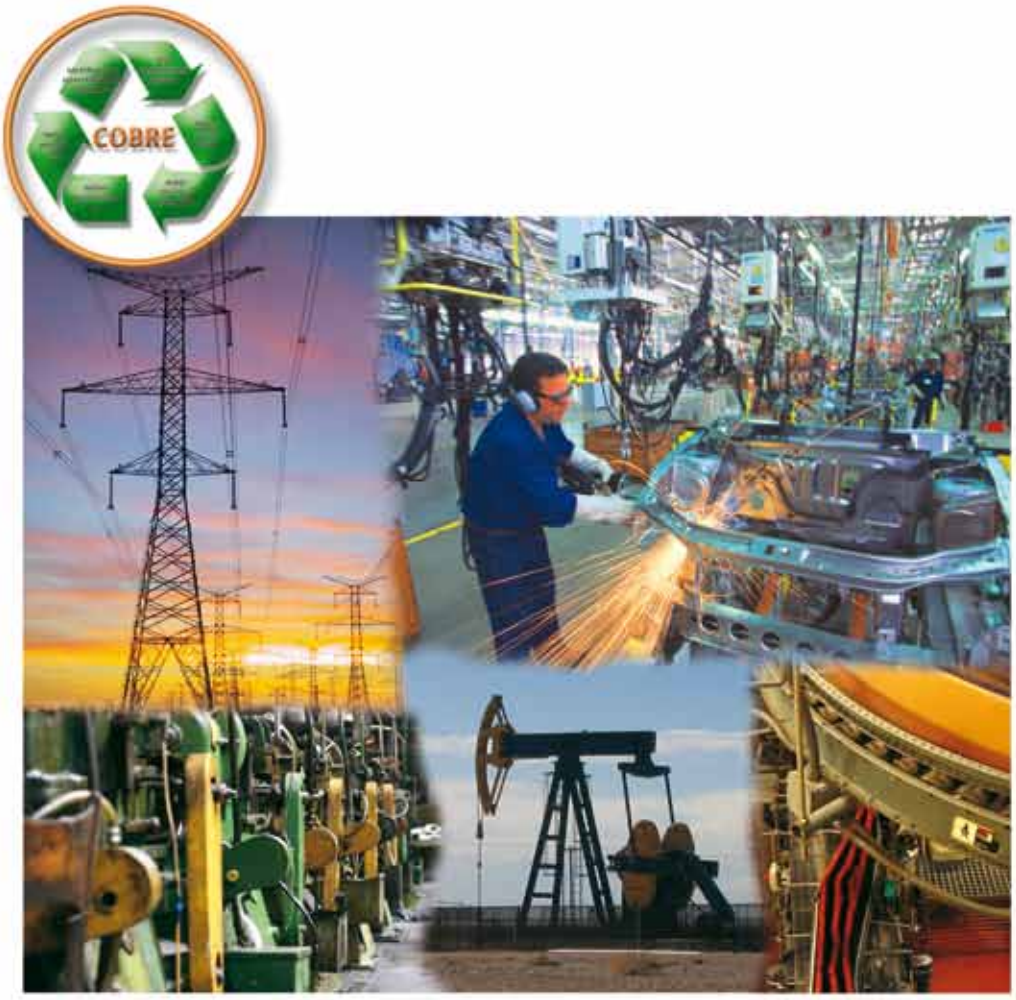
Dimensionamento Econômico e Ambiental de Condutores Elétricos.

Um caminho para economizar energia e preservar o meio ambiente.


COBRE

Índice

1 INTRODUÇÃO 4

2 DIMENSIONAMENTO TÉCNICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS 7

3 PERDA DE ENERGIA (JOULE) NOS CONDUTORES ELÉTRICOS 7

3.1 Perda joule na frequência fundamental 7

3.2 Perda joule na presença de correntes harmônicas 9

4 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS CONFORME A NORMA ABNT NBR 15920 11

4.1 Introdução 11

4.2 Equações para dimensionamento econômico de condutores de acordo com a segunda abordagem da ABNT NBR 15920 12

5 ASPECTOS ECONÔMICOS 16

6 DIMENSIONAMENTO AMBIENTAL DE CONDUTORES ELÉTRICOS 18

6.1 Introdução 18

6.2 Redução das emissões de CO_2 na geração de energia pelo aumento da seção 18

6.3 Aumento das emissões de CO_2 na fabricação de condutores pelo aumento da seção 19

6.4 Conclusão 20

7 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DE CONDUTORES ELÉTRICOS 21

8 REFERÊNCIAS 30

1 - Introdução

A função de um cabo de potência é conduzir a energia elétrica da forma energeticamente mais eficiente e ambientalmente mais amigável possível desde a fonte até o ponto de utilização. No entanto, devido à sua resistência elétrica, o cabo dissipa, na forma de calor (perda joule), uma parte da energia transportada, de forma que uma eficiência de 100% não é obtida neste processo. Em consequência, essa perda irá requerer a geração de uma energia adicional que contribuirá para o acréscimo da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

A energia dissipada por estes cabos precisa ser paga por alguém, transformando-se assim em um acréscimo nos custos operacionais do equipamento que está sendo alimentado e da instalação elétrica como um todo. Esta sobrecarga financeira se estende por toda a vida útil do processo envolvido. O custo da energia tem um peso cada vez mais 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. Estudos revelam que, ao longo do ciclo de vida dos fios e cabos elétricos, as mais significativas emissões de CO_2 (gás do efeito estufa) são produzidas quando os condutores estão sendo utilizados no transporte de energia elétrica, sendo relativamente pequenas na fase de fabricação e descarte desses produtos. Essas emissões de CO_2 são resultantes da geração extra de energia necessária para compensar as

perdas joule na condução da corrente elétrica pelo circuito. Desta forma, mantidas todas as demais características da instalação, a maneira mais adequada de reduzir as perdas joule nos fios e cabos, e consequentemente, as emissões de CO_2, é aumentar a seção nominal dos condutores elétricos.

AUMENTAR A SEÇÃO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS CONTRIBUI PARA A REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO_2 NA ATMOSFERA

No entanto, como isto significa aumentar o custo inicial do cabo, seus acessórios, linhas elétricas e mão de obra de instalação, é interessante encontrar um compromisso entre estas duas variáveis (redução nas perdas x aumento do custo inicial da instalação).

A melhor ocasião para se considerar a questão das perdas joule e emissão de CO_2 numa instalação elétrica é na etapa de projeto, quando custos adicionais são marginais. É fácil compreender que, após sua instalação, é muito mais difícil e caro incorporar melhorias a um circuito. A questão central neste assunto é 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.

Os critérios de dimensionamento econômico e ambiental apresentados a seguir são aplicáveis a todos os tipos de instalações elétricas de baixa e média tensão, sejam nas instalações prediais, comerciais e industriais ou nas redes públicas de distribuição de energia elétrica.

Existem algumas situações onde o emprego de tais critérios é particularmente mais interessante, tais como aquelas que envolvem circuitos com cargas relativamente elevadas, que funcionam por longos períodos durante o dia. São os casos de alimentadores de quadros de distribuição, quadros de luz, alimentação de motores elétricos, torres de resfriamento, ar condicionado, dentre outros, facilmente encontrados, por exemplo, em shopping centers, indústrias em geral, hospitais, edifícios comerciais e públicos, portos, aeroportos, estádios e ginásios esportivos, dentre outros.

