



O da direita
é a escolha certa.

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS

UM CAMINHO PARA ECONOMIZAR ENERGIA

INTRODUÇÃO

A função de um cabo de potência é distribuir a energia elétrica da forma mais eficiente possível desde uma fonte até um ponto de utilização. Infelizmente, devido à sua resistência elétrica, os cabos dissipam na forma de calor uma parte da energia transportada, de forma que uma eficiência de 100% não é obtida. Podemos ter uma idéia da extensão que este problema atinge, se lembrarmos que os cabos modernos são capazes de operar em temperaturas tão altas quanto aquelas que os sistemas de aquecimento central trabalham.

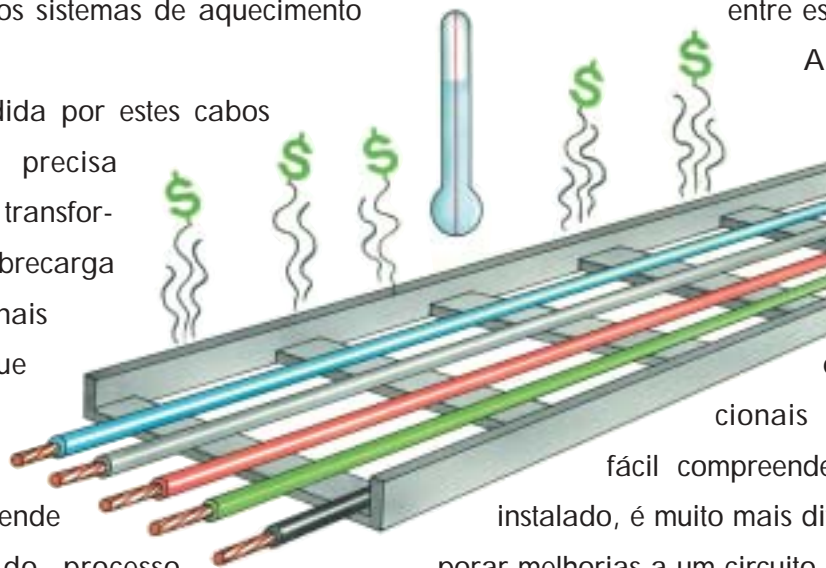
A energia perdida por estes cabos nestas temperaturas precisa ser paga por alguém, transformando-se em uma sobrecarga nos custos operacionais do equipamento que está sendo alimentado. Esta sobrecarga financeira se estende por toda a vida do processo envolvido.

O custo da energia é cada vez mais um componente importante nos custos operacionais das edificações comerciais e industriais. Neste sentido, todos os esforços possíveis devem ser feitos para conter gastos desnecessários. Os aspectos ambientais e conservacionistas relacionados com a energia desperdiçada também são importantes fatores, cada vez mais ressaltados.

Deve ser observado que as perdas por calor geradas em um cabo caminham lado a lado com uma redução na tensão disponível na extremidade junto à carga.

Deste modo, é de bom senso supor que se devam adotar projetos de distribuição que visem reduzir, na prática, as perdas de energia.

Teoricamente, seria possível reduzir a perda de energia a valores insignificantes, aumentando-se a seção do condutor. No entanto, como isto significa aumentar o custo do cabo, tende-se a anular a economia conseguida pela melhoria da eficiência na distribuição, sendo que é necessário encontrar-se então um compromisso entre estas duas variáveis.



A melhor ocasião para se incorporar uma distribuição de alta eficiência é na etapa de projeto, quando custos adicionais são marginais. É

fácil compreender que, após estar instalado, é muito mais difícil e caro se incorporar melhorias a um circuito.

O problema central é o de identificar uma seção de condutor que reduza o custo da energia desperdiçada, sem incorrer em custos iniciais excessivos de compra e instalação de um cabo. A abordagem básica deste tipo de problema foi formulada em 1881 por Lord Kelvin e tem sido empregada desde então em numerosos casos onde o custo (ou peso) e eficiência necessitam ser considerados simultaneamente para se obter uma solução ótima.

OS SEIS CRITÉRIOS TÉCNICOS DE DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES ELÉTRICOS

Chamamos de dimensionamento técnico de um circuito à aplicação dos diversos itens da NBR 5410 relativos à escolha da seção de um condutor e do seu respectivo dispositivo de proteção.

