

**Diminuição da Vida Útil, Aumento da Temperatura de Operação  
e Derating dos Cabos Elétricos Monofilares em BT**

**Alexsandro Alves Martins – ENERSUL e Marcelo Lince Ribeiro Chaves – UFU**

E-mail: [prot@enersul.com.br](mailto:prot@enersul.com.br)

**Palavras-chave** - Correntes harmônicas, Cabos monofilares, Vida útil, Aumento de temperatura.

**Resumo** - O presente artigo tem por objetivo mostrar o comportamento dos cabos monofilares de baixa tensão quando por estes, circulam correntes harmônicas. Foram simulados cabos monofilares de 1,5 a 240 mm<sup>2</sup> de seção transversal com arranjo trifilar, utilizado o programa Matlab.

É mostrado no artigo o desempenho dos cabos, ponto de vista da presença de correntes harmônicas, quando este é utilizado para alimentar sete tipos de cargas com conteúdo harmônico diferentes.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a distribuição de energia elétrica nos grandes centros urbanos através de redes subterrâneas está se tornando, cada vez mais, atraente e usual. De fato, a rede subterrânea proporciona, entre outros benefícios, maior segurança pública além de minimizar possíveis ocorrências de falhas devido às condições ambientais e atender algumas imposições inerentes aos grandes centros. Adicionalmente, as mudanças nos estilos de vida da população, o crescimento urbano e os avanços tecnológicos causam a proliferação de equipamentos eletrônicos nas residências e locais de trabalho que, em sua grande maioria, são geradores de correntes harmônicas.

A dependência dos parâmetros elétricos (resistência e indutância) de um condutor com a frequência podem ser determinada utilizando equações derivadas das funções de Bessel. A precisão dos resultados é muito bem aceita tanto para linhas aéreas como para cabos subterrâneos. Tais equações mostram que a resistência cresce conforme a frequência aumenta e, esta variação torna-se mais significativa em conformidade com o diâmetro do condutor. Por conseguinte, quando existem correntes harmônicas circulando em um condutor, tem-se um acréscimo de perdas ocasionando uma elevação de temperatura de operação. Esse aumento de temperatura poderá comprometer a isolamento do cabo, reduzindo a sua vida útil. Nos casos em que é conhecido o real teor destas correntes harmônicas, faz-se necessário reduzir a capacidade de condução de corrente do cabo (ampacidade) para que as perdas não ultrapassem o valor nominal.

O principal objetivo deste artigo é mostrar o comportamento de cabos conduzindo correntes com

elevado conteúdo harmônico, particularizando para as redes de média e baixa tensão onde os cabos são geralmente de maior seção transversal. São analisados cabos de várias seções, abrangendo até 240 mm<sup>2</sup>, com diferentes tipos de arranjos. Da análise feita, é extraídos alguns parâmetros que definirão o fator de limitação de ampacidade (“derating factor”), redução da expectativa de vida útil e a elevação adicional da temperatura. Todo estudo é elaborado considerando os cabos suprindo cargas típicas com conteúdos harmônicos conhecidos.

Os resultados deste estudo são apresentados na forma de gráficos que relacionam a redução da ampacidade, expectativa de vida útil e elevação de temperatura com a seção transversal do cabo.

As perdas nos cabos elétricos são devido a basicamente o efeito skin, efeito proximidade de condutores e, para os cabos enterrados o efeito proximidade de condútes.

## 2. O EFEITO SKIN

O efeito skin é caracterizado por uma não uniformidade da distribuição de corrente devido ao fluxo magnético interno. Desde que nem todo o fluxo magnético dos filamentos de corrente próximos ao centro de um condutor homogêneo corta todo o condutor, a indutância por unidade de área diminui em direção à superfície. Assim, a corrente por unidade de área aumentará em direção à superfície.

Das referências [6] e [7], retiram-se as seguintes equações aproximadas para o fator de efeito skin.

$$m = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot f / \rho_{el}} \quad (1)$$

Onde,

$\rho_{el}$  – resistividade elétrica na temperatura de operação;

$\mu_r$  – permeabilidade relativa do condutor ( $\mu_r = 1$  para condutores de cobre e alumínio);

$\mu_0$  – permeabilidade do meio ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ); e

$f$  – frequência.