2 – DIMENSIONAMENTO TÉCNICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS

Chamamos de dimensionamento técnico de um condutor elétrico aquele que aplica os requisitos das normas ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão e ABNT NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão. Os requisitos de ambas as normas consideram a:

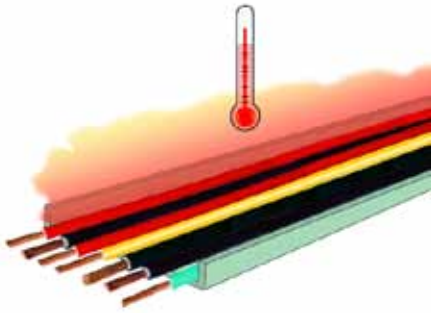
- seção nominal mínima do condutor;
- capacidade de condução de corrente do condutor em regime permanente;
- queda de tensão no condutor;
- proteção do condutor contra sobrecarga;
- proteção do condutor contra curto-circuito;

Para considerar um circuito completa e corretamente dimensionado, é necessário atender os requisitos mencionados, sendo que cada um pode resultar em uma seção nominal de condutor. Considera-se então a seção nominal final aquela que é a maior seção dentre todas as obtidas.

É importante destacar que o dimensionamento técnico do condutor resulta quase sempre na menor seção nominal possível 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, consequentemente, maior a perda de energia (joule) ao longo do circuito. É dentro deste contexto que surge o critério de dimensionamento econômico de condutores elétricos, que passaremos a examinar a seguir.

3 – PERDA DE ENERGIA (JOULE) NOS CONDUTORES ELÉTRICOS

3.1 Perda joule na frequência fundamental



A perda de energia (joule) num condutor é calculada a partir da sua resistência elétrica, da corrente de projeto máxima prevista para o circuito e do tempo que essa corrente circula pelo condutor. Isso pode ser expresso por:

$$E = R \cdot I^2_{max} \cdot \Delta t \qquad [1]$$

onde:

E = energia dissipada no condutor, [Wh];
R = resistência elétrica do condutor, [Ω];
I_{max} = corrente de projeto máxima prevista para o circuito, [A];
Δt = intervalo de tempo de circulação da corrente I_{max}, [h].

Lembrando que

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \qquad [2]$$

onde:

ρ = resistividade elétrica do material condutor [Ω m];
ℓ = comprimento do circuito [m];
S = seção transversal do condutor [mm^2].

Substituindo [2] em [1], tem-se:

$$E = \rho \frac{\ell}{S} I^2_{max} \cdot \Delta t \qquad [3]$$

É imediato de [3] que, quanto maior a resistividade (ρ), maior a perda de energia (E).

De acordo com a norma ABNT NBR 15920, as resistividades a 20°C do cobre e do alumínio são, respectivamente 18,35 . 10^{-9} e 30,3 . 10^{-9} Ω.m. Estes valores não são os valores reais destes materiais, mas valores de compromisso escolhidos para que as resistências dos condutores possam ser calculadas diretamente da seção nominal do condutor, em lugar de usar as áreas reais efetivas da seção transversal.

Considerando-se um condutor de cobre de seção S e um condutor de alumínio de seção 1,4S, ambos de mesmo comprimento e percorridos pela mesma corrente durante o mesmo tempo, tem-se:

$$E_{cu} = \rho_{cu} \frac{\ell}{S} I^2_{max} \cdot \Delta t = 18{,}35 \cdot 10^{-9} \frac{\ell}{S} I^2_{max} \cdot \Delta t \qquad [4]$$

$$E_{al} = \rho_{al} \frac{\ell}{1{,}4\ S} I^2_{max} \cdot \Delta t = 30{,}3 \cdot 10^{-9} \frac{\ell}{1{,}4\ S} I^2_{max} \cdot \Delta t =$$

$$E_{al} = 21{,}64 \cdot 10^{-9} \frac{\ell}{S} I^2_{max} \cdot \Delta t \qquad [5]$$

Comparando-se os valores de [4] e [5], conclui-se que, mesmo aumentando-se a seção do condutor elétrico de alumínio em 40%, as perdas de energia neste condutor ainda são 18% superiores às do condutor de cobre. Esse seria o caso, por exemplo, de um condutor de cobre de seção nominal 50 mm^2 e de alumínio 70 mm^2.

3.2 – Perda joule na presença de correntes harmônicas

As correntes harmônicas podem ser importantes fontes de perdas joule nas instalações elétricas, impactando assim os custos operacionais das instalações.

Deve-se calcular o valor da resistência elétrica em cada frequência (R_h) presente no espectro harmônico. Em seguida, calcula-se a perda joule para cada resistência a partir da equação $E(h) = R_h \cdot I_h^2 \cdot \Delta t$, onde I_h é a corrente harmônica de ordem *h*. Nos circuitos onde existe a presença do condutor neutro deve-se calcular também a perda nesse condutor, uma vez que o valor de corrente harmônica no neutro pode ser significativa.

R_h, que é o valor da resistência do cabo em uma dada frequência, difere do valor da resistência em corrente contínua normalmente apresentada nos catálogos fornecidos pelos fabricantes. Isso se deve principalmente ao fenômeno conhecido como *efeito pelicular*: a corrente alternada de maior frequência tende a circular predominantemente pela superfície exterior do condutor, causando assim uma diminuição na seção efetiva do condutor e, consequentemente, um aumento na resistência elétrica aparente do cabo.

O gráfico 1 mostra uma forma de obter o valor da resistência em corrente alternada em função da frequência a partir do valor da resistência em corrente contínua e a tabela 1 mostra valores de resistência em corrente contínua.

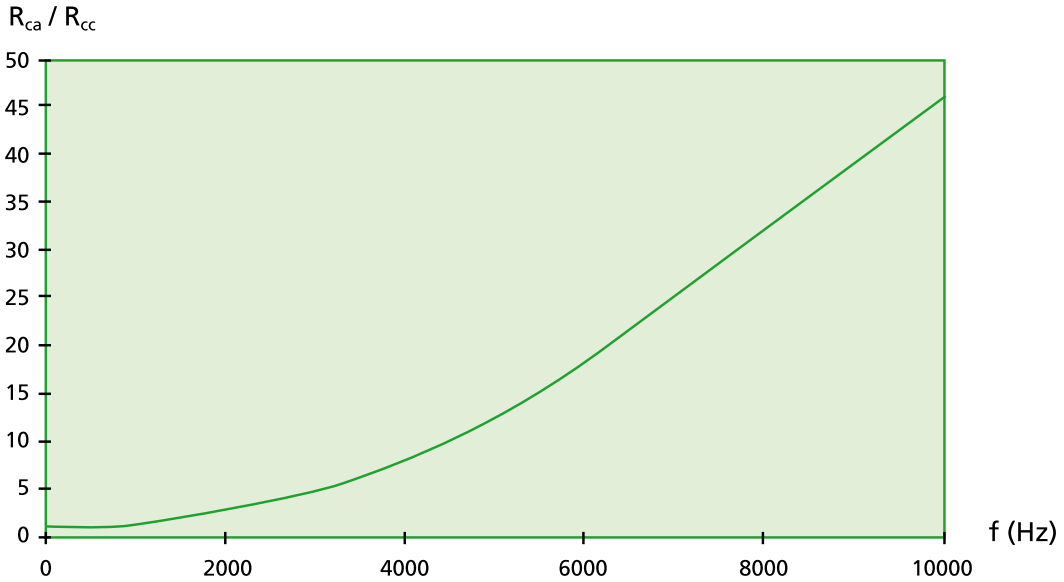


Gráfico 1: relação entre resistência em corrente alternada e resistência em corrente contínua em função da frequência

Tabela 1: resistência em corrente contínua conforme ABNT NBR NM 280 para condutores Classe 5 (condutores flexíveis para cabos uni e multipolares)

Seção nominal (mm^2)	Resistência máxima do condutor a 20°C formados com fios nus (Ω/km)
0,5	39,0
0,75	26,0
1	19,5
1,5	13,3
2,5	7,98
4	4,95
6	3,30
10	1,91
16	1,21
25	0,780
35	0,554
50	0,386
70	0,272
95	0,206
120	0,161
150	0,129
185	0,106
240	0,0801
300	0,0641
400	0,0486
500	0,0384
630	0,0287

4 - DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS CONFORME A NORMA ABNT NBR 15920

4.1 - Introdução

Para a determinação da seção econômica de um condutor para um dado circuito, seja ele em baixa ou média tensão, deve-se utilizar a norma ABNT NBR 15920.

De acordo com a NBR 15920:

- para combinar os custos de compra e instalação com os custos de perdas de energia que surgem durante a vida econômica de um cabo, é necessário expressá-los em valores econômicos comparáveis, que são os valores que se referem ao mesmo ponto no tempo. É conveniente usar a data de compra da instalação como este ponto e referi-lo como "presente". Os custos "futuros" das perdas de energia são então convertidos ao seu equivalente "valor presente". Isto é feito pelo processo de amortização, e a de taxa de amortização está ligada ao custo do dinheiro.

- nas prescrições da referida norma, a inflação foi omitida considerando que afetará tanto o custo do dinheiro como o custo da energia. Se estes itens forem considerados para o mesmo período de tempo e o efeito da inflação for aproximadamente o mesmo para ambos, a escolha de uma seção econômica pode ser feita satisfatoriamente sem introduzir a complicação adicional da inflação.

- para calcular o valor presente do custo das perdas é necessário escolher valores apropriados ao futuro desenvolvimento da carga, aumentos anuais do preço do kWh e uma taxa de desconto anual pela vida econômica do cabo que poderia ser de 25 anos ou mais.

- as fórmulas propostas na norma são diretas, mas em sua aplicação deve ser dada a devida consideração à hipótese de que os parâmetros financeiros assumidos permanecerão inalterados durante a vida econômica do cabo.

- na norma, há duas abordagens para o cálculo da seção econômica, baseadas nos mesmos conceitos financeiros. A primeira, na qual uma série de seções de condutores está sendo considerada, é calcular uma gama de correntes econômicas para cada uma das seções de condutor previstas para as condições de instalação específica e então selecionar aquela seção cuja faixa contém o valor requerido para a carga. Esta abordagem é apropriada quando várias instalações semelhantes estão sendo consideradas. A segunda abordagem, que pode ser mais satisfatória quando uma única instalação está envolvida, é calcular a área da seção transversal ótima para a carga exigida e então selecionar a seção nominal do condutor mais próxima.

Na continuação deste manual, abordaremos somente a segunda abordagem, por ser de aplicação mais direta na maioria das situações práticas.

4.2 – Equações para dimensionamento econômico de condutores de acordo com a segunda abordagem da ABNT NBR 15920

A **seção econômica (S_{ec})** de um condutor elétrico pode ser determinada pela expressão [6] que utiliza parâmetros calculados pelas expressões [7] a [10].

$$S_{ec} = 1000 \cdot \left[\frac{I^2_{max} \cdot F \cdot \rho_{20} \cdot B \cdot [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \quad [6]$$

$$F = N_P \cdot N_C \cdot (T \cdot P + D) \cdot \frac{Q}{(1 + i/100)} \quad [7]$$

$$B = (1 + y_P + y_s) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad [8]$$

$$Q = \sum_{n=1}^{N} (r^{n-1}) = \frac{1 - r^N}{1 - r} \quad [9]$$

$$r = \frac{(1 + a/100)^2 \cdot (1 + b/100)}{(1 + i/100)} \quad [10]$$

onde:

S_{ec} = seção econômica do condutor [mm^2]

I_{max} = corrente de projeto máxima prevista para o circuito no primeiro ano, [A];

F = quantidade auxiliar;

ρ_{20} = resistividade elétrica do material condutor a 20°C [Ω m];

B = quantidade auxiliar;

α_{20} = coeficiente de temperatura para a resistência do condutor a 20°C [K-1];

θ_m = temperatura média de operação do condutor [°C];

A = componente variável do custo por unidade de comprimento conforme seção do condutor [$/m.mm^2]

N_p = número de condutores de fase por circuito;

N_c = número de circuitos que levam o mesmo tipo e valor de carga;

T = tempo de operação com perda joule máxima [h/ano];

P = custo de um watt-hora no nível da tensão pertinente [$/W.h]

D = variação anual da demanda [$/W.ano];

Q = quantidade auxiliar;

i = taxa de capitalização para cálculo do valor presente [%];

y_p = fator de proximidade, conforme IEC 60287-1-1;

y_s = fator devido ao efeito pelicular, conforme IEC 60287-1-1;

λ_1 = fator de perda da cobertura, conforme IEC 60287-1-1;

λ_2 = fator de perda da armação, conforme IEC 60287-1-1;

r = quantidade auxiliar;

N = período coberto pelo cálculo financeiro, também referido como "vida econômica" [ano];

a = aumento anual da carga (I_{max}) [%];

b = aumento anual do custo da energia, sem incluir efeitos da inflação [%].

Observações:

1 - Como a seção econômica é o resultado que se espera obter da equação [7] e as grandezas y_p , y_s , λ_1 e λ_2 (que fazem parte do cálculo) dependem da seção do condutor, é necessário então fazer uma primeira suposição sobre a seção econômica provável do cabo para que valores razoáveis das grandezas mencionadas possam ser calculados. Pode ser necessário recalcular se a seção econômica for muito diferente. No entanto, para efeito da determinação da seção econômica, de um modo geral, essas grandezas podem ser desprezadas para cabos de baixa tensão (≤ 1 kV) e cabos de média tensão (≤ 36,2 kV).

2 - É pouco provável que Sec calculada pela expressão [6] seja exatamente igual a uma seção nominal padronizada (...16; 25; 35; 50...mm^2). Sendo assim, o custo deverá ser calculado para as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes e escolhida a mais econômica.

3 - As perdas dielétricas que ocorrem em certos tipos de cabos, particularmente de alta tensão (> 36,2 kV) podem ser significativas e devem ser consideradas quando se faz a seleção da seção econômica do condutor. As perdas no dielétrico são calculadas usando-se as fórmulas da IEC 60287-1-1. No entanto, para efeito da determinação da seção econômica, de um modo geral, essas grandezas podem ser desprezadas para cabos de baixa tensão (≤ 1 kV) e cabos de média tensão (≤ 36,2 kV).

4 - Na aplicação da equação [6] é preciso conhecer o valor de θ_m . A Norma ABNT NBR 60287-3-2 oferece uma fórmula simples para fazer uma estimativa da temperatura de operação baseada em observações de cálculos típicos onde a elevação da temperatura operacional média de um condutor de seção econômica, durante sua vida econômica, fica na região de um terço da elevação que ocorreria para sua máxima capacidade térmica nominal permissível. Esta aproximação pode resultar em erros na seção do condutor e nos custos totais que não são maiores do que, aproximadamente, 2%. Porém, podem acontecer erros maiores onde a combinação do custo de instalação, do custo de perdas e do crescimento da carga leva a temperatura do condutor, durante os anos finais do período econômico, ao máximo valor permissível. Em geral, um valor mais exato da resistência do condutor só afetará a seleção da seção econômica em casos marginais. Se, para casos particulares, for desejada maior precisão, pode-se utilizar o método de cálculo indicado no Anexo B da ABNT NBR 15920.

Assim, de forma geral, tem-se:

$$\theta_m = (\theta - \theta_a) / 3 + \theta_a \qquad [11]$$

onde:

θ = temperatura máxima nominal do condutor para o tipo de cabo considerado [°C];

θ_a = temperatura ambiente média [°C].

5 - Na aplicação da equação [6] é preciso conhecer o valor de *A*. Para tanto, deve-se considerar o custo total de instalação de um condutor, que inclui o custo do próprio cabo, das suas terminações, dos elementos de linha elétrica (eletroduto, eletrocalha, bandeja, etc.) e da mão de obra de montagem.

Considerando-se que os custos dos cabos variam conforme seu tipo (tipo de material condutor, tipo de isolação, tensão nominal, etc.), que os custos das linhas elétricas dependem da maneira de instalar escolhida e a mão de obra varia conforme o tipo de cabo e linha elétrica a serem instalados, é necessário que sejam preparadas tabelas de custos totais de instalação que considerem essas alternativas.

A tabela 2 é um exemplo que ilustra a explicação anterior e considera um cabo e uma linha elétrica fictícios.

Tabela 2: determinação de *A*

Seção nominal do cabo (mm²)	Custo Inicial (CI) [$/m]			A [$/m . mm²]
	Cabo	Instalação (linha elétrica + mão de obra)	Total	
25	6,90	11,20	18,10	–
35	7,57	11,26	18,84	(18,84 – 18,10) / (35 – 25) = 0,073
50	8,57	11,37	19,94	(19,94 – 18,84) / (50 – 35) = 0,074
70	9,91	11,51	21,42	(21,42 – 19,94) / (70 – 50) = 0,074
95	11,58	11,68	23,26	(23,26 – 21,42) / (95 – 70) = 0,074
120	13,24	11,86	25,10	(25,10 – 23,26) / (120 – 95) = 0,074
150	15,24	12,06	27,30	(27,30 – 25,10) / (150 – 120) = 0,073
185	17,58	12,30	29,87	(29,87 – 27,30) / (185 – 150) = 0,074
240	21,25	12,68	33,93	(33,93 – 29,87) / (240 – 185) = 0,074
300	25,25	13,09	38,34	(38,34 – 33,93) / (300 – 240) = 0,074
400	31,92	13,78	45,70	(45,70 – 38,34) / (400 – 300) = 0,074
Média				0,074

Para a utilização da equação [6] é mais prático a utilização do valor médio de *A* para todas as combinações de seções conforme a tabela 1. No caso deste exemplo, *A* = 0,074 $/m . mm².

5 - ASPECTOS ECONÔMICOS

Para combinar os custos iniciais de compra e instalação com os custos de perdas de energia que surgem durante a vida econômica de um condutor elétrico, é necessário expressá-los em valores econômicos comparáveis, que são os valores que se referem ao mesmo ponto no tempo.

É sabido que, quanto menor a seção nominal de um condutor elétrico, menor é o seu custo inicial de aquisição e instalação e maior é o seu custo operacional durante a sua vida útil.

Multiplicando-se o valor obtido em [1] pelo preço do Wh cobrado pela distribuidora de energia (ou calculado para a fonte de geração própria), obtém-se o custo da perda de energia (operacional) do condutor elétrico.

Deste modo, o custo total de instalar e operar um cabo durante sua vida econômica, expresso em valores presentes, é calculado conforme a seguinte equação:

$$\textbf{Custo total} = CT = CI + CJ \qquad [12]$$

onde:

CI é o custo inicial de um comprimento de cabo instalado, [$];

CJ é o custo operacional equivalente na data em que a instalação foi adquirida, ou seja, o valor presente, das perdas joule durante a vida considerada, [$].

O gráfico 1 apresenta as curvas típicas do custo operacional (CJ) e custo inicial de uma instalação (CI) em função da seção nominal dos condutores.

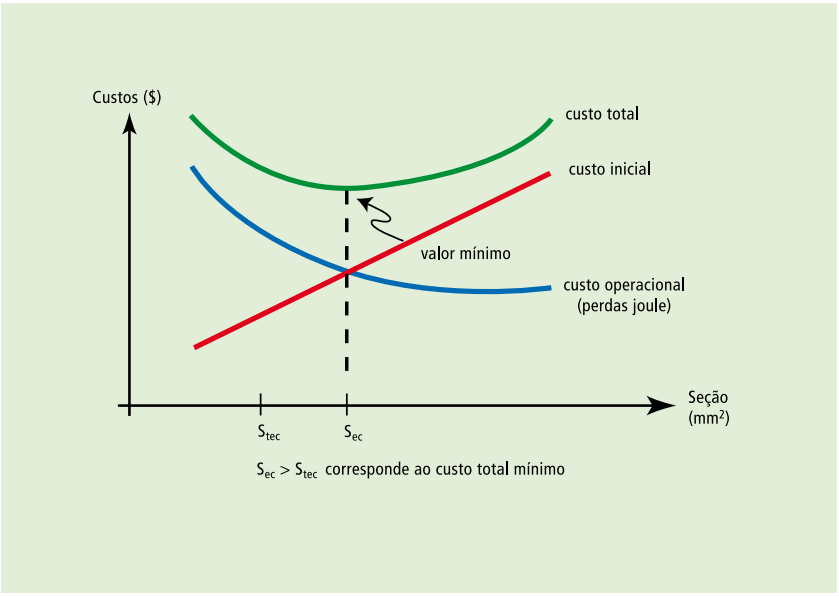


Gráfico 1: Custo inicial e custo operacional dos cabos em função da seção nominal.

No gráfico 1, somando-se ponto a ponto as duas curvas (custo inicial e custo operacional), tem-se , para cada seção nominal, o custo total daquele condutor ao longo de sua vida referido a um valor presente.

Conforme o gráfico 1, a curva relativa ao custo total apresenta um ponto de valor mínimo ($) para uma dada seção ($mm^2$).

Denomina-se como seção econômica (S_{ec}) de um circuito aquela seção que resulta no menor custo total de instalação e operação de um condutor elétrico durante sua vida econômica considerada.

De acordo com a ABNT NBR 15920, o custo total (CT) pode ser calculado por:

$$CT = CI + I^2_{max} \cdot R \cdot \ell \cdot F \qquad [\$] \qquad [13]$$

onde:

I_{max} = carga máxima no cabo durante o primeiro ano, [A];
ℓ = comprimento do cabo, [m];
F = calculado pela equação [7];

R = resistência c.a. aparente do condutor por unidade de comprimento, levando em conta os efeitos pelicular e de proximidade (y_p , y_s) e as perdas em blindagens metálicas e armações (λ_1 , λ_2) , [Ω/m].

O valor de R em função da seção padronizada S do condutor deve ser considerado na temperatura média de operação do condutor (θ_m) e calculado pela seguinte expressão:

$$R(S) = \frac{\rho_{20} \cdot B[1+\alpha_{20} \cdot (\theta_m - 20)]}{S} \cdot 10^6 \qquad [14]$$

6 - DIMENSIONAMENTO AMBIENTAL DE CONDUTORES ELÉTRICOS

6.1 Introdução

Ao longo do ciclo de vida dos fios e cabos elétricos, as mais significativas emissões de CO_2 (gás do efeito estufa) são produzidas quando os condutores transportam a energia elétrica, sendo relativamente pequenas na fase de fabricação e descarte desses produtos. Essas emissões de CO_2 são resultantes da geração extra de energia necessária para compensar as perdas joule na condução da corrente elétrica pelo circuito. Como visto nas seções anteriores, é possível reduzir a perda de energia (joule) e a consequente emissão de CO_2 através do aumento da seção do condutor pela aplicação do critério de dimensionamento econômico. Assim, é fácil concluir que haverá um ganho ambiental sempre que, num período considerado, as emissões de CO_2 evitadas durante a operação do cabo forem menores do que as emissões de CO_2 resultantes da sua fabricação. Os itens 6.2 e 6.3 a seguir apresentam os modos de calcular as emissões de CO_2 evitadas e realizadas.

6.2 Redução das emissões de CO_2 na geração de energia pelo aumento da seção

Quando os condutores dimensionados pelo critério técnico (de menor seção) são substituídos por condutores dimensionados pelo critério econômico (de maior seção), a quantidade total de redução de emissões de CO_2 no período considerado (N) é dada pela seguinte fórmula:

$$Z_1 = N\,[N_p \cdot N_c \cdot I^2 \cdot (R_1 - R_2) \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \ell \cdot K_1] \qquad [15]$$

onde:

Z_1 = quantidade anual de redução de emissões de CO_2, [kg-CO_2];
N_p = número de condutores de fase por circuito;
N_c = número de circuitos que levam o mesmo tipo e valor de carga;
I = corrente de projeto, [A];
ℓ = comprimento do cabo, [km];
R_1 = resistência do condutor por unidade de comprimento dimensionado pelo critério técnico (menor seção), [Ω/km] – calculada conforme equação [14];
R_2 = resistência do condutor por unidade de comprimento dimensionado pelo critério econômico (maior seção), [Ω/km] – calculada conforme equação [14];
T = tempo de operação por ano [h/ano];

K_1 = emissões de CO_2 no momento da geração por unidade de energia elétrica, [kg-CO_2/kWh]. Este valor varia conforme a característica da matriz energética de cada país, sendo maior nos casos onde fontes primárias de energia são mais poluentes (combustíveis fósseis) e menor onde as fontes primárias são mais limpas e renováveis (hidráulica, solar, eólica, etc.). No caso do Brasil, dados de 2006 indicam um valor de K1 = 0,081 kg-CO_2/kWh.

6.3 Aumento das emissões de CO_2 na fabricação de condutores pelo aumento da seção

O aumento da seção dos condutores quando dimensionados pelo critério econômico tem como consequência direta o aumento nas emissões de CO_2 no processo completo de fabricação dos cabos elétricos, desde a fase de extração do metal condutor na mina até o descarte do produto após sua utilização (ciclo de vida do produto). Isso se deve ao fato de que seções maiores utilizam mais materiais e, consequentemente, mais energia é consumida na fabricação e demais etapas da vida do produto.

O principal aumento nas emissões de CO_2 devido ao aumento da seção ocorre na produção do cobre, desde a mina até a fabricação do elemento condutor do cabo. O aumento anual das emissões de CO_2 neste caso é dado pela seguinte expressão:

$$Z_2 = N_p \cdot N_c \left[(W_2 - W_1) \cdot \ell \cdot K_2\right] \qquad [16]$$

onde:

Z_2 = quantidade anual de aumento de emissões de CO_2, [kg-CO_2];

W_1 = peso do condutor por unidade de comprimento dimensionado pelo critério técnico (menor seção), [kg/km] – tabela 3;

W_2 = peso do condutor por unidade de comprimento dimensionado pelo critério econômico (maior seção), [kg/km] – tabela 3;

ℓ = comprimento do cabo, [km];

K_2 = emissões de CO_2 no momento da produção do cobre por quilo de cobre, [kg-CO_2/kg-Cu]. Este valor varia conforme a característica da matriz energética de cada país e do processo de extração e fabricação do metal, sendo maior nos casos onde fontes primárias de energia são mais poluentes (combustíveis fósseis) e menor onde as fontes primárias são mais limpas e renováveis (hidráulica, solar, eólica, etc.). No caso do Brasil, onde a maioria do cobre utilizado nos condutores elétricos é importada do Chile, recomenda-se utilizar K_2 = 4,09 kg-CO_2/kg-Cu que é aquele correspondente à produção do catodo de cobre eletrolítico realizada naquele país.

Tabela 3 – peso de cabos de cobre (classe de encordoamento 2 – NBR NM 280)

Seção nominal (mm^2)	Peso total aproximado (kg/km)
1,5	13,5
2,5	22,4
4	35,9
6	53,9
10	90,1
16	145
25	224
35	314
50	450
70	633
95	853
120	1.080
150	1.350
185	1.660
240	2.170
300	2.720
400	3.590
500	4.480

6.4 Conclusão

O resultado do dimensionamento ambiental de condutores elétricos pode ser determinado por $\mathbf{Z_1 - Z_2}$. Na condição de $Z_1 - Z_2 > 0$, as reduções nas emissões de CO_2 obtidas pelo uso de cabos de maiores seções durante a vida econômica considerada compensaram os aumentos nas emissões de CO_2 devidas ao processo de fabricação dos cabos com maiores seções. Em outras palavras, $\mathbf{Z_1 - Z_2}$ representa o ganho ambiental obtido pela redução das emissões de CO_2 devido ao dimensionamento econômico dos condutores.

7 - EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DE CONDUTORES ELÉTRICOS

Enunciado

Considera-se um circuito em 220/380 V, 60 Hz, trifásico, constituído por um cabo tripolar com condutor de cobre (classe de encordoamento 2), isolação em EPR (temperatura máxima de operação = 90°C) e cobertura em PVC, instalado em eletroduto não magnético (isolante) aparente. Não há outros circuitos no mesmo eletroduto.

O circuito tem 100 metros de comprimento, a temperatura ambiente média é 40°C e a corrente de projeto máxima no primeiro ano é 150 A (incluindo as componentes harmônicas - THD_3 = 38%), com taxa de crescimento de 1% ao ano. O fator de potência médio do circuito é 0,80 e a queda de tensão máxima admitida é 2%.

Estima-se que o circuito permaneça em plena operação durante 4.000 horas por ano. O custo considerado de um watt-hora no nível da tensão pertinente é 0,10 $/kWh no primeiro ano, com aumento anual de 3% (sem considerar o efeito da inflação). Não será considerado o custo da demanda. Será adotado o valor médio de A = 0,074 $/m. mm^2, conforme tabela 2.

A análise será feita para um período de 20 anos (vida econômica), considerando-se uma taxa de capitalização para cálculo do valor presente de 6% ao ano.

a) Determinação da quantidade auxiliar *r*

De acordo com o enunciado, tem-se:
a = 1% (aumento anual de carga);
b = 3% (aumento anual do custo da energia);
i = 6% (taxa de capitalização).

Aplicando-se a equação [10], resulta r = 0,991.

b) Determinação da quantidade auxiliar *Q*

De acordo com o enunciado, tem-se N = 20 anos (vida econômica).
O valor de r foi obtido em a) e vale 0,991.

Aplicando-se a equação [9], resulta Q = 18,379.

c) Determinação da quantidade auxiliar *B*

Como o exemplo refere-se a um cabo de baixa tensão, os efeitos de proximidade e pelicular, assim como as perdas na cobertura e armação serão desprezados. Desta forma, o valor da quantidade auxiliar B (equação [8] é igual a 1,0.

d) Determinação da quantidade auxiliar *F*

De acordo com o enunciado, tem-se:

N_p = 3 (número de condutores de fase por circuito);
N_c = 1 (número de circuitos que levam o mesmo tipo e valor de carga);
T = 4.000 h/ano (tempo de operação com perda joule máxima);
P = 0,10 \$/kWh = 0,0001 \$/Wh (custo de um watt-hora no nível da tensão pertinente);
D = 0 (variação anual da demanda).

Aplicando-se a equação [7], resulta F = 20,806.

e) Primeiro cálculo da seção econômica S_{ec}

De acordo com o enunciado:

I_{max} = 150 A (corrente de projeto máxima prevista para o circuito no primeiro ano);
A = 0,074 \$/m. mm^2.

De acordo com *d*), F = 20,806.

De acordo com a ABNT NBR 15920:

ρ_{20} = 18,35 x 10^{-9} Ω m (resistividade elétrica do cobre a 20°C);
α_{20} = 0,0068 K-1 (coeficiente de temperatura para a resistência do cobre a 20°C).

De acordo com c), B = 1,0.

De acordo com o enunciado:

θ = 90°C (temperatura máxima nominal do condutor para o cabo EPR considerado);
θ_a = 40°C (temperatura ambiente média).

Aplicando-se a equação [11]:

$\theta_m = (\theta - \theta_a) / 3 + \theta_a = (90 - 40) / 3 + 40 = 57$°C

Finalmente, utilizando-se a equação [6], resulta $\boldsymbol{S_{ec}}$ **= 381 mm^2**, que não é uma seção de condutor padronizada. Assim, como indicado anteriormente, nesta situação o custo total deverá ser calculado para as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes (300 mm^2 e 400 mm^2) e escolhida a seção mais econômica dentre as duas.

f) Custo total das seções econômicas obtidas no primeiro cálculo

Para escolher a seção econômica dentre as duas seções nominais padronizadas resultantes do cálculo realizado em e), devem ser utilizadas as equações (13) e (14).

Aplicando-se a equação [14] com os parâmetros ρ_{20}, B, α_{20} e θ_m já mencionados anteriormente, obtêm-se os seguintes resultados:

- Para o cabo 300 mm² → $R(300) = 76{,}56 \cdot 10^{-6}$ Ω/m;
- Para o cabo 400 mm² → $R(400) = 57{,}42 \cdot 10^{-6}$ Ω/m.

Aplicando-se a equação [13] com os parâmetros CI (multiplicar valores da tabela 1 pelo comprimento ℓ), I_{max}, (150 A) e F (calculado) e com ℓ = 100 m (enunciado), obtêm-se os seguintes resultados:

- Para o cabo 300 mm² → $CT(300) = CI + CJ$ = 3.834,00 + 3.584,04 = $ 7.418,04;
- Para o cabo 400 mm² → **$CT(400) = CI + CJ$** = 4.570,00 + 2.688,03 = **$ 7.258,03.**

Portanto, o condutor de 400 mm² é a seção econômica (S_{ec}) escolhida.

g) Dimensionamento técnico do circuito conforme a Norma ABNT NBR 5410:2004

No dimensionamento técnico a seguir são aplicados todos os fatores de correção previstos na NBR 5410 (temperatura, agrupamento). Calcula-se também a queda de tensão. Para simplificar, não são considerados os cálculos relativos à proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, que, exceto em alguns casos específicos, não alteram a seção do condutor calculada por capacidade de corrente ou queda de tensão.

g1) Critério de capacidade de condução de corrente

Condutor de fase

- Fator de correção de temperatura (f_1) – tabela 40 – 40ºC ambiente / isolação EPR → f_1 = 0,91 (página 106 - NBR 5410:2004) -
- Fator de correção de agrupamento (f_2) – tabela 42 – eletroduto = conduto fechado / Ref. 1 /1 circuito → f_2 = 1,0 (página 108 - NBR 5410:2004)
- Corrente fictícia de projeto = $I'_{max} = I_{max} / f_1 \ \ f_2 = 150 / 0{,}91 \cdot 1{,}0 = 165$ A.
- Tabela 33 – eletroduto aparente / método de instalação # 4 → método de referência B2 (página 93 - NBR 5410:2004).
- Tabela 37 – Cabo unipolar, Cu/EPR / método de referência B1 / 3 condutores carregados / coluna 7 / I'_B = 165 A → # 70 mm² (I'_z = 222 A) (página 102 - NBR 5410:2004).
- Portanto: seção dos condutores de fase (S_F) = 70 mm².

Condutor de proteção

Conforme tabela 58 (página 150 - NBR 5410:2004), para $S_F = 70\ mm^2 \rightarrow S_{PE} = 35\ mm^2$

Conclusão do dimensionamento pelo critério de capacidade de corrente

$S_{tec1} = 3 \times 70\ mm^2 + 1 \times 35\ mm^2$ (PE)

g2) Critério da queda de tensão

A queda de tensão (ΔU) é dada por:

$\Delta U = (V/A.km) \cdot I_B \cdot \ell$, onde (V/A.km) é um valor obtido no catálogo do fabricante de cabos (e corresponde aproximadamente à impedância do cabo); I_B é a corrente de projeto (em A), incluindo as harmônicas; e ℓ é o comprimento do circuito (em km).

Na expressão acima, o valor de (V/A.km), que passaremos a chamar de Z_c, é único para uma determinada seção de cabo (tabela 4). Isso significa que, para determinar a seção do cabo pelo critério de queda de tensão, basta calcular o valor de Z_c, entrar com ele na tabela de cabos e encontrar a seção nominal do condutor correspondente.

Tabela 4 – queda de tensão nos condutores instalados em eletroduto aparente não magnético, FP = 0,80 (V/A.km)

Seção nominal (mm^2)	Z_c
1,5	20,4
2,5	12,7
4	7,9
6	5,3
10	3,2
16	2,05
25	1,34
35	0,99
50	0,76
70	0,56
95	0,43
120	0,36
150	0,32
185	0,27
240	0,23
300	0,21
400	0,19
500	0,17
630	0,16
800	0,15
1.000	0,14

Assim, da expressão anterior, temos que: $Z_c = \Delta U / I_B \cdot \ell$.

Condutor de fase

ΔU = 2% ⟶ 2% de 380 V = 7,6 V;
I_{max} = 150 A;
ℓ = 100 m = 0,1 km.

Daí: $Z_c = DU / I_B \cdot \ell = 7,6 / 150 \cdot 0,1 = 0,51$ V/A.km

Conforme a tabela 4, tem-se:

Eletroduto de material não magnético / circuito trifásico / FP = 0,8 / Z_c = 0,51 V/A.km ⟶ escolhemos 0,43 V/A.km por ser o valor imediatamente inferior a Z_c ⟶ condutor 95 mm².

Portanto: seção dos condutores de fase (S_F) = 95 mm².

Condutor de proteção

Conforme tabela 58 (página 150 - NBR 5410:2004),
para S_F = 95 mm² ⟶ S_{PEB} = 50 mm²

Conclusão do dimensionamento pelo critério de queda de tensão

S_{tec2} = 3 x 95 mm² + 1 x 50 mm² (PE)

g.3) Escolha da Seção Técnica S_{tec}

A seção técnica escolhida é a maior dentre as obtidas pelos critérios de capacidade de condução de corrente e queda de tensão.

Portanto, o condutor de 95 mm² é a seção técnica (S_{tec}) escolhida.

Desta forma, o resultado do dimensionamento técnico, considerando a capacidade de corrente, harmônicas e queda de tensão, é ***S_{tec} = 3 x 95 mm² + 1 x 50 mm² (PE).***

h) Custo total da seção técnica

Considerando-se a seção técnica de 95 mm² e, aplicando-se a equação [14] com os parâmetros ρ_{20}, B, α_{20} e θ_m já mencionados anteriormente, obtêm-se: $R(95) = 241{,}76 \cdot 10^{-6}$ Ω/m;

Aplicando-se a equação [13] com os parâmetros *CI* (multiplicar valores da tabela 1 pelo comprimento ℓ), I_{max}, (150 A) e F (calculado) e com ℓ = 100 m (enunciado), obtêm-se:

CT(95) = CI + CJ = 2.326,00 + 11.317,63 = $ 13.643,63.

i) Comparação econômica entre as seções obtidas pelos critérios de dimensionamento econômico e dimensionamento técnico

A tabela 5 resume os cálculos realizados.

Tabela 5: Resumo dos cálculos técnico e econômico

Critério	Seção nominal (mm²)	*CI*		*CJ* [em 20 anos]		*CT* [em 20 anos]	
		($)	% (ec/tec)	($)	% (ec/tec)	($)	% (ec/tec)
Econômico	400	4.570,00	196	2.688,03	24	7.258,03	53
Técnico	95	2.326,00	100	11.317,63	100	13.643,63	100

Da tabela 5, conclui-se que, apesar do cabo dimensionado pelo critério econômico (400 mm²) ter um custo inicial (*CI*) quase o dobro (1,96 x) do cabo calculado pelo critério técnico (95 mm²), o cabo 400 mm² apresenta um custo devido às perdas joule (*CJ*) ao longo da vida econômica considerada no exemplo (20 anos) de apenas 24% daquela apresentada pelo cabo 95 mm². Em relação ao custo total (*CT*), o cabo dimensionado pelo critério econômico tem um custo de praticamente metade (53%) do cabo dimensionado pelo critério técnico.

Em relação ao período de retorno dos investimentos, da tabela 5, tem-se:

- diferença entre os custos iniciais pelos critérios técnico e econômico
  = $ 4.570,00 - $ 2.326,00 = $ 2.244,00;

- diferença entre os custos de perda joule dos dois critérios (em valor presente)
  = $ 11.317,63 - $ 2.688,03 = $ 8.629,60 em 20 anos.
  Isso representa $ 431,48 por ano.

- período de retorno do investimento = $ 2.244,00 / $ 431,48 = **5,2 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 5,2 anos (muito inferior ao período considerado de 20 anos). Além disso, como a vida útil estimada de uma instalação elétrica usual 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.

O exemplo mostra que considerar a seção econômica de um condutor elétrico é uma abordagem bastante vantajosa em geral e, particularmente, nos seguintes casos:

- em circuitos com seções nominais ≥ 25 mm^2 obtidas pelo dimensionamento técnico;

- em circuitos que funcionam muitas horas por ano, com correntes que não apresentam grandes variações;

- em circuitos onde o critério de dimensionamento técnico que prevaleceu foi o de capacidade de condução de corrente. Neste caso, obteve-se a menor seção nominal possível e, em consequência, a maior resistência elétrica e perda de energia.

Uma vantagem adicional do dimensionamento de um condutor pelo critério econômico é que haverá um aumento de sua vida útil devido ao 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.

j) Dimensionamento ambiental

Considerando-se o cabo dimensionado pelo critério econômico (400 mm²) e o cabo dimensionado pelo critério técnico (95 mm²), tem-se o seguinte dimensionamento ambiental.

Conforme o enunciado, $N_p = 3$; $N_c = 1$; I = 150 A; T = 4.000 h/ano; $\ell = 100$ m = 0,1 km.
De acordo com a Tabela 3, $W_1 = 853$ kg/km e $W_2 = 3.590$ kg/km.
Conforme calculado, $R_1 = 241{,}76 \cdot 10^{-3}$ Ω/km e $R_2 = 57{,}42 \cdot 10^{-3}$ Ω/km.
Conforme indicado, $K_1 = 0{,}081$ kg-CO_2/kWh e $K_2 = 4{,}09$ kg-CO_2/kg-Cu.

Aplicando-se as equações [15] e [16] para os condutores de fase:

$$Z_1 = N\,[N_p \cdot N_c \cdot I^2 \cdot (R_1 - R_2) \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \ell \cdot K_1]$$

$$Z_2 = N_p \cdot N_c\,[(W_2 - W_1) \cdot \ell \cdot K_2]$$

Obtém-se:

$Z_1 = 8.064{,}0$ kg-CO_2 (quantidade de redução de emissões de CO_2 no período considerado da vida econômica de 20 anos;
$Z_2 = 3.358{,}3$ kg-CO_2 (quantidade de aumento de emissões de CO_2).

Portanto, $Z_1 - Z_2 = 8.064{,}0 - 3.358{,}3 =$ **4.705,7 kg-CO_2.**

Isso significa que as reduções nas emissões de CO_2 obtidas pelo uso dos cabos calculados pelo critério de dimensionamento econômico (400 mm²) durante a vida econômica considerada compensaram os aumentos nas emissões de CO_2 devidas ao processo de fabricação desses cabos com maiores seções. De acordo com o cálculo, foram evitadas as emissões de 4.705,7 kg de CO_2 na atmosfera, em um período de 20 anos, por conta do uso do cabo de seção 400 mm² (obtida pelo dimensionamento econômico). Isso, sem dúvida, representa uma grande contribuição para a preservação e sustentabilidade ambientais.

Dessa forma, o dimensionamento econômico e ambiental do condutor do exemplo em questão resulta na seção nominal de 400 mm². Esse dimensionamento também atende a todos os critérios de dimensionamento técnico conforme a ABNT NBR 5410, particularmente nos requisitos de capacidade de condução de corrente, queda de tensão e presença de harmônicas. A especificação final do circuito em questão considerando o dimensionamento econômico e ambiental é a seguinte:

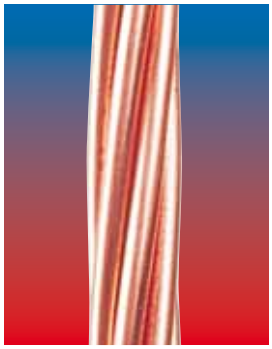
3 x 400 mm² + 1 x 240 mm² (PE)

Por que o cobre é amplamente utilizado em sistemas elétricos?

A principal razão para a utilização do cobre em sistemas elétricos é sua excelente condutividade elétrica. O cobre apresenta a resistência elétrica mais baixa entre todos os metais não-preciosos.

Existem outros materiais que podem ser utilizados como condutores elétricos, uma vez que quase todos conduzem eletricidade em determinado grau. Mas, para se tornar um candidato sério a ser utilizado como condutor elétrico, um material deve combinar condutividade muito alta com algumas outras poucas, porém importantes, características mecânicas.

Os denominados supercondutores são materiais especiais que têm, em determinadas circunstâncias específicas, resistividade elétrica quase nula. Alguns dos materiais supercondutores comercialmente disponíveis atualmente são ligas de cobre. Os supercondutores devem ser operados a temperaturas muito baixas (cerca de –200°C para alguns materiais) e isto é dificilmente viável em um grande sistema elétrico. Além dos supercondutores, quatro metais ressaltam por sua condutividade elevada: a prata, o ouro, o cobre e o alumínio. Como a prata e o ouro são muito caros, o cobre e o alumínio são os principais candidatos. Outros metais têm menor resistividade, sendo, portanto, menos apropriados para o uso comercial.



A resistividade do alumínio é 65% mais alta que a do cobre e, por consequência, para conduzir a mesma corrente elétrica, um cabo com condutor de cobre utiliza uma seção nominal menor do que a de um cabo de alumínio. Assim, os projetos de sistemas e equipamentos elétricos que utilizam o cobre resultam em soluções mais compactas, reduzindo assim os custos da instalação.

Outra vantagem do cobre é sua alta resistência à corrosão, o que faz com que, em várias aplicações subterrâneas e em linhas aéreas em regiões costeiras ou de alta poluição, sejam utilizados condutores em cobre.

Uma razão pela preferência do cobre nas instalações em geral e nas edificações em particular é a facilidade e confiabilidade da execução de emendas e terminações com condutores de cobre. Elas não requerem materiais, técnicas e ferramentas especiais para a obtenção de resultados satisfatórios.

Há ainda características importantes que tornam o cobre um metal amplamente utilizado na eletricidade são sua resistência mecânica e durabilidade, propriedades ideais em aplicações complexas tais como pontes rolantes, cabos móveis para mineração e transporte, dentre outras.

8 - REFERÊNCIAS

- *ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão; ABNT, 2004.*

- *NBR 15920: Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência; ABNT, 2010.*

- *Instalações Elétricas, Ademaro Cotrim, 5ª edição; Editora Makron Books, 2009.*

- *Estimation of CO_2 Emissions Reduction Resulting From Conductor Size Increase for Electric Wires and Cables, Kazuhiko Masuo, Nobukazu Kume, Takehisa Hara; IEEE Japan, 2007.*

- *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero de la minería del cobre de Chile; Comisión Chilena del Cobre, 2008.*

- *International Energy Agency Data Services, 2006.*

—- xxx —-

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DE CONDUTORES ELÉTRICOS

Um Caminho para Economizar Energia
e Preservar o Meio Ambiente

Autor: HILTON MORENO

Engenheiro eletricista, consultor, professor universitário, membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT.

Todos os direitos reservados ao PROCOBRE Brasil 2010

Tabela 33 da NBR 5410 – Tipos de linhas elétricas

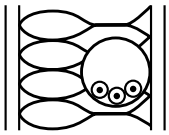
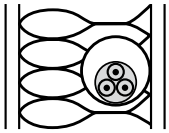
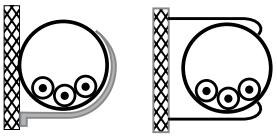
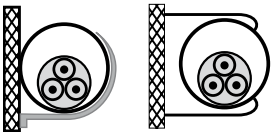
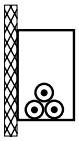
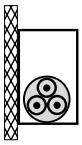
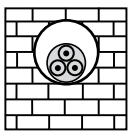
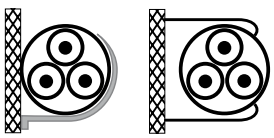
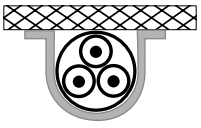
Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência[1)]
1		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante[2]).	A1
2		Cabos multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante[2]).	A2
3		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto.	B1
4		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B2
5		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção não-circular sobre parede.	B1
6		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção não-circular sobre parede.	B2
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria.	B1
8		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria.	B2
11		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do cabo.	C
11A		Cabos unipolares ou cabo multipolar fixado diretamente no teto.	C

Tabela 37 da NBR 5410 – Capacidade de condução de corrente, em ampères, para os método de referência A1, A2, B1, B2, C e D
Condutore: cobre e alumínio
Isolação: EPR ou XLPE
Temperatura no condutor: 90°C
Temperaturas de referência do ambiente: 30°C (ar), 20°C (solo)

Seções nominais mm²	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	527
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1.122	923	711	596
800	885	792	805	721	1.158	1.020	952	837	1.311	1.074	811	679
1.000	1.014	908	923	826	1.332	1.173	1.088	957	1.515	1.237	916	767

Tabela 40 da NBR 5410 – Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	-	0,65
70	-	0,58
75	-	0,50
80	-	0,41
Do solo		
10	0,10	1,07
15	1,05	1,04
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	-	0,60
70	-	0,53
75	-	0,46
80	-	0,38

Tabela 42 da NBR 5410 – Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9a 11	12a 15	16a 19	≥20	
1	Em feixe ao ar livre ou sobre superfície, embutidos, em coduto fechado.	1,00	0,80	0,70	0,65	0,80	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira.	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (métodos C)
3	Camada única no teto.	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada.	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Notas

1 - Esses fatores são aplicáveis a grupos homogêneos de cabos, uniformemente carregados.

2 - Quando a distância horizontal entre cabos adjacentes for superior ao dobro de seu diâmetro externo, não é necessário aplicar nenhum fator de redução.

3 - O número de circuitos ou de cabos com o qual se consulta a tabela refere-se
- à quantidade de grupos de dois ou três condutores isolados ou cabos unipolares, cada grupo constituindo um circuito (supondo-se um só condutor por fase, isto é, sem condutores em paralelo), e/ou
- à quantidade de cabos multipolares que compõe o agrupamento, qualquer que seja essa composição (só condutores isolados, só cabos unipolares, só cabos multipolares ou qualquer combinação).

4 - Se o agrupamento for constituído, ao mesmo tempo, de cabos bipolares e tripolares, deve-se considerar o número total de cabos como sendo o número de circuitos e, de posse do fatora de agrupamento resultante, a determinação das capacidades de condução de corrente, nas tabelas 36 a 39, deve ser então efetuada:
- na coluna de dois condutores carregados, para os cabos bipolares; e
- na coluna de três condutores carregados, para os cabos tripolares.

5 - Um agrupamentto com N condutores isolados, ou N cabos unipolares, pode ser considerado composto tanto de N/2 circuitos com dois condutores carregados quanto de N/3 circuitos com três condutores carregados.

6 - Os valores indicados são médios para a faixa usual de seções nominais, com dispersão geralmente inferior a 5%.

COBRE

4758 - VICTORY 01/2016

Realização:

COPPER
International Copper Association, Ltd.
ICA, Latinoamérica

PROCOBRE
Connects Life.™
www.procobre.org

Apoio:

PRYSMIAN
CABLES & SYSTEMS