Os seis critérios da norma são:

- 
- CURTO CIRCUITO
 - QUEDA DE TENSÃO...

- seção mínima;
- capacidade de condução de corrente;
- queda de tensão;
- sobrecarga;
- curto-circuito;
- contratos indiretos.

Para considerarmos um circuito completa e corretamente dimensionado, é necessário realizar os seis cálculos acima, cada um resultando em uma seção e considerarmos como seção final aquela que é a maior dentre todas listadas.

É importante lembrar que o dimensionamento pelo critério técnico conduz à maior seção possível de condutor, que não compromete a segurança, a qualidade e a durabilidade da instalação elétrica.

No entanto, quanto menor a seção do condutor, maior a sua resistência elétrica e, conseqüentemente, maior a perda de energia ao longo do circuito. É dentro deste contexto que surge o critério de dimensionamento econômico, que passaremos a examinar a seguir.

O CONCEITO DE SEÇÃO ECONÔMICA

Pode-se observar que, quanto menor a seção do cabo, menor seu custo inicial de aquisição e instalação e maior o seu custo operacional. Este último é calculado considerando-se a resistência elétrica do condutor, a corrente do circuito e o tempo que ela circula, ou seja:

$$E = R I^2 \Delta t \quad [1]$$

onde:

E = energia dissipada no condutor, medida em Wh;
R = resistência elétrica do condutor, medida em ohm;
I = corrente elétrica que percorre o condutor, medida em ampères;
 Δt = intervalo de tempo de circulação da corrente, medido em horas.

Lembrando que

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [2]$$

sendo:

ρ = resistividade do material condutor;
 l = comprimento do circuito;
S = seção transversal do condutor.

Temos, substituindo [2] em [1]:

$$E = \rho \frac{l}{S} I^2 \Delta t \quad [3]$$

O gráfico 1 apresenta as curvas típicas de perdas de energia e custo inicial de uma instalação em função da seção (bitola) dos condutores.

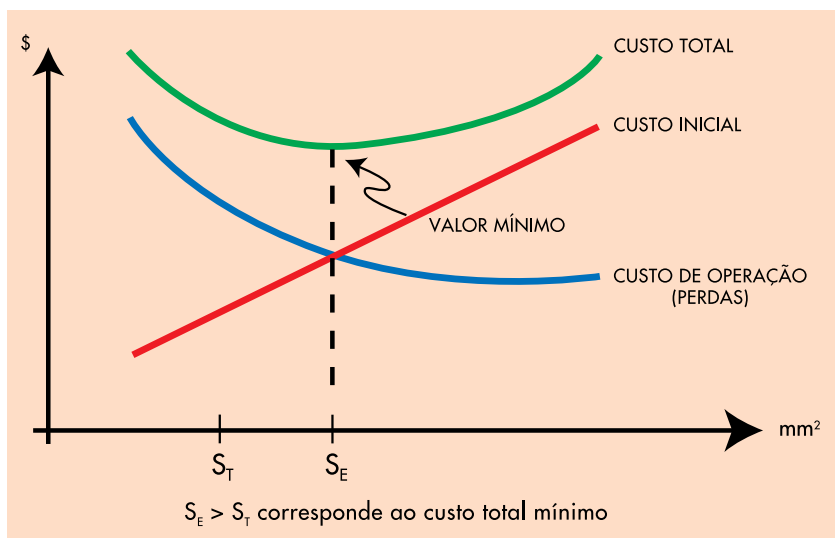


Gráfico 1: Custo inicial e custo operacional dos cabos em função da seção nominal.

É fácil verificar na fórmula [3] que, quanto menor a seção do cabo (S), maior a perda de energia (E) e vice-versa.

Se no gráfico 1 somarmos ponto a ponto as duas curvas (custo inicial e perdas no tempo), teremos, para cada seção, o custo total que aquele condutor terá ao longo de sua vida.

Como podemos observar no gráfico, a curva relativa ao custo total do cabo apresenta um ponto de valor mínimo (\$) para uma dada seção (mm²). Desta forma, chamamos de **seção econômica (SE)** de um dado circuito aquela que corresponde ao menor custo total de instalação e operação de um cabo.

