

Noções de dimensionamento de canalizações eléctricas

Apontamentos para as disciplinas de Instalações Eléctricas

Manuel António Matos

Índice

1.	Introdução	1
2.	Conceitos fundamentais	1
2.1.	Definições	1
2.2.	Condições técnicas	2
2.3.	Aspectos económicos	2
3.	Cálculos preliminares.....	2
3.1.	Corrente de serviço	2
3.2.	Corrente máxima admissível	3
3.3.	Queda de tensão.....	4
4.	Protecção contra sobreintensidades.....	6
4.1.	Protecção contra sobrecargas.....	6
4.2.	Protecção contra curto-circuitos	7
5.	Procedimento	10
6.	Análise Económica.....	10
7.	Agradecimentos	11
	ANEXO.....	12

Advertência (1999)

Com a introdução dos novos valores nominais da baixa tensão (400/230 V) os limites de tensão tenderão a ser +6% e -10%, ou seja, a condição de queda de tensão da secção 2.2 passa a ser $0,9 \cdot |U_{ns}| \leq |U| \leq 1,06 \cdot |U_{ns}|$.

A alteração das tensões nominais provocou também a alteração dos valores das potências contratadas, uma vez que a corrente se mantém. Assim, todos os valores das potências contratadas (6,6 kVA, 9,9 kVA, 13,2 kVA, etc.) devem ser multiplicados por 230/220 (ficando, respectivamente, 6,9 kVA, 10,35 kVA, 13,8 kVA, etc.). No entanto, como as potências contratadas e as tensões variam pelo mesmo factor, a corrente de serviço não virá alterada.

1. Introdução

O dimensionamento das canalizações eléctricas, incluindo a respectiva protecção, baseia-se em preceitos regulamentares relativamente simples, aos quais se juntam as condições físicas e técnicas do sistema e as características da aparelhagem de protecção. Com excepção das leis físicas e de alguns princípios técnicos fundamentais, toda esta envolvente é regularmente revista, sendo portanto mais importante dominar os princípios gerais, e conseguir aplicá-los em novas situações, do que conhecer algumas "receitas", eficazes num determinado momento, mas que o tempo se encarregará de tornar obsoletas.

Neste texto, abordam-se os aspectos fundamentais do problema e fornecem-se os dados regulamentares e técnicos actualmente em vigor, de forma relativamente sucinta, ou seja, não fica dispensada a leitura dos regulamentos aplicáveis, para completo esclarecimento das condições de estabelecimento em projecto.

2. Conceitos fundamentais

O objectivo fundamental do dimensionamento e protecção de canalizações é a determinação da **secção do cabo** a instalar e do **calibre da protecção** respectiva, da forma mais económica possível, satisfazendo as condições técnicas e regulamentares aplicáveis. Neste texto, não se discutem as razões que poderão levar a escolher um determinado tipo de cabo (estudadas noutra ocasião), supondo-se portanto conhecido o material condutor e o isolante. Também se supõem já determinadas as condições de montagem, pelo menos nos seus aspectos essenciais.

2.1. Definições

Os valores fundamentais envolvidos são os seguintes:

I_s	corrente de serviço (A)
I_z	corrente máxima admissível na canalização (A)
I_n	calibre da protecção (A)
I_f	corrente convencional de funcionamento da protecção (A)
$\Delta U $	queda de tensão (ponto mais desfavorável) (V)
$\epsilon.U_{ns}$	queda de tensão máxima admissível (V)

Recorde-se que o valor de I_s é calculado em função da carga prevista para a canalização, I_z depende da secção e das condições de instalação do cabo e I_n e I_f são características da protecção escolhida. Finalmente, a queda de tensão máxima é imposta por condições regulamentares ou por necessidades técnicas mais restritivas.

2.2. Condições técnicas

De forma geral, as condições a verificar pelo conjunto cabo/protecção são as listadas a seguir. O desenvolvimento será feito mais adiante.

