

# Projecto de Instalações Eléctricas

## Secção Técnica Vs Secção Económica de Canalizações Eléctricas

### 1. Introdução

O projecto das instalações eléctricas deve responder a critérios de ordem técnica, nomeadamente no que se refere à garantia da protecção das pessoas e instalações, mas contrapõem-se necessariamente os aspectos de ordem económica; resultará do compromisso entre estas duas posições contrastantes a definição daquela que será a solução mais acertada para uma dada instalação.

No capítulo dos custos associados a uma instalação eléctrica tem um peso crucial a energia desperdiçada durante o funcionamento da mesma, duração esta que pode em média considerar-se compreendida entre 20 e 30 anos.

Este desperdício tem duas origens: perdas excessivas por ineficiente concepção das instalações e selecção não criteriosa de equipamentos que utilizam a energia eléctrica e malbaratamento da energia eléctrica por funcionamento além do necessário.

Põe-se, portanto, também neste domínio a questão da eficiência energética.

Assim, o responsável pela concepção de uma instalação eléctrica deverá procurar não somente a solução técnica funcional da mesma mas preocupar-se que essa solução seja igualmente eficiente do ponto de vista energético.

A abordagem dum projecto eléctrico eficiente sob o ponto de vista energético deverá contemplar os seguintes pontos:

- Minimização de perdas no sistema de distribuição
- Redução das perdas devido ao desperdício na utilização do equipamento eléctrico
- Redução das perdas associadas aos problemas associados à qualidade da energia
- Prever as instalações para incorporarem aparelhagem de contagem e medida para fins de monitorização e de realização de auditorias eléctricas

### 2. A Secção Técnica dos Condutores

A definição técnica de canalizações em instalações de utilização de energia eléctrica, deve ser realizada de acordo com o definido nas Regras Técnicas de Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, e assenta na verificação das seguintes condições:

- Critério do Aquecimento;
- Critério da protecção contra sobreintensidades

### 3. A Secção Económica dos Condutores Calculada a Partir da Norma CEI/IEC60287-3-2

Os métodos de cálculo económico dos condutores levam em linha de conta não somente o custo inicial dos mesmos e da sua instalação mas também os custos associados à exploração, isto é, os custos das perdas por efeito Joule.



A norma CEI/IEC 60 287-3-2 – Electric cables – Calculation of the current rating –Economic optimization of power cable size (CEI, 1995) apresenta duas metodologias de cálculo – uma baseada na determinação de gamas económicas de corrente, para diferentes cabos empregados, e uma outra, conhecida a corrente de projecto, que determina a secção que minimiza a função custo total.

$$CT = CI + CE \tag{1}$$

Onde:

CT – custo total

CI – custo de investimento

CE – custo de exploração

Perda de energia no 1º ano:

$$E = (I_{\max}^2 \times R \times L \times N_p \times N_c)T \tag{2}$$

Onde:

I<sub>max</sub> – corrente de pico do diagrama

R – resistência CA por unidade de comprimento

L – comprimento da canalização

N<sub>p</sub> – nº de condutores sob idênticas condições

N<sub>c</sub> – nº de circuitos idênticos

T – nº de horas de utilização das perdas

A resistência unitária R é definida através do seu valor em CC e leva em consideração quer os efeitos pelicular e de proximidade –  $\gamma_s$  e  $\gamma_p$ , quer as perdas em ecrãs metálicos e armaduras -  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ .

Em virtude da variação da corrente, factor de carga  $\neq 1$ , e da possibilidade de incremento da mesma, a temperatura do condutor será diferente da correspondente à corrente máxima admissível  $\theta(\theta_z)$ .

A norma considera uma temperatura média igual a:

$$\theta_m = \frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a \tag{3}$$

Onde:

$\theta$  = temperatura correspondente a I<sub>z</sub>

$\theta_a$  = temperatura ambiente

T = nº de horas de utilização das perdas

O número de horas de utilização das perdas é dado pela relação:

$$T = \int_0^{8760} \frac{I^2(t)}{I_{\max}^2} dt \tag{4}$$

Na Fig. 1 podemos apreciar um diagrama de carga diário, que traduz a variação da corrente com o tempo.