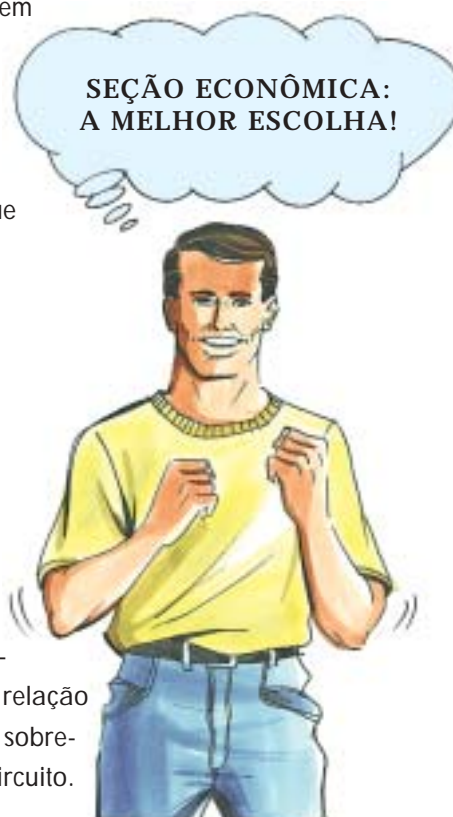
A utilização deste critério de dimensionamento pode ser bastante vantajosa em todos os tipos de instalações e, particularmente, nos seguintes casos:

- naqueles circuitos com seções iguais ou superiores a 25 mm²;
- nos circuitos que funcionam em regime contínuo, com correntes que não apresentam grandes variações;
- nos circuitos onde o critério técnico de dimensio-

namento que prevaleceu foi o de capacidade de condução de corrente. Isto porque se o circuito foi dimensionado por outro critério, como por exemplo queda de tensão, a seção do cabo já foi aumentada (em relação à seção por capacidade de corrente), diminuindo o aquecimento do condutor.

Uma vantagem adicional de se dimensionar um condutor pelo critério econômico é que haverá um aumento de sua vida útil (pelo fato de o cabo trabalhar em menores temperaturas).

Além disto, o condutor apresentará um melhor comportamento em relação às correntes de sobrecarga e curto-circuito.



O CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO POR SEÇÃO ECONÔMICA

Para a determinação da seção econômica de um condutor para um dado circuito, seja ele em baixa ou média tensão, deve-se utilizar as recomendações da IEC 287-3-2 - (ainda não há norma NBR sobre o assunto).

Deve-se destacar que o critério econômico aplica-se a cabos com qualquer tipo de isolamento, ou seja, PVC, EPR, XLPE, etc.

Esta norma IEC estabelece que "A fim de combinar os custos de compra e instalação com os das perdas de energia que ocorrem durante a vida econômica de um cabo, é necessário exprimi-los em valores econômicos comparáveis, isto é, em valores referidos à mesma época. É conveniente utilizar a data de compra da instalação como referência, chamando-a de 'atual'. Os custos 'futuros' das perdas de energia são então convertidos a seus equivalentes 'valores atuais'".

A equação básica do dimensionamento econômico é a seguinte:

$$C_t = C_c + C_i + C_e \quad [4]$$

onde:

C_t =custo total durante a vida do cabo;

C_c =custo inicial de compra do cabo;

C_i =custo inicial de instalação do cabo;

C_e =custo de energia desperdiçada ao longo do tempo.

A IEC 287-3-2 apresenta um equacionamento bastante completo que implica, na prática, na realização de uma grande quantidade de cálculos. Desta forma, a fim de simplificar o trabalho, realizamos algumas considerações que conduzem a um dimensionamento bastante aceitável para a maioria dos casos.

As principais simplificações que o método faz estão baseadas nas seguintes hipóteses:

- o custo inicial de instalação (mão-de-obra) dos cabos é constante, independente da seção do condutor;
- as perdas devidas aos efeitos pelicular e de proximidade, bem como aquelas devidas às blindagens

e armações metálicas dos cabos são desprezadas;

- na componente do custo total devido à energia, considera-se apenas a energia ativa, desprezando-se o custo devido à demanda;
- considera-se a temperatura de operação média dos cabos em torno de 50 °C, valor bastante razoável se pensarmos em uma temperatura ambiente geralmente de 30 °C;
- considera-se um crescimento anual médio de carga de um circuito em torno de 1,5%;
- admite-se uma taxa anual de juros média de 6%.

