



V SBQEE  
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica  
17 a 20 de Agosto de 2003  
Aracaju – Sergipe – Brasil



Tópico:  
Análise, Diagnósticos e Soluções.

Uma Metodologia para o Dimensionamento Econômico/Otimizado de Cabos Isolados Perante Condições Não-Senoidais de Operação

Cláudio Roberto Pacheco\*    Olívio C. N. Souto  
Fundação Educacional de Barretos  
Faculdade de Eng. Elétrica

Mateus Duarte Teixeira    José Carlos de Oliveira  
Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Eng. Elétrica

## RESUMO

Para a seleção dos cabos elétricos isolados de média tensão, normalmente são considerados os dados baseados apenas na ampacidade, sem qualquer menção aos custos envolvidos com as perdas de energia durante toda a vida útil do cabo. Neste sentido, este artigo tem por meta avaliar os custos adicionais causados pelas distorções harmônicas, além de computar os gastos pertinentes à instalação dos cabos, bem como os custos adicionais relacionados a possíveis substituições destes componentes de forma prematura. Desta forma, uma estratégia que englobe todas as situações enfocadas é proposta, além da inclusão de uma metodologia de análise, capaz de dimensionar os cabos de forma otimizada.

## PALAVRAS-CHAVE

Cabos Isolados, Análise Econômica, Custos Adicionais, Distorções Harmônicas.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados com a qualidade da energia apresentam-se, na atualidade, como grandes desafios à engenharia elétrica e, vêm assumindo cada vez mais, relevante importância no cenário elétrico nacional e internacional. Não obstante os conhecimentos dispersos sobre os diferentes temas que formam o contexto global da área, os desafios ainda são imensos, particularmente no que se refere à sensibilidade dos inúmeros equipamentos que perfazem um

complexo elétrico [1],[2]. Dentre estes distúrbios pode-se citar a presença das distorções harmônicas, que são oriundas principalmente da operação de cargas com comportamentos não-lineares, e estas, via de regra, afetam e/ou comprometem de forma drástica grande parte dos dispositivos expostos a este fenômeno. No caso dos cabos elétricos, as distorções harmônicas de tensão e corrente, como se sabe, causam perdas adicionais de energia devido à condução de corrente e, dependendo da seção (bitola do condutor) e dos níveis das distorções de tensão, as perdas na isolação (dielétricas) não são mais insignificantes, ou seja, devem ser contabilizadas. A avaliação e dimensionamento da seção do cabo para condições operacionais não-senoidais tem sido analisadas e investigadas nas referências [3]-[6]. Os procedimentos apresentados em [3]-[5] são baseados somente em considerações relacionadas a ampacidade sem particular atenção para os custos que podem ser acrescidos durante toda a vida útil do cabo. Em [6] algumas considerações pertinentes ao acréscimo dos custos das perdas relacionadas às harmônicas são computadas, mas as investigações não incluem todos os aspectos dos custos envolvidos.

Entretanto, é bem conhecido que, a seleção da seção do cabo apresenta apreciável dependência com todos os custos financeiros envolvidos [7]-[12]. Desta forma, os estudos devem contemplar os seguintes custos: investimentos iniciais, os relacionados as perdas Joule de energia, àqueles pertinentes às perdas dielétricas de energia, bem

como os oriundos de possíveis substituições dos cabos de forma prematura.

No caso particular dos cabos isolados de média tensão, os quais são o cerne deste artigo, a grande maioria das pesquisas envolvidas nesta área de atuação, desprezam e/ou não consideram os gastos adicionais envolvidos com as perdas dielétricas, considerando tão somente as perdas Joule devido a fundamental e harmônicas. Ademais, convém relatar que nos artigos pesquisados, não foram encontradas nenhuma menção relativa aos custos envolvidos com possíveis trocas dos cabos de forma prematura e, para sistemas distorcidos, esta situação é passível de ocorrer nos cabos isolados.

Dentro deste contexto, este artigo tem por objetivo propor uma estratégia de análise que permita a seleção otimizada de cabos elétricos isolados de média tensão perante condições não-senoidais de operação. Assim, são abordados os custos relativos aos investimentos iniciais, os pertinentes às perdas Joule de energia, incluindo os gastos adicionais devido às tensões e correntes harmônicas e, os custos relacionados a possíveis substituições dos cabos de forma prematura.

O modelo elétrico/térmico utilizado nos estudos é o proposto por [13] a qual utiliza técnicas de análise no domínio da frequência. As equações derivadas são então implementadas no software designado por MATLAB e algumas simulações computacionais são realizadas.

## 2.0 - CUSTOS ENVOLVIDOS COM CABOS DE MÉDIA TENSÃO SUBMETIDOS A CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIS

Nos estudos destinados a quantificar os custos envolvidos na seleção de cabos isolados de média tensão, observa-se que grande parte das pesquisas aborda os seguintes itens [11]:

- Custos iniciais relativos à instalação da rede elétrica;
- Custos devido às perdas Joules, dielétricas e na blindagem advindos da operação dos cabos;
- Custos pertinentes à