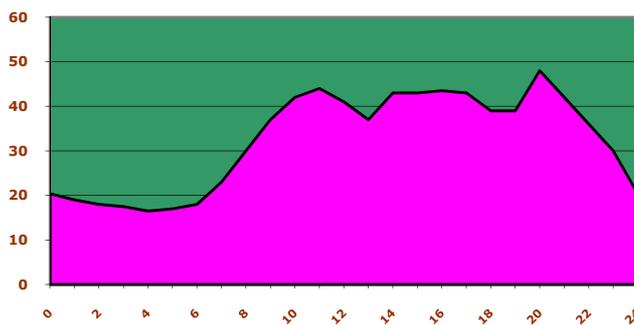


Figura 1 - Diagrama de carga I(t)

A Fig. 2 representa o chamado diagrama normalizado  $\pi(t)$  que resulta do precedente dividindo-o por I<sub>máx</sub>. A ordenada máxima passa a ser obviamente 1.

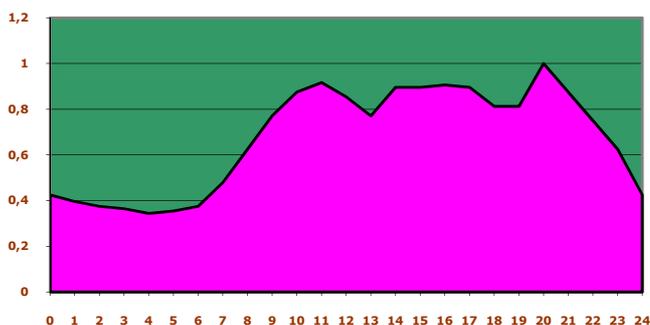


Figura 2 - Diagrama normalizado  $\pi(t)$

A Fig. 3 corresponde ao diagrama  $\pi^2(t)$ .

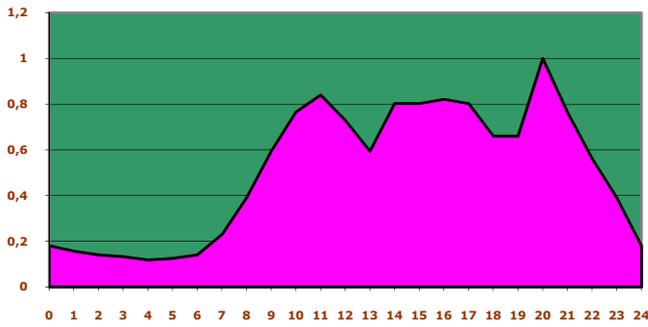


Figura 3 - Diagrama normalizado  $\pi^2(t)$

Como se trata da elevação ao quadrado de valores quando muito iguais a 1 virá mais cavado.

$$T = \int_0^{8760} \pi^2(t) dt \quad (5)$$

O nº de horas de utilização das perdas é referido ao período de 8760 h (1 ano). A estimação deste valor vem normalmente dada através da fórmula:

$$T = \mu \times 8760 \quad (6)$$

$$\mu = p \times f_c + (1 - p) \times f_c^2 \quad (7)$$

Onde:

$\mu$  = factor de carga das perdas

$f_c$  = factor de carga

$p$  = coeficiente

(igual a 0,3 - redes de transporte, e igual a 0,2 - redes de distribuição (IEEE, 1990))

Custo das perdas no 1º ano:

$$CE_E = (I_{\max}^2 \times R \times L \times N_p \times N_c) T \times P \quad (8)$$

Onde:

$CE_E$  = custo de exploração por perda de energia no 1º ano

$P$  = custo do Wh

Custo da potência de perdas:

$$CE_p = (I_{\max}^2 \times R \times L \times N_p \times N_c) \times D \quad (9)$$

Onde:

$CE_p$  = custo de exploração por solicitação de potência adicional

$D$  = custo anual da potência

Custos de exploração (1º ano):

$$CE = (I_{\max}^2 \times R \times L \times N_p \times N_c) (TP + D) \quad (10)$$

Considerando-se os pagamentos feitos no fim do ano, os custos no iésimo ano virão dados por:

$$CE_i = CE[(1+a)^2(1+b)]^{i-1} \quad (11)$$

Admitindo-se crescimento percentual anual da carga de  $a$  e dos custos de energia e potência de  $b$ .

Há duas abordagens para lidar com pagamentos feitos em tempos diferentes, o investimento no início da exploração da instalação e os custos durante o tempo de vida da mesma:

- método das anuidades ;
- método da actualização.

O método da actualização é mais geral e é o usado na norma.

$$r = \frac{(1+a)^2(1+b)}{(1+i)} \quad (12)$$

$$Q = \frac{1-r^N}{1-r} \quad (13)$$

Onde:

$i$  = taxa de actualização

$N$  = nº de anos de vida média da instalação

$$CE_a = (I_{\max}^2 \times R \times L \times N_p \times N_c)(TP + D) \times \frac{Q}{1+i} \quad (14)$$

Onde:

CEa = custo de N anos de exploração da instalação, referidos ao início do empreendimento, isto é, actualizados.