Com base nas simplificações anteriores, temos as seguintes expressões para o cálculo da seção econômica de um condutor de cobre:

$$SE = \frac{I_b}{C_h C_n} \sqrt{\frac{e}{G'}} \quad [5]$$

$$C_h = \frac{2,66}{\sqrt{H}} \quad [6]$$

$$C_n = \frac{0,69}{\sqrt{1 - 0,937^N}} \quad [7]$$

$$G' = \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} \quad [8]$$

sendo:

I_b = corrente de projeto, em ampères (A);

e = custo da energia elétrica (ativa), em R\$ / kWh;

H = número de horas / ano de funcionamento do circuito;

N = número de anos considerado no cálculo;

P_1, P_2 = preço dos cabos;

S_1, S_2 = seção dos cabos.

DETERMINAÇÃO DE G'

Para a determinação do valor de G', conforme a equação [8], é preciso consultar um fornecedor de cabos e obter os seus preços, como mostra o exemplo da tabela a seguir. Estes valores referem-se a um cabo unipolar, classe de tensão 0,6 / 1kV, isolado em EPR e com cobertura em PVC (segundo NBR 7286).

Seção (mm ²)	*Preço (R\$ / km)	G' (R\$ / mm ² .km)
25	3916	—
35	5185	127 => [(5185-3916) / (35-25)]
50	7324	143 => [(7324-5185) / (50-35)]
70	10.113	139 => [(10113-7324) / (70-50)]
95	13.809	148 : : :
120	17.504	148 : : :
150	21.560	135 : : :
185	27.022	156 : : :
240	34.950	144 => [(34950-27022) / (240-186)]
	MÉDIA	142

Tabela 1: Determinação de G', conforme a IEC 287-3-2

A IEC 287-3-2 recomenda que, para emprego da fórmula [8], seja tirada a média dos valores de G' calculados para todas as combinações de seções conforme a tabela. No caso deste exemplo, o valor médio de G' é igual a 142 R\$ / mm². km.

Exemplo de aplicação da fórmula para aplicação do dimensionamento econômico

Vamos considerar um circuito que alimenta um quadro de distribuição constituído por 3 cabos unipolares com condutor de cobre, isolamento em borracha etilenopropileno (EPR) e cobertura em PVC, instalados em trifólio (triângulo) em uma eletrocalha do tipo escada para cabos.

O circuito tem 100 metros de comprimento, a temperatura ambiente é de 30 °C e a corrente de projeto (I_b) é de 220 A. Foi estimado que este circuito permaneça em operação durante 4.000 horas por ano (H). Deseja-se que a análise seja feita para um período de 10 anos (N).

O valor da tarifa de energia elétrica (e) considerado é de 0,17 R\$ / kWh. Para este tipo de cabo, adotaremos G' = 142 R\$ / mm². km (conforme tabela 1).

Assim, temos:

$$\text{de [6]: } Ch = \frac{2,66}{\sqrt{H}} = \frac{2,66}{\sqrt{4000}} = 0,0421$$

$$\text{de [7]: } Cn = \frac{0,69}{\sqrt{1 - 0,937^N}} = \frac{0,69}{\sqrt{1 - 0,937^{10}}} = 0,998$$

$$\text{de [5]: } SE = \frac{I_b}{Ch Cn} \sqrt{\frac{e}{G'}} = \frac{220}{0,0421 \times 0,998} \sqrt{\frac{0,17}{142}} = 181 \text{mm}^2$$

Neste caso, adota-se a seção padronizada mais próxima que é a de 185mm².

