito*.

De acordo com as expressões [1] e [2] e a Tabela 5, obtém-se:

a) *Queda de tensão em funcionamento normal*

$$\Delta U [\text{V}] = \sqrt{3} \times 117 \times (0,264 \times 0,48 \times 0,82 + 2 \times \pi \times 50 \times 0,337 \times 10^{-3} \times 0,48 \times 0,57) \approx 27 \text{ V}$$

$$\Delta U [\%] = 27/6000 \times 100 \approx 0,45\% \ll 5\%$$

b) *Queda de tensão ao arranque*

$$\Delta U [\text{V}] = \sqrt{3} \times 117 \times 4,5 \times (0,264 \times 0,48 \times 0,59 + 2 \times \pi \times 50 \times 0,337 \times 10^{-3} \times 0,48 \times 0,81) \approx 106 \text{ V}$$

$$\Delta U [\%] = 106/6000 \times 100 \approx 1,77\% \ll 10\%$$

Conclui-se assim que a *secção calculada de acordo com os esforços de curto-circuito* **cumpre os requisitos da queda de tensão**.

3. EXEMPLO 2 – CABO DA REDE PÚBLICA BT DE DISTRIBUIÇÃO

Seja um cabo da *rede pública de distribuição em BT*, **enterrado em vala** (*temperatura do solo* $\theta_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$), **sem outros cabos na vala**, com *comprimento* $l = 200 \text{ m}$, *corrente nominal da instalação* $I_n = 236 \text{ A}$ e *factor de potência* $\cos \varphi = 0,88^8$.

Considera-se que a **temperatura admissível** na *alma condutora* em **regime permanente** é $\theta_p = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

A *corrente de curto-circuito trifásico* é **10 kA/1 s**.

Em Portugal, a E-REDES⁹, apenas utiliza nas redes de distribuição, cabos do tipo **LSVAV 4x95 mm², 0,6/1 kV**, e **LVAV 3x185+95 mm², 0,6/1 kV**¹⁰.

Dimensionamento à corrente permanente admissível

Para as *condições de instalação especificadas*, o **factor de correcção** a aplicar tira-se da Tabela 6.

⁸ $\sin \varphi = 0,47$

⁹ E-REDES: Designação actual da EDP Distribuição.

¹⁰ LSVAV: cabo com condutores sectoriais em alumínio, isolamento e bainha exterior em PVC. LVAV: cabo com condutores multifilares em alumínio, isolamento e bainha exterior em PVC.

Tabela 6 – Factor de correcção para temperaturas do solo diferentes de 20 °C

Temperatura do solo ($\theta_0 - ^\circ\text{C}$)	Temperatura admissível na <i>alma condutora</i> em regime permanente ($\theta_p - ^\circ\text{C}$)					
	70	75	80	85	90	95
10	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06
15	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
25	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97
30	0,89	0,91	0,91	0,92	0,93	0,93
35	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89
40	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86

- $K = 0,91$

A corrente permanente admissível (I_c) no cabo é assim:

$$I_c = I_n / K \quad \leftrightarrow \quad I_c = 236 / 0,91 \approx 259 \text{ A}$$

A secção dos condutores do cabo, de acordo com a corrente permanente admissível tira-se da Tabela 7, onde se indicam as características dos cabos LSVAV e LVAV 0,6/1 kV.

Tabela 7 – Principais características dos cabos monocondutor LVAV e LSVAV 0,6/1 kV

Tipos de cabo e secções				Corrente admissível (A)	L (mH/km)
LVAV	Secção (mm²)	LSVAV	Secção (mm²)		
	3x35+16		4x35	130	0,312
	3x50+25		4x50	150	0,312
	3x70+35		4x70	195	0,303
	3x95+50		4x95	235	0,296
	3x120+70		4x120	270	0,290
	3x150+70		4x150	310	0,290
	3x185+95		4x185	355	0,315
	3x240+120		4x240	410	0,309

De acordo com a corrente permanente admissível e a normalização da E-REDES, a secção do cabo é pois:

- $s = 3x185+95 \text{ mm}^2$

Dimensionamento à corrente de curto circuito

De acordo com a expressão [3] e a Tabela 2, a secção do cabo, tendo em atenção os esforços térmicos de curto-circuito, é:

$$s = 10.000 \times \sqrt{1 / 76} \approx 132 \text{ mm}^2$$

Verifica-se que a secção normalizada pela E-REDES, definida pelo dimensionamento à corrente permanente admissível (185 mm²) obedece ao dimensionamento à corrente de curto-circuito, uma vez que:

$$185 \text{ mm}^2 > 132 \text{ mm}^2$$

Verificação à queda de tensão

Para $s = 185 \text{ mm}^2$, que foi a secção definida pelos cálculos anteriores, de acordo com as expressões [1] e [2] e a Tabela 7, obtém-se:

$$\Delta U [\text{V}] = \sqrt{3} \times 236 \times (0,033 \times 0,88 + 2 \times \pi \times 50 \times 0,315 \times 10^{-3} \times 0,2 \times 0,47) \approx 27 \text{ V}$$

$$\Delta U [\%] = 27/400 \times 100 \approx 3,9\% < 5\%$$

A resistência do cabo a 20°C é calculada pela expressão:

$$R_{20} [\Omega] = \rho_{20} \times l / s \quad \longleftrightarrow \quad R_{20} = 1/33 \times 200 / 185 \approx 0,033 \Omega$$

Onde:

- ρ_{20} : resistividade do alumínio a 20°C – $1/33 \Omega\text{m/mm}^2$
- l : comprimento do cabo (200 m)
- s : secção do cabo (185 mm^2)

ⁱO Autor **não** utiliza o Novo Acordo Ortográfico