Considerando um condutor circular com diâmetro  $d_c$ , utilizar-se-á a seguinte equação:

$$x^2 = \left( \frac{m \cdot d_c}{2} \right)^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R} \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

Para levar em conta o encordoamento e tratamento dos condutores, um fator  $k_s \leq 1$  é introduzido na equação (2), resultando em:

$$x_s^2 = x^2 \cdot k_s = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R} \cdot 10^{-7} \cdot k_s \quad (3)$$

Os valores de  $k_s$  são encontrados na tabela 1. E o fator do efeito skin é obtido como se segue:

Para  $0 < x_s \leq 2,8$ :

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4} \quad (4)$$

Para  $2,8 < x_s \leq 3,8$ :

$$y_s = -0,136 - 0,0177 \cdot x_s + 0,0563 \cdot x_s^2 \quad (5)$$

Para  $x_s > 3,8$ :

$$y_s = \frac{x_s}{2\sqrt{2}} - \frac{11}{15} \quad (6)$$

Na ausência de fórmulas alternativas, o IEC recomenda que a mesma expressão poderia ser usada para condutores setoriais e ovais. Desde que para a maioria dos casos  $x_s \leq 2,8$ , a equação (4) pode ser usada para condutores encordoados.

Para condutores anulares, com diâmetros interno e externo  $d_i$  e  $d_c$ , respectivamente, a norma do IEC (IEC 287, 1982) traz o seguinte valor aproximado da constante  $k_s$ , a ser usada em conjunto com a equação (3):

$$k_s = \frac{d_c - d_i}{d_c + d_i} \cdot \left( \frac{d_c + 2 \cdot d_i}{d_c + d_i} \right)^2 \quad (7)$$

Onde;

$d_c$  - diâmetro de um condutor sólido equivalente com o mesmo canal central.

A solução rigorosa do problema do efeito skin envolve equações de Bessel na determinação da distribuição da corrente. A fim de evitar cálculos pesados das funções de Bessel é proposto a seguinte aproximação bastante precisa:

$$\beta = 1 - \frac{d_i}{d_c} \quad e$$

$$z = 0,25 \cdot m^2 \cdot k_s \cdot (d_c - d_i)^2 \quad (8)$$

Tabela 1 – Valores experimentais dos coeficientes  $k_s$  e  $k_p$  para condutores de cobre e alumínio.

| Tipo de condutor          | Construção     |       |            |       |
|---------------------------|----------------|-------|------------|-------|
|                           | Não impregnada |       | Impregnada |       |
|                           | $k_s$          | $k_p$ | $k_s$      | $k_p$ |
| <b>Cobre</b>              |                |       |            |       |
| Redondo encordoado normal | 1              | 1     | 1          | 0,8   |
| Redondo compactado        | 1              | 1     | 1          | 0,8   |
| Redondo segmentado        | -              | -     | 0,435      | 0,37  |
| Anular                    | -              | -     | -          | 0,8   |
| Setorial                  | 1              | 1     | 1          | 0,8   |
| <b>Alumínio</b>           |                |       |            |       |
| Redondo segmentado        | 1              | -     | 1          | -     |
| Redondo, 4 segmentos      | 0,28           | -     | 0,28       | -     |
| Redondo, 5 segmentos      | 0,19           | -     | 0,19       | -     |
| Redondo, 6 segmentos      | 0,12           | -     | 0,12       | -     |

Então

$$y_s = a(z) \cdot \left[ 1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 \cdot b(z) \right] \quad (9)$$

Onde, para  $0 < z \leq 5$ ,

$$a(z) = \frac{7 \cdot z^2}{315 + 3 \cdot z^2} \quad e$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + z^2} \quad (10)$$

Para  $0 < z \leq 30$ , os valores de  $a(z)$  e  $b(z)$  são calculados pelo seguinte polinômio:

$$a(z) = 0,19701 - 0,1546295z + 0,073796z^2 - 9,02854 \cdot 10^{-3} z^3 + 6,27032 \cdot 10^{-4} z^4 - 2,69028 \cdot 10^{-5} z^5 + 7,0647 \cdot 10^{-7} z^6 - 1,04301 \cdot 10^{-8} z^7 + 6,62315 \cdot 10^{-11} z^8 \quad (10)$$

$$b(z) = 0,5356 - 0,21030734z + 6,495563 \cdot 10^{-2} z^2 - 1,089373 \cdot 10^{-2} z^3 + 1,03728739 \cdot 10^{-3} z^4 - 5,8238557 \cdot 10^{-5} z^5 + 1,91099645 \cdot 10^{-6} z^6 - 3,38936767 \cdot 10^{-8} z^7 + 2,509622 \cdot 10^{-1} z^8 \quad (11)$$