ANÁLISE COMPARATIVA DO CABO DIMENSIONADO PELOS CRITÉRIOS ECONÔMICO E TÉCNICO

No exemplo anterior, se dimensionarmos o circuito apresentado com base no critério técnico de acordo com a tabela 34, coluna 5 da NBR 5410/1997 (tabela 2 - pág.10), chegaremos a uma seção de 70 mm², com uma capacidade de corrente de 268 A. Pelo gráfico 2 (pág.11), entrando com $I_b / I_z = 220 / 268 = 0,82$, no eixo "x", encontraremos uma temperatura no condutor de aproximadamente 75 °C no eixo "y". Conforme a tabela 3 (pág.11), o valor da resistência elétrica do cabo 70mm² é de 0,268 Ω / km a 20 °C. Para uma temperatura no condutor de aproximadamente 75 °C, encontramos na tabela 4 (pág.11) um fator de correção de 1,236. Deste modo, para um condutor 70 mm², com 100 metros (0,1 km) e 75 °C de temperatura, temos uma resistência elétrica de:

$$0,268 \text{ } \Omega / \text{ km} \cdot 0,1\text{km} \cdot 1,236 = 0,0331 \text{ } \Omega$$

O custo inicial desta linha foi estimado em R\$ 3.034,00 (3 x 100 metros x R\$ 10,113 / m, ver tabela 1).

A perda em energia elétrica por ano (Ce) será:

$$Ce = I^2 \cdot R \cdot n \cdot H \cdot e \quad [9]$$

onde:

I = corrente (A);

R = resistência elétrica na temperatura de operação do condutor (Ω);

N = número de condutores carregados do circuito.

No nosso exemplo, temos:

$$Ce = I^2 \cdot R \cdot n \cdot H \cdot e = 220^2 \cdot 0,0331 \cdot 3 \cdot 4000 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} = \text{R\$ } 3.268,16.$$

Para o cabo dimensionado pela seção econômica (185mm²), temos uma capacidade de condução de corrente de 510 A (coluna 5 da tabela 2). Pelo gráfico 2, entrando com $I_b / I_z = 220 / 510 = 0,43$, no eixo "x", encontraremos uma temperatura no condutor de 50 °C

no eixo "y". Conforme a tabela 4, o valor da resistência elétrica do cabo 185mm² é de 0,0991 Ω / km a 20 °C. Para uma temperatura no condutor de aproximadamente 50 °C, encontramos na tabela 3 um fator de correção de 1,118. Deste modo, para um condutor 185mm², com 100 metros (0,1km) e 50 °C de temperatura, temos uma resistência elétrica de:

$$0,0991 \text{ } \Omega / \text{ km} \cdot 0,1\text{km} \cdot 1,118 = 0,0111 \text{ } \Omega$$

O custo inicial desta linha foi estimado em R\$ 8.106,00 (3 x 100 metros x R\$ 27,02 / m, ver tabela 1).

A perda em energia elétrica por ano será:

$$Ce = I^2 \cdot R \cdot n \cdot H \cdot e = 220^2 \cdot 0,0111 \cdot 3 \cdot 4000 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} = \text{R\$ } 1.095,96.$$

O custo total inclui não apenas o custo inicial de aquisição e instalação dos cabos, mas também os custos das perdas de energia ao longo do tempo. O problema neste caso é que estes dois custos ocorrem em épocas distintas: enquanto que o custo de aquisição e instalação acontece no início da obra, os custos de perdas de distribuem ao longo da vida da instalação. Assim, somar diretamente estas duas grandezas no tempo não é correto.



Para tanto, devemos recorrer, na matemática financeira, ao conceito de valor presente (VP), que mostra como os pagamentos futuros da energia efetuados durante a vida da instalação podem ser expressos em valores equivalentes no início do projeto. Ao se converter os valores futuros em valores presentes, é possível, então, somá-los aos custos iniciais de instalação.

A determinação do valor presente (VP) é dada por:

$$VP = C \times Q \quad [10]$$

$$Q = r \frac{(1 - r^N)}{(1 - r)} \quad [11]$$

$$r = \frac{1}{1 + \frac{i}{100}} \quad [12]$$

onde:

C = quantidade a ser paga anualmente pelas perdas de energia (\$);

N = número de anos de funcionamento do circuito considerado na análise;

i = taxa de juros ao ano (%).