- $I_s \leq I_z$ condição de aquecimento
- $\Delta|U| \leq \epsilon \cdot |U_{ns}|$ condição de queda de tensão
- Protecção contra sobreintensidades (sobrecargas e curto-circuitos)

O valor de ϵ a usar depende da exigência da qualidade de serviço, sendo valores típicos 8% (redes rurais) e 5% (redes urbanas). Em casos especiais, podem ser impostas restrições adicionais, salientando-se o mínimo de 10 mm² nas colunas montantes e de 4 mm² nas entradas. Como se disse, haverá sempre que confirmar no regulamento quais as condições particulares de estabelecimento eventualmente aplicáveis.

2.3. Aspectos económicos

Tradicionalmente, a secção escolhida é a menor de todas aquelas que satisfazem as condições regulamentares (incluindo a existência de uma protecção adequada), uma vez que corresponde ao menor investimento. O aumento do custo da energia eléctrica, no entanto, fez subir os custos de exploração (perdas Joule) para valores que podem pôr em causa esse princípio, levando a escolher uma secção maior (e, portanto, mais cara) porque provoca menos perdas. Essa questão é analisada na última secção do texto.

3. Cálculos preliminares

3.1. Corrente de serviço

No caso geral de alimentação de uma carga absorvendo a potência aparente S à tensão nominal composta U_{nc} , é conhecido que a corrente de serviço é dada por:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{nc}} \quad (1)$$

Em colunas montantes, a potência a considerar é afectada por um **factor de simultaneidade** regulamentar fs_n (cf. Anexo). Sendo S_i a potência consumida por cada um de n consumidores, tem-se:

$$S = fs_n \cdot \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

Exemplo 1: Coluna com 10 habitações de 13,2 kVA

$$fs_{10} = 0,63S = 0,63 (10 \times 13,2) = 83,16 \text{ kVA}$$

Do mesmo modo, em ramais que alimentam uma portinhola ou quadro de colunas, utiliza-se também o factor de simultaneidade, adicionando-se ao resultado a potência dos serviços comuns.

Exemplo 2: Duas colunas como as do exemplo 1, $S_{sc} = 9,9 \text{ kVA}$

$$fs_{20} = 0,49 \quad S = 0,49 (20 \times 13,2) + 9,9 = 139,26 \text{ kVA}$$

Um ponto importante é que os valores regulamentares do factor de simultaneidade são **mínimos**. Se o projectista entender que existe uma correlação superior à habitual no uso da electricidade pelos diversos consumidores, deve aumentar o factor, para não correr o risco de subdimensionar a instalação.

Revedo a expressão (1), deve notar-se que ela envolve a aproximação de considerar a carga alimentada à tensão nominal, quando deveria ser, em rigor, a tensão no ponto de alimentação. Esta aproximação é admissível na fase de projecto, sendo habitual usá-la, também, em relação ao esfasamento, ou seja, supondo conhecida a potência aparente complexa S_j num ponto de consumo j , a corrente absorvida I_j é dada por:

$$I_j = \frac{S_j^*}{\sqrt{3} \cdot U_j^*} \cong \frac{S_j^*}{\sqrt{3} \cdot U_{nc}} \quad (3)$$

onde U_j é a tensão composta no ponto j , aproximada depois pela tensão nominal com fase nula, correspondendo a origem das fases à origem da instalação.

3.2. Corrente máxima admissível

O valor de I_z obtém-se de tabelas fornecidas pelos fabricantes de cabos eléctricos (cf. Anexo), sendo eventualmente afectado por um ou mais factores de correcção para a situação de montagem e condições locais. Os factores usualmente fornecidos pelos fabricantes referem-se às correcções seguintes:

- Cabos enterrados, em grupos;
- Cabos instalados ao ar, em grupos;
- Temperatura ambiente;
- Resistividade térmica do terreno.

Todos os factores são multiplicativos, tomando o valor 1 para a situação de referência. Saliente-se que o valor de I_z a considerar no exercício de dimensionamento e protecção é o que se obtém **depois** de aplicados todos os factores.

Exemplo 3: Dois cabos enterrados na mesma vala

Cabo VAV 3 x 50 + 25 mm², enterrado: **190 A**

Factor para 2 cabos em grupo: **0,9**

$$I_z = 0,9 \times 190 = 171 \text{ A}$$

3.3. Queda de tensão

Partindo das correntes I_j nos pontos de consumo, obtidas de acordo com a expressão (3), a lei dos nós permite obter as correntes $I_k = I_k^f - jI_k^q$ nos diversos troços da rede, sendo a queda de tensão máxima dada por:

$$\Delta|U| = U_{ns} - |U| = U_{ns} - \left| U_o - \sum_k Z_k \cdot I_k \right| \quad (4)$$

onde o somatório abrange todos os troços desde a origem ($U_o = U_{ns} / \underline{0}$) até ao ponto mais desfavorável (que pode não ser o ponto geograficamente mais afastado!).

Embora os meios de cálculo disponíveis actualmente permitam realizar com facilidade o cálculo da queda de tensão com a expressão (4), é tradicional a utilização duma expressão aproximada, útil em determinadas circunstâncias, que se baseia no conhecimento de que os factores de potência são, em geral, bastante elevados e em que a queda de tensão é normalmente muito inferior à tensão nominal. Na verdade, fazendo a projecção da queda de tensão vectorial $|\Delta U| = |U_o - U|$ sobre a direcção de U_o , obtém-se uma boa aproximação (pessimista) da queda de tensão pretendida:

$$\Delta|U| \cong \operatorname{Re} \left| \sum_k Z_k \cdot I_k \right| = \left| \sum_k (R_k I_k^f + X_k I_k^q) \right| \quad (5)$$

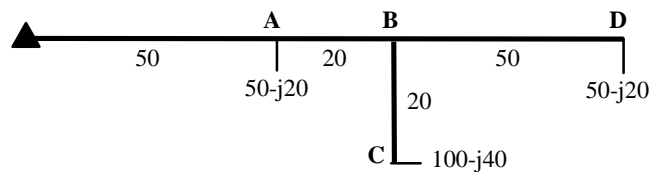
ou, como geralmente $R \gg X$ e $I^f \gg I^a$, tem-se:

$$\Delta|U| \cong \sum_k R_k I_k^f \quad (6)$$

Esta aproximação permite exprimir a **secção mínima** que satisfaz a restrição de queda de tensão em função dos dados (correntes e comprimentos dos troços) e do valor de ε , no caso do dimensionamento ser feito a secção constante. [Sugestão: $R_k \cong \rho \ell_k / \sigma$, onde σ é a secção em todos os troços]

Saliente-se que as expressões (4) a (6) são válidas em redes trifásicas equilibradas percorridas por correntes simétricas. Em redes monofásicas, há queda de tensão na fase e no neutro, o que obriga a incluir os termos correspondentes no somatório. A resistência a utilizar no cálculo da queda de tensão é a fornecida pelos fabricantes, corrigida para a temperatura de funcionamento (caso mais desfavorável: 70 °C quando o isolamento é PVC e 90 °C quando é PEX).

Exemplo 4: Cálculo da queda de tensão (rede trifásica)



(comprimentos em metros e correntes em Ampère)

$$r = 0,368 \cdot (1 + 0,004 \cdot (70 - 20)) = 0,4416 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$x = 100\pi \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} = 0,06908 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$\Delta U_B = z \cdot [50 \cdot (200 - j80) + 20 \cdot (150 - j60)] \cdot 10^{-3} = z \cdot (13,0 - j5,2)$$

$$\Delta U_C = z \cdot [(13 - j5,2) + 20 \cdot (100 - j40)] \cdot 10^{-3} = z \cdot (15,0 - j6,0)$$

$$\Delta U_D = z \cdot [(13 - j5,2) + 50 \cdot (50 - j20)] \cdot 10^{-3} = z \cdot (15,5 - j6,2)$$

O ponto mais desfavorável é portanto o ponto **D**, onde pode calcular-se a queda de tensão exacta:

$$U_D = 220 - z \cdot (15,5 - j6,2) = 212,733 \text{ } /0,45^\circ \text{ V}$$

$$\Delta|U_D| = 220 - 212,733 = \mathbf{7,267 \text{ V}}$$

Poder-se-ia também calcular a queda de tensão aproximada, usando a expressão (5):

$$\Delta|U_D| \cong r \cdot 15,5 + x \cdot 6,2 = \mathbf{7,273 \text{ V}}$$

ou a expressão (6):

$$\Delta|U_D| \cong r \cdot 15,5 = \mathbf{6,845 \text{ V}}$$

Repare-se que, neste caso, a aproximação (6) não é muito boa, reflectindo o facto das cargas terem o factor de potência relativamente baixo (para BT).

4. Protecção contra sobreintensidades

A previsão de situações de defeito (curto-circuito) ou de utilização excessiva dos circuitos (sobrecarga), leva à necessidade da protecção contra sobreintensidades, através da instalação de fusíveis ou disjuntores magneto-térmicos. As condições de estabelecimento regulamentares são apresentadas a seguir.

4.1. Protecção contra sobrecargas

Devem ser satisfeitas simultaneamente as seguintes condições:

$$I_s \leq I_n \leq I_z \quad (7)$$

$$I_f \leq 1,45 I_z \quad (8)$$

Repare-se que a condição (7) inclui a condição de aquecimento referida anteriormente, que não tem portanto de ser verificada separadamente.

Os valores de I_n e I_f para fusíveis e disjuntores podem ser vistos no Anexo, onde estão transcritas as tabelas regulamentares. Repare-se no entanto que, segundo a norma EN60269, é $I_f = 1,6 I_n$ nos fusíveis de calibre superior a 16 A (o que só não se verifica, na tabela regulamentar, para os calibres de 20 e 25 A). Por outro lado, nos disjuntores, é sempre $I_f = 1,35 I_n$, pelo que a condição (8) está sempre verificada se (7) estiver.

Exemplo 5: Verificação da protecção contra sobrecargas

Corrente de serviço: $I_s = 159 \text{ A}$

Situação do exemplo 3 – Cabo de 50 mm^2 (vala com dois cabos): $I_z = 171 \text{ A}$

Protecção por fusíveis gG

O único calibre que satisfaz a condição (6) é $I_n = 160 \text{ A}$, mas a condição (7) não é satisfeita, pois $1,45 I_z = 248 < 256 = I_f$. A solução mais simples é aumentar a secção, passando a usar o cabo de 70 mm^2 , com $I_z = 0,9 \cdot 245 = 220,5 \text{ A}$, mantendo a protecção de 160 A. Tem-se então:

$$159 < 160 < 220,5 \quad (\text{condição 7})$$

$$256 < 1,45 \cdot 220,5 = 319,7 \quad (\text{condição 8})$$

Em algumas situações, em que não é de prever a ocorrência de sobrecargas, a verificação da protecção é dispensada pelos regulamentos em vigor.

4.2. Protecção contra curto-circuitos

A verificação desta protecção envolve dois aspectos: poder de corte adequado do aparelho que interrompe a corrente e garantia de que o corte é realizado antes da passagem da corrente de curto-circuito provocar danos irreversíveis. O primeiro aspecto envolve o cálculo da corrente de curto-circuito presumida no ponto onde é instalado o aparelho de corte, e é abordado aquando do estudo dos curto-circuitos, pelo que não se repete aqui.

No que respeita à prevenção dos efeitos dos curto-circuitos, toma especial interesse a **corrente mínima de curto-circuito**, em particular no caso dos fusíveis, dada a sua sensibilidade reduzida. No caso dos disjuntores, é ainda necessário verificar se o tempo de corte é suficientemente pequeno para não ser excedida a capacidade de dissipação de energia do cabo (curvas i^2t). Finalmente, os regulamentos impõem 5s como tempo máximo de actuação das protecções, independentemente das outras condições.

4.2.1. Corrente mínima de curto-circuito

A expressão regulamentar corresponde ao cálculo aproximado do curto-circuito fase-neutro (redes monofásicas e trifásicas com neutro) no ponto mais afastado do cabo, através da expressão:

$$I_{cc}^{\min} = \frac{0,95 \cdot U_n}{1,5 \cdot (R_{\text{fase}}^{20^\circ} + R_{\text{neutro}}^{20^\circ})} \quad (9)$$

onde 1,5 é a correcção das resistências para a temperatura média do curto-circuito e $U_n=220$ V. No caso de canalizações trifásicas sem neutro (p.ex. alimentação de motores trifásicos), a expressão corresponde ao cálculo aproximado do curto-circuito fase-fase, usando-se $U_n=380$ V e substituindo, em (9), a resistência de neutro pela resistência de fase.

4.2.2. Tempo de fadiga térmica dos cabos

A passagem da corrente de curto-circuito é suportada sem dano pelo cabo durante um tempo máximo t_{FT} (s) que depende da corrente (A), da secção do cabo (mm^2) e da sua constituição, através de um parâmetro k :

$$t_{FT} = \left(k \cdot \frac{S}{I_{cc}} \right)^2 \quad (10)$$

Alguns valores de kCabos de cobre isolados a PVC: **115**Cabos de alumínio isolados a PVC: **74**Cabos de cobre isolados a PRC: **135**Cabos de alumínio isolados a PRC: **87**Cabos de cobre nú: **159**Cabos de alumínio nú: **104**

4.2.3. Canalizações protegidas com fusíveis

Dadas as formas típicas das curvas de fadiga térmica dos cabos e das curvas tempo-corrente dos fusíveis, a situação mais desfavorável corresponde, como se disse, à situação de curto-circuito mínimo. As verificações fazer são então:

$$t_p \leq t_{FT} \quad (11)$$

$$t_p \leq 5 \text{ s} \quad (12)$$

O cálculo do tempo de fadiga térmica é feito com a expressão (10), para a secção mais desfavorável (normalmente a do neutro) e I_{cc}^{\min} . O valor de t_p é o tempo de disparo do fusível para I_{cc}^{\min} , lido na característica tempo-corrente (a frio). Finalmente, note-se, por ser erro frequente, que não é possível juntar as desigualdades (11) e (12) numa única.

4.2.4. Canalizações protegidas com disjuntores

Quando se usam disjuntores magneto-térmicos, é necessário fazer, de forma similar à usada para os fusíveis, a verificação correspondente às condições (11) e (12). Por outro lado, é necessário garantir que o cabo suporta os efeitos térmicos da passagem da corrente de curto-circuito durante o tempo que o disjuntor demora a disparar.

Sendo $t_c(i^2t)$ a curva admissível i^2t do cabo (que é decrescente), e $t_D(i^2t)$ a curva característica i^2t do disjuntor (crescente), terá de verificar-se, para todas as correntes de curto-circuito:

$$t_c \leq t_D \quad (13)$$

Na prática, bastará fazer a intersecção das duas curvas e garantir que o tempo de disparo do disjuntor é inferior àquele que corresponde à intersecção.

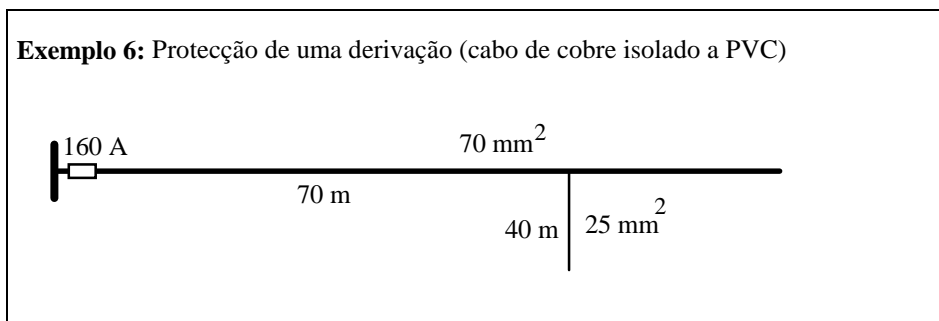
4.2.5. Uso de tabelas

Os regulamentos incluem tabelas de comprimentos máximos protegidos por fusíveis (cf. Anexo), que podem simplificar as verificações descritas nesta secção. Deve notar-se, no entanto, que esses comprimentos são contados desde a fonte, pressupondo sempre a

mesma secção, pelo que seria erro grave (subprotecção) usá-los em derivações protegidas ou quadros. Aliás, também as resistências da expressão (9) devem incluir todos os troços desde a fonte até ao ponto mais distante protegido pela protecção em estudo.

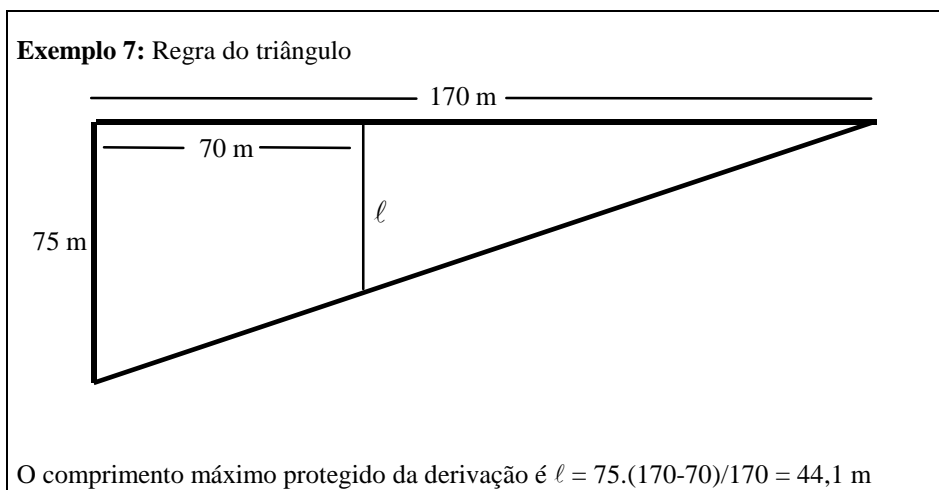
4.2.6. Dispensa da protecção contra curto-circuitos

Em princípio, devem ser colocadas protecções contra sobreintensidades em todos os pontos onde houver derivações ou redução de secção. No entanto, essa protecção pode ser dispensada nos casos em que o dispositivo colocado na canalização principal garanta também a protecção da derivação ou troço com secção reduzida. A situação está exposta na figura seguinte.



As condições de dispensa têm fundamentalmente que ver com a corrente mínima de curto-circuito, podendo portanto ser verificadas usando as expressões (9) a (12). Um método mais simples, no entanto, usa a chamada "regra do triângulo" que se descreve a seguir.

Usando as tabelas de comprimentos máximos protegidos, obtém-se, para os cabos e protecção indicados, $L_{\max}(70) = 170$ m e $L_{\max}(25) = 75$ m, construindo-se um triângulo rectângulo com esses catetos.



O comprimento máximo protegido da derivação é então obtido usando o teorema de Thales, como se mostra no exemplo 7. Neste caso, o comprimento da derivação (40 m) é inferior ao máximo, pelo que a sua protecção pode ser realizada pelo dispositivo inserido na canalização principal. Isto não quer dizer que não seja de colocar uma protecção específica na derivação, por outras razões.

5. Procedimento

As diversas condições descritas atrás permitem validar uma solução de projecto, ou seja, propondo-se uma secção para o cabo e um calibre para a protecção, é possível verificar se a solução é ou não admissível. Coloca-se agora a questão seguinte: como proceder?

Existem muitas formas de chegar a uma solução, por exemplo começando por cumprir as condições de aquecimento e queda de tensão e passando em seguida à questão das protecções. Qualquer delas pode ser usada, porque, repete-se, o que importa é que a solução final satisfaça as condições regulamentares. A sequência seguinte é uma das possíveis:

- 1 Calcular a corrente de serviço
- 2 Seleccionar a protecção que satisfaz $I_n > I_s$
- 3 Escolher uma secção, de modo a ter $I_c > I_n$
- 4 Verificar a condição (8). Caso não se verifique, aumentar a secção e repetir a verificação
- 5 Verificar as condições de curto-circuito. Caso não se verifiquem, aumentar a secção e repetir a verificação.

Estes passos garantem que é atingida uma solução admissível, sem alterar as hipóteses iniciais. No entanto, em algumas das situações, podem ser de considerar alterações como: disjuntores em vez de fusíveis, cabos em paralelo, mudança do tipo de cabo. A discussão das vantagens e inconvenientes dessas medidas ultrapassa, no entanto, o âmbito deste texto.

6. Análise Económica

Os custos associados à instalação e exploração de um cabo de secção α resultam da soma do **investimento** C_α com o **custo capitalizado das perdas**. Definindo I_c e I_c' respectivamente como o valor máximo e o valor médio quadrático do diagrama de correntes (valor eficaz), num período T_o , e definindo também $\delta = I_c/I_c'$ (factor de perdas), o valor das perdas devidas à resistência R_α é dado por:

$$W_p = 3 \cdot \frac{R_\alpha}{\delta^2} \cdot I_e^2 \cdot T_o \quad (13)$$

Supondo um período anual e custo constante c_p para o kWh de perdas, o custo actualizado das perdas (n anos, taxa de actualização i) será dado por:

$$C_\alpha^p = 3 \cdot \frac{R_\alpha}{\delta^2} \cdot I_e^2 \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot (8760 \cdot c_p) \right] \quad (14)$$

Designando por k a expressão entre parêntesis rectos, pode escrever-se de forma mais compacta a expressão do **encargo total** correspondente à secção α :

$$E_\alpha = C_\alpha + \frac{3}{\delta^2} \cdot k \cdot I_e^2 \cdot R_\alpha \quad (15)$$

Repare-se que a primeira parcela aumenta com a secção, passando-se o contrário com a segunda parcela. A fronteira entre secções consecutivas α e $\alpha+1$ (p.ex. 25 e 35 mm²) corresponde à igualdade dos respectivos encargos totais, ou seja:

$$C_\alpha + \frac{3}{\delta^2} \cdot k \cdot I_e^2 \cdot R_\alpha = C_{\alpha+1} + \frac{3}{\delta^2} \cdot k \cdot I_e^2 \cdot R_{\alpha+1} \quad (16)$$

ou seja:

$$I_e^{\text{tr}} = \sqrt{\frac{\delta^2 \cdot (C_{\alpha+1} - C_\alpha)}{3k \cdot (R_\alpha - R_{\alpha+1})}} \quad (17)$$

sendo este o valor de corrente a partir do qual o encargo das perdas justifica utilizar uma secção mais elevada do que a que se determinou pela análise técnica.

7. Agradecimentos

Este texto é parcialmente baseado nas transparências elaboradas pelo autor e pelos Prof. Maciel Barbosa e Peças Lopes para as disciplinas de Instalações Eléctricas. A parte de análise económica resume um texto pedagógico do Prof. Vladimiro Miranda ("Escalonamento Económico de Condutores"). Finalmente, o autor agradece a colaboração do Prof. Pereira da Silva no presente texto. No entanto, e como é evidente, todos os erros que tenham subsistido são da responsabilidade exclusiva do autor.

ANEXO

Tabelas regulamentares e de fabricantes de cabos eléctricos