Para  $z > 30$

$$a(z) = \sqrt{z/2 - 1} \quad e$$

$$b(z) = \frac{2}{4\sqrt{2z - 5}} \quad (12)$$

Construções especiais de condutores tem sido aplicados para sistemas subterrâneos de cabos com condutores de

grandes área de seção transversal. Condutores convencionais não são adequados para terem grandes áreas transversais, podendo assim, terem suas capacidades de condução de corrente seriamente reduzida pelos efeitos skin e proximidade. Um projeto de condutor segmentado, comumente referenciado como sendo condutor “Milliken” ou “tipo M”, tem a isolamento levemente segmentada que reduz a magnitude destes efeitos.

A figura 1, referência [1], mostra a redução da resistência em corrente alternada alcançada com o condutor Miliken comparado com condutor convencional.

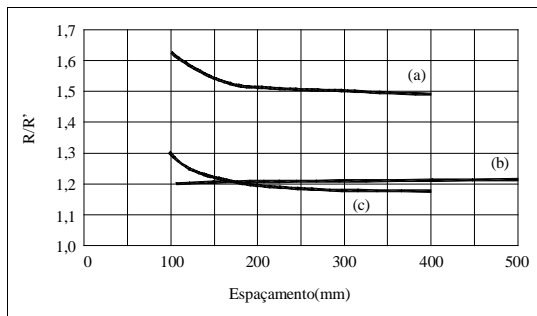


FIGURA 1 – Comparação da relação entre as resistências AC e DC para condutores segmentados e não segmentados.

- (a) - Condutor anular.
- (b) - Condutor segmentado (valores medidos).
- (c) - Condutor segmentado (valores calculados).

A mesma referência [1], traz a expressão para a constante  $k_s$  para os condutores Miliken.

$$k_s = -0,4 + 0,145 \ln(S) \quad (13)$$

Onde,

$S$  – área nominal do condutor em  $\text{mm}^2$ .

A expressão (13) aplica-se a condutores de até  $2000 \text{ mm}^2$  possuindo fios isolados com quatro, cinco ou seis segmentos desprezando a maneira no qual os fios estão colocados.

Grandes condutores de alumínio são construídos com cordas periféricas em torno dos segmentos a fim de fazer o condutor redondo. A constante  $k_s$  é então calculada da seguinte fórmula:

$$k_s = \{12(1-b)([\alpha(1-b) - 0,5]^2 + [\alpha(1-b) - 0,5](\psi - \alpha)(1-b) + 0,33(\psi - \alpha)^2(1-b)^2) + b(3 - 6b + 4b^2)\}^{0,5} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{1}{(1 + \sin(\pi/n))^2}$$

$$\psi = \frac{2\pi/2 + 2/3}{2(1 + \pi/n)} \quad (15)$$

Onde,

$b$  – é a relação da área transversal total das cordas periféricas e da área total do condutor;

$n$  – número de segmentos.

A equação (14) é aplicável em condutores de alumínio de até  $1600 \text{ mm}^2$ . Se a área transversal total das cordas periféricas excederem a 30% da área transversal total do condutor, então,  $k_s$  pode ser assumido como a unidade.

### 3. O EFEITO PROXIMIDADE

Quando dois condutores conduzindo corrente alternada estão em paralelo perto um do outro, a densidade de corrente no lado mais próximo ao outro condutor é menor e, no lado mais distante é maior por causa da diferença da densidade do fluxo magnético. Isto resulta num aumento da resistência em corrente alternada do condutor e é chamado de Efeito Proximidade. Os efeitos skin e proximidade são raramente separados quando se trabalha com cabos e, os efeitos combinados não são diretamente cumulativos. Para conveniência dos cálculos, esses efeitos são considerados separadamente.