Seja F uma variável auxiliar dada por:

$$F = N_p \times N_c (TP + D) \times \frac{Q}{1+i} \quad (15)$$

A função custo total virá então com a forma:

$$CT = CI + I_{\max}^2 RLF \quad (16)$$

$$R = \frac{\rho_{20} \times B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{S} \times 10^6 \Omega/m \quad (17)$$

$$B = (1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (18)$$

Onde:

$\rho_{20}$  = resistividade do condutor a 20º C em CC

$\theta_m$  = temperatura média

Admitindo um custo de investimento dado por:

$$CI = (A \times S + C) \times L \quad (19)$$

Onde:

A = termo dependente da secção do cabo

C = termo constante

A secção económica virá dada pela fórmula:

$$S_{ec} = 1000 \times I_{\max} \sqrt{\frac{F \times \rho_{20} \times B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A}} \text{ mm}^2 \quad (20)$$

A secção económica será normalizada para o valor comercial mais próximo.

#### 4. Método de fixação dos valores máximos de perdas admissíveis nas canalizações

Este método é preconizado pela Região Administrativa de Hong-Kong, que através do Departamento Eléctrico e Mecânico do Governo (EMSD) definiu uma abordagem no domínio da baixa tensão, até 2008 de carácter voluntário, mas que a partir de 2009 será integrado na legislação, tornando-se, por conseguinte de carácter obrigatório (EMSD, 1997).

A metodologia sugerida pelo presente método conduziu a resultados significativos no que se refere à poupança de energia eléctrica, comprovados pelo EMSD, no decorrer de estudos realizados nos últimos 30 anos, junto dos operadores que voluntariamente adoptaram este procedimento (EMSD, 1997), (Hui, 2003).

A metodologia consiste em fixar os valores máximos de perdas admissíveis nas canalizações, ou seja, a de impor rendimentos mínimos das linhas.

Para além das condições técnicas de temperatura e queda de tensão a máxima perda de potência passa a ser critério de dimensionamento.

Consideram-se duas situações:

- circuitos trifásicos lineares equilibrados;
- trifásicos não-lineares.

##### 1º caso - Circuito trifásico linear equilibrado

Potência transportada e perdas nos condutores do circuito:

$$P = \sqrt{3} \times U_c \times I_b \times \cos \varphi \quad (21)$$

$$p = 3 \times I_b^2 \times r \times L \quad (22)$$

Onde:

$I_b$  = corrente do circuito

$L$  = comprimento dos condutores

$r$  = resistência em CA por metro de canalização à temperatura de funcionamento

O valor percentual  $p_r$  das perdas vem dado pela relação:

$$p_r = \frac{3 \times I_b^2 \times r \times L}{\sqrt{3} \times U_c \times I_b \times \cos \varphi} \quad (23)$$

Donde, definido o valor percentual que se admite para as perdas, se determinará o máximo valor para a resistência  $r$ .

$$r_{m\acute{a}x} = \frac{p_r \times U_c \times \cos \varphi \times 1000}{\sqrt{3} \times I_b \times L} \quad \text{m}\Omega/\text{m} \quad (24)$$

Encontrado o valor de  $r_{m\acute{a}x}$ , as tabelas fornecerão a secção a utilizar.

Correcção das perdas nos cabos devido às diferentes temperaturas de funcionamento.

A temperatura do condutor pode ser aproximada através da seguinte fórmula:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{I_b^2}{I_{zT}^2} (\theta_z - 30) \quad (25)$$

Onde:

$\theta_c$  = temperatura do condutor

$\theta_a$  = temperatura ambiente

$I_{zT}$  = corrente máxima admissível no cabo dada pelas tabelas

$\theta_z$  = temperatura máxima admissível nos condutores

A resistência à temperatura  $\theta_c$  pode ser expressa a partir da relação:

$$R_c = R_0 (1 + \alpha_0 \times \theta_c) \quad (26)$$

Onde:

$R_0$  = resistência do condutor a 0º C

$\alpha_0$  = coeficiente de termorresistividade a 0º C

Donde:

$$\frac{R_c}{R_z} = \frac{1 + \alpha_0 \times \theta_c}{1 + \alpha_0 \times \theta_z} = \frac{234,4 + \theta_c}{234,4 + \theta_z} \quad (27)$$

**2º caso - Circuito trifásico não-linear, equilibrado, com valores conhecidos de corrente  $I_b$  e de taxa de distorção harmónica THD**