No caso do nosso exemplo, temos

Cabo dimensionado pelo critério técnico (Seção de 70mm²)

- custo inicial de aquisição e instalação = R\$ 3.034,00;
- custo anual de perda de energia = C = R\$ 3.268,16;
- período de análise considerado = N = 10 anos
- taxa de juros ao ano = i = 6%.

Cálculo do valor presente do custo da perda de energia:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{i}{100}} = \frac{1}{1 + \frac{6}{100}} = 0,943$$

$$Q = r \frac{(1 - r^N)}{(1 - r)} = 0,943 \frac{(1 - 0,943^{10})}{(1 - 0,943)} = 7,34$$

$$VP = C \times Q = 3.268,16 \times 7,34 = R\$ 23.988,29$$

$$\text{Custo total do cabo } 70\text{mm}^2 = R\$ 3.034,00 + R\$ 23.988,29 = R\$ 27.022,29.$$

Cabo dimensionado pelo critério econômico (Seção de 185mm²)

- Custo inicial de aquisição e instalação = R\$ 8.106,00;
- Custo anual de perda de energia = C = R\$ 1.095,96;
- Período de análise considerado = N = 10 anos;
- Taxa de juros ao ano = i = 6%.

Cálculo do valor presente do custo da perda de energia:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{i}{100}} = \frac{1}{1 + \frac{6}{100}} = 0,943$$

$$Q = r \frac{(1 - r^N)}{(1 - r)} = 0,943 \frac{(1 - 0,943^{10})}{(1 - 0,943)} = 7,34$$

$$VP = C \times Q = 1.095,96 \times 7,34 = R\$ 8.044,35$$

Custo total do cabo 185mm² = R\$ 8.106,00 + R\$ 8.044,35 = R\$ 16.150,34.

Em resumo, temos:

Critério	Seção (mm ²)	Custo inicial (R\$)	Custo de perdas (valor presente R\$)	Custo total (R\$)	%
Técnico	70	3.034	23.988	27.022	100
Econômico	185	8.106	8.044	16.150	60

Como podemos verificar, a seção do cabo determinada pelo critério econômico é mais vantajosa de ser utilizada, caso analisemos o assunto sob um ponto de vista de longo prazo, apesar de o custo inicial do cabo 185mm² ser maior do que o cabo 70mm².

Observe ainda que o exemplo refere-se a apenas um circuito da instalação. Se pensarmos em um caso real, onde pode haver dezenas e às vezes centenas de circuitos, podemos concluir que a economia no período de 10 anos poderia chegar à casa de centenas de milhares de reais.



PERÍODO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

O período de retorno em que os dois investimentos se igualam, no caso do exemplo, pode ser determinado como segue:

- diferença entre os custos iniciais pelos critérios técnico e econômico = R\$ 8.106,00 - R\$ 3.034,00 = R\$ 5.072,00;
- diferença entre os custos de perda de energia dos dois critérios (VP) = R\$ 23.988,29 - R\$ 8.044,35 = R\$ 15.943,94 em 10 anos \Rightarrow R\$ 1.594,39 por ano.
- período de retorno do investimento = R\$ 5.072,00 / R\$ 1.594,39 = 3,2 anos.

Este resultado significa que o desembolso inicial extra que teve que ser realizado para se comprar um cabo de maior seção retornará em um período de 3,2 anos (inferior ao período considerado de 10 anos). Além disso, como a vida útil estimada de uma instalação elétrica "normal" é da ordem de 25 a 30 anos, pode-se concluir que a instalação do circuito do nosso exemplo pelo critério econômico é **um ótimo investimento**.



TABELA 34 - CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE, EM AMPÈRES, PARA OS MÉTODOS DE REFERÊNCIA E, F E G DA TABELA 28

Condutor de cobre

- Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares - cobre e alumínio, isolação de EPR ou XLPE;
- Temperatura de 90 °C no condutor;
- Temperatura ambiente 30 °C

Seções nominais (mm ²)	Métodos de instalação definidos na tabela 28						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares				
	E	E	F	F	F	G	G
	Cabos bipolares	Cabos tripolares e tetrapolares	2 condutores isolados ou 2 cabos unipolares	Condutores isolados ou cabos unipolares trifólio	3 condutores isolados ou 3 cabos unipolares		
				Contíguos	Espaçados horizontalmente	Espaçados verticalmente	
1	2	3	4	5	6	7	8
COBRE							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833

Tabela 2: Extraída da tabela 34 da NBR 5410/1997.

Seção (mm ²)	Resistência elétrica a 20 °C (Ω/km)
25	0,727
35	0,524
50	0,387
70	0,268
95	0,193
120	0,153
150	0,124
185	0,0991
240	0,0800

Tabela 3: Resistência elétrica de condutores de cobre com classe de encordoamento 2.

Temperatura (°C)	Fator de correção
20	1
30	1,039
40	1,079
50	1,118
60	1,157
70	1,197
80	1,236
90	1,275

Tabela 4: Fator de correção de temperatura para resistência elétrica.

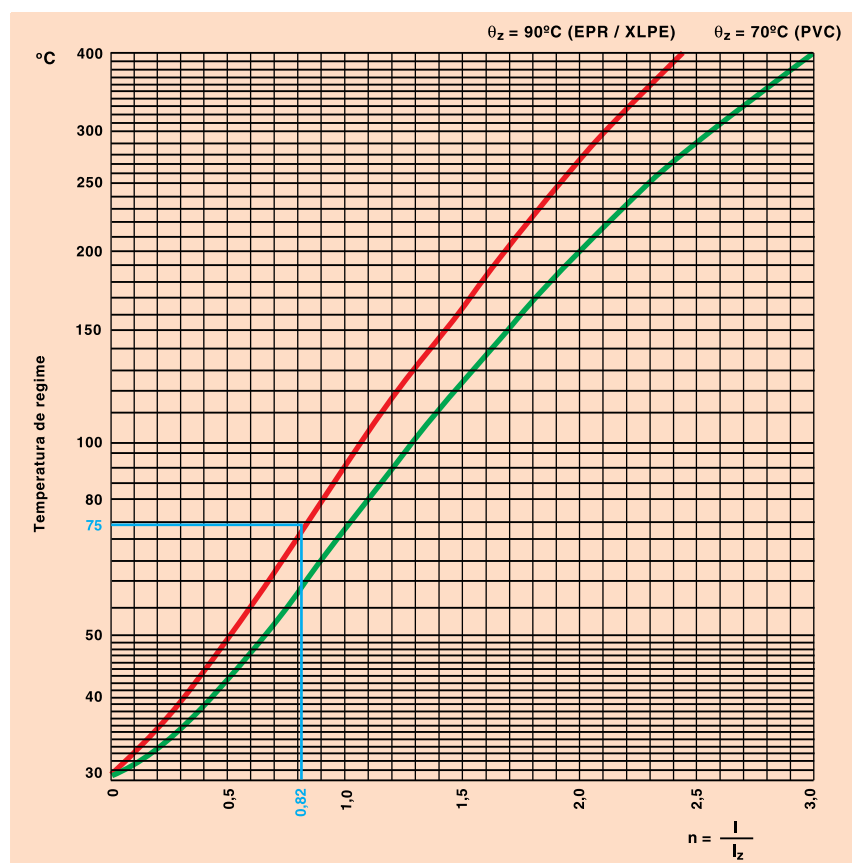


Gráfico 2.
Temperatura de trabalho em função da corrente aplicada a um condutor.
(Fonte: Livro de Instalações Elétricas, Ademaro Cotrim)

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS

HILTON MORENO

Professor do Departamento de Eletricidade da Escola de Engenharia Mauá.

Membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT.

REFERÊNCIAS:

- NBR 5410 / 1997: Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Procedimento - ABNT
- IEC 287-3-2: Electric Cables - Calculation of the current rating Part III - Section on operating condition, Section II: Economic Optimization of Power Cable Size, 1995.
- Cotrim, Ademaro: Instalações Elétricas 3ª edição, Editora Makron Books.

A P O I O :



.....
O Instituto Brasileiro do Cobre - Procobre
promove campanhas de conscientização,
distribui publicações e patrocina cursos e palestras.

O cobre participa de uma vida melhor.
.....



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128 - conj. 1102 - CEP - 01451-903
Tel.: / Fax: (011) 3816-6383 - São Paulo - Brasil
internet: www.procobrebrasil.org e-mail: unicobre@procobrebrasil.org