A fim de tornar as equações precedentes aplicáveis a condutores encordoados, o fator empírico de condutância transversa,  $k_p$ , é introduzida [6]. Este coeficiente tem função similar nos cálculos do efeito proximidade que o coeficiente  $k_s$  tem nos cálculos do efeito skin. Analogamente à equação (16), tem-se:

$$x_p^2 = x^2 \cdot k_p = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R} \cdot 10^{-7} \cdot k_p \quad (16)$$

Na maioria das aplicações práticas,  $x_p \leq 2,8$ . Neste caso, a seguinte aproximação é dada na norma IEC 287 (1982):

Para cabos bifilares e para dois cabos monofilar,

$$y_p = 2,9ay \quad (17)$$

Para cabos trifilares e para três cabos monofilar,

$$y_p = ay^2 \left( 0,312y^2 + \frac{1,18}{a + 0,27} \right) \quad (18)$$

Onde,

$$a = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4}$$

$$y = \frac{d_c}{s}; e$$

s – espaçamento entre os centros dos condutores.

Como com o fator do efeito skin, a expressão exata para o fator de proximidade requer a solução das equações de Bessel. A referência [1] traz a seguinte aproximação para várias faixas de xp:

Para cabos bifilares e para dois cabos monofilar circular,

$$y_p = \frac{y^2 G(x_p)}{1 - y^2 A(x_p) - y^4 B(x_p)} \quad (19)$$

Para cabos trifilares e para três cabos monofilar circular,

$$y_p = \frac{3y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} \quad (20)$$

Para condutores segmentados encordoado conduzindo corrente trifásica,

$$y_p = \frac{2,5y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} \quad (21)$$

Onde, para  $0 < xp \leq 2,8$ ;

$$\begin{aligned} A(x_p) &= \frac{0,042 + 0,012x_p^4}{1 + 0,0236x_p^4}, \quad B(x_p) = 0 \\ G(x_p) &= \frac{11x_p^4}{704 + 20x_p^4} e \\ H(x_p) &= \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0,0283x_p^4}{1 + 0,0042x_p^4} \end{aligned} \quad (22)$$

Para  $2,8 < xp \leq 3,8$ ;

$$\begin{aligned} A(x_p) &= -0,223 + 0,237x_p - 0,0154x_p^2, \\ B(x_p) &= 0, \\ G(x_p) &= -1,04 + 0,72x_p - 0,08x_p^2 e \\ H(x_p) &= 0,095 + 0,119x_p + 0,0384x_p^2 \end{aligned} \quad (23)$$

Para  $3,8 > xp$ ;

$$\begin{aligned} A(x_p) &= 0,75 - 1,128x_p^{-1}, \\ B(x_p) &= 0,094 - 0,376x_p^{-1} \\ G(x_p) &= \frac{x_p}{4\sqrt{2}} - \frac{1}{8} e \\ H(x_p) &= \frac{2x_p - 4,69}{x_p - 1,16} \end{aligned} \quad (24)$$

#### 4. EFEITO SKIN E PROXIMIDADE DE CABOS TUBULARES (PIPE TYPE)

Para cabos tubulares, o efeito skin e proximidade calculados pelas formas acima são acrescidos pelo um fator de 1,5. Para estes cabos,

$$R = R [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad (25)$$

Esta é uma relação empírica obtida para cabos operando em tensões até 34,5 kV. A norma brasileira NBR 11301/1990 da ABNT [5] sugere que seja usado um fator de 1,7 ao invés de 1,5. Isto também é sugerido por [6] e, resulta em um projeto mais conservativo.

Já a referência [7] propõe uma formulação para o cálculo do efeito do tubo na resistência do cabo. A contribuição para aumento da resistência, em corrente alternada, devido à proximidade de tubos ou conduítes não metálicos é dada por:

$$y_{ep} = \frac{3r_s}{R} \cdot \sum_{m=1}^3 \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)^{2m}}{4^{m-1} \left[ \frac{2,6416 \cdot 10^4 r_s}{n} \right]^2 + 1} \quad (26)$$

Onde,

$S = (D_p - D_s)/2$ , para espaçamento triangular grande;

$S = 0,578D_s$ , para espaçamento triangular próximo;

n – ordem da frequência harmônica (n = 1 para a fundamental);

rs – resistência em corrente contínua do tubo ou conduíte;