A potência aparente transportada pelo circuito será dada por:

$$S = \sqrt{3} \times U_c \times I_b \quad (28)$$

Onde:

$$I_b = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots} \quad (29)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (30)$$

$$I_b = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (31)$$

$$I_1 = \frac{I_b}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (32)$$

Admitindo baixa distorção da tensão, o que é razoável, a potência activa transportada terá por expressão:

$$P = \sqrt{3} \times U_c \times I_1 \times \cos \varphi \quad (33)$$

Onde:

$I_1$  = componente fundamental da corrente

$\cos \varphi$  = factor de potência do circuito

Desprezando os efeitos pelicular e de proximidade, as perdas nos condutores, incluindo o condutor neutro, será:

$$p = (3 \times I_b^2 + m \times I_N^2) \times r \times L \quad (34)$$

$$I_N = 3 \times \sqrt{I_3^2 + I_6^2 + I_9^2 \dots} \quad (35)$$

$$m = \frac{S_F}{S_N} \quad (36)$$

Que é a relação entre as secções de fase e de neutro.

As perdas percentuais ( $p_r$ ) na canalização virão então dadas por:

$$p_r = \frac{(3 \times I_b^2 + m \times I_N^2) \times r \times L}{\sqrt{3} \times U_c \times I_1 \times \cos \varphi} \quad (37)$$

E a máxima resistência unitária a atribuir ao cabo:

$$r_{m\acute{a}x} = \frac{p_r \times \sqrt{3} \times U_c \times I_1 \times \cos \varphi \times 1000}{(3 \times I_b^2 + m \times I_N^2) \times L} \quad (38)$$

As tabelas especificarão a secção do cabo a considerar.

A correcção de temperatura poderá ser feita mediante a fórmula aproximada seguinte:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{(3 \times I_b + m \times I_N)^2}{(3 \times I_{zT})^2} (\theta_z - 30) \quad (39)$$

Alguns valores de referência para  $p_r$ :

**Tabela I - Valores máximos das perdas percentuais para diferentes tipos de circuitos**

| Tipo de circuito  | $p_r$     |
|---|-----------|
| Ligações entre transformadores de distribuição e Quadros Gerais                     | Máx. 0,5% |
| Canalizações entre Quadros Gerais e Quadros Parciais                                | 1,5%      |
| Circuitos terminais: iluminação, tomadas ou outros usos com correntes acima de 32 A | 1%        |
| Colunas montantes e entradas, (até 2,5% para utilizações domésticas)                | 1,5%      |
| Alimentações de grandes cargas como motores de potência apreciável                  | 2,5%      |

## 5. Conclusões

A busca da eficiência e da utilização racional de energia (URE), particularmente nos sistemas eléctricos, leva a considerar todos aqueles aspectos que concorrem para realizar esse fim. A consideração do rendimento das canalizações, já contemplada nas áreas do transporte e grande distribuição, faz todo o sentido aplicada às redes de baixa tensão, até pela sua enorme extensão.

Em Hong-Kong, onde o sistema de fixação de perdas máximas se encontra implementado há alguns anos, o dimensionamento económico de condutores insere-se num programa mais vasto de URE em edifícios de serviços, contemplando vertentes tais como instalações de iluminação, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, transporte por elevadores, monta-cargas e escadas rolantes e o desempenho energético de edifícios apresentando resultados tangíveis significativos.

### Fontes de Informação Relevantes

- [CEI, 1995] CEI IEC 60 287-3-2, Electric cables, Calculation of the current rating – Part 3 – Section 2, Suíça, 1995.
- [Cooper, 1997] Copper Development Association, Electrical Energy Efficiency, U.K., 1997.
- [EMSD, 1997] Electrical and Mechanical Services Department (EMSD), Code of Practice for Energy Efficiency of Electrical Installations, Hong-Kong, 2005.
- [Anders, 1997] Anders J George, Rating of Electric Power Cables, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1997.
- [Hui, 2003] Hui, Sam C. M., Energy Efficiency and Environmental Assessment for Buildings in Hong Kong, MECM LEO Seminar, Advances on Energy Efficiency and Sustainability in Buildings, pag, 21-22, 2003, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [Silva, 2009] Silva H.J., Gomes A.A., Ramos S.C., “A definição do valor máximo das perdas nas canalizações eléctricas como medida de eficiência energética”, JLBE09 - Jornadas Luso-Brasileiras de Ensino e Tecnologia em Engenharia 2009, 10 a 13 de Fevereiro de 2009, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.