Dsm – diâmetro médio do tubo;

Ds – diâmetro externo da isolação do cabo;

Dp – diâmetro interno da isolação do cabo;

Já a contribuição para o aumento da resistência, devido à proximidade de um tubo metálico ou conduíte magnético é dado por:

Para o arranjo triangular próximo:

$$y_{ep} \cong \alpha \sqrt{n} \frac{0,89s + 0,115D_p}{R} \cdot 0,3048 \cdot 10^6 \quad (27)$$

Para o arranjo plano:

$$y_{ep} = \alpha \sqrt{n} \frac{0,34s + 0,175D_p}{R} \cdot 0,3048 \cdot 10^6 \quad (28)$$

Onde,

$\alpha = 1,7$ , para tubo de aço;

$\alpha = 0,8$ , para conduíte de ferro;

$n$  – ordem harmônica;

$s$  – espaçamento de centro a centro entre os condutores adjacentes;

Assim, segundo a referencia [7], a expressão da resistência em corrente alternada seria calculada com a seguinte equação:

$$R = R'(1 + y_s + y_p + y_{ep}) \quad (29)$$

## 5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

É mostrado aqui o desempenho dos cabos, do ponto de vista da presença de correntes harmônicas, quando este é utilizado para alimentar sete tipos de cargas com conteúdo harmônico diferentes.

Foram simulados com o programa MATLAB o comportamento dos cabos monofilares de diversas sessões transversais alimentando cargas com conteúdos harmônicos típicos. Os conteúdos harmônicos simulados foram:

Carga 1 - Conteúdo harmônico típico de um conversor de 6 pulsos;

Carga 2 - Conteúdo harmônico típico de um conversor de 12 pulsos;

Carga 3 - Conteúdo harmônico típico de um conversor de 24 pulsos;

Carga 4 - Conteúdo harmônico típico de um conversor de 6 pulsos com o THD total atenuado em 10%;

Carga 5 - Conteúdo harmônico sem filtragem tirado da norma do IEEE 519;

Carga 6 - Conteúdo harmônico com filtragem tirado da norma do IEEE 519; e

Carga 7 - Conteúdo harmônico com terceira, quinta e sétima harmônicas, com um THD total de 23,3%.

Como parâmetro de determinação do desempenho dos cabos foi estudado o fator de limitação da corrente do cabo (o chamado “derating”), a diminuição da expectativa de vida útil e o aumento adicional da temperatura do cabo devido às correntes harmônicas que circulam pelo cabo em função da área transversal do condutor do cabo.

A figura 2 mostra o comportamento dos cabos vistas a redução da capacidade nominal dos cabos, ou seja, o Fator de Derating do cabo para os respectivos conteúdos harmônicos.

Nota-se que a carga 1 o efeito das correntes harmônicas é mais pronunciável necessitando de um fator de derating de 92%, para um cabo de 240 mm<sup>2</sup>.

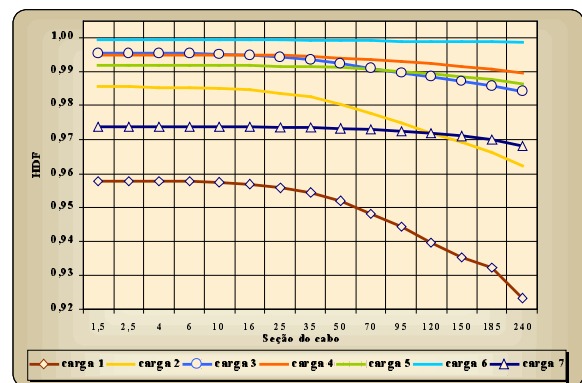


FIGURA 2 – Fator de derating.

Já a figura 3 mostra a redução da expectativa de vida útil para os cabos.

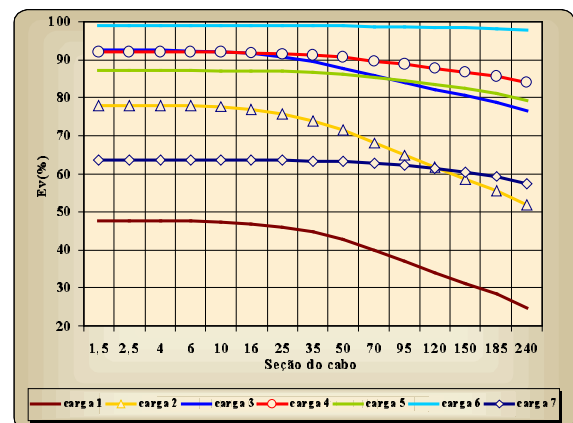


FIGURA 3 – Expectativa de vida útil.

Pela figura 3 verifica-se que para a carga 1, ou seja, conteúdo harmônico típico de um conversor de 6 pulsos, a expectativa de vida útil é diminuída sensivelmente para os cabos monofilares. Já no caso da carga 6 – Conteúdo harmônico com filtragem – quase não há variação da expectativa de vida útil.

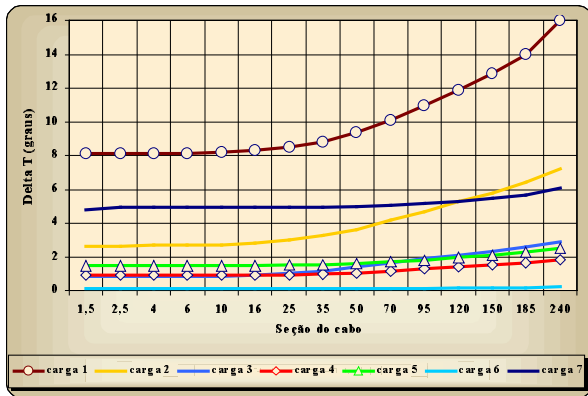


FIGURA 4 – Aumento da temperatura.

E a figura 4 traz o aumento de temperatura experimentada pelos cabos quando da alimentação de cargas com os referidos conteúdos harmônicos.

Na figura 4 verifica-se que a pior condição também se refere a carga 2 para o aumento da temperatura dos cabos. Esse aumento da temperatura pode comprometer a isolamento e, conseqüentemente reduzir a vida útil (como mostra a figura 3) chegando a um aumento de 160 para cabos de seção transversal de 240 mm<sup>2</sup>.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o comportamento de cabos elétricos de potência quando alimentam cargas com diferentes conteúdos harmônicos. Foi mostrado que, dependendo da carga faz-se necessário aplicar uma redução da capacidade de condução para que a expectativa de vida útil não seja afetada. Também foi mostrado a diminuição da expectativa de vida útil e aumento da temperatura. Os resultados foram obtidos utilizando o programa Matlab e as equações de Bessel.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Anders, George J., "Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial application", Editora McGraw-Hill, E.U.A., 1997.
- [2] - Dwight, Herbert B., "Tables of integrals And other mathematical data", Editora Macmillan Publish Co., E.U.A., 4a edição, 1961.
- [3] - Heinhold, L., "Cables y conductores para transporte de energia", Editora Dossat S. A., Espanha, 2a edição, 1973.
- [5] - ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%)", NBR 11301, Setembro 1990.

[6] - J. H. Neher, M. H. McGrath, "The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems", AIEE Transactions, vol. 76, pp. 752 – 772, October 1957.

[7] - Melliopoulos, A. P. Sakis, M. A. Martin, Jr, "Calculation of secondary cable losses and ampacity in the presence of harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no 2 pp. 451 – 459, April 1992.

[8] - Hiranandani, A., "Calculation of ampacities and sizing of line and neutral conductors in the presence of harmonics", Annual Meeting of Industry Applications Society, Orlando, Flórida, E.U.A., 1995.

[9] - Hiranandani, A., "Calculation of conductor temperatures and ampacities of cable systems using a generalized finite difference model", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no 1, January 1991

[10] - J. A. Palmer, R. C. Degeneff, T. M. McKernan, T.M. Halleran, "Pipe-type cable presence of harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8 no 4, October 1993.

[11] - D. A. Silver, G. W. Seman, "Investigation of ac/dc resistance ratios of various designs of pipe-type cable systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no 9, September 1982.

[12] - A. Mekjian, M. Aonowski, C. Katz, "A new method for calculating alternating current losses in pipe-type cable systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no 7, July 1982.

[13] - A. Konrad, "The numerical solution of steady-state skin effect problems – An integrodifferential approach", IEEE Transactions on magnetics, vol. MAG-17, no 1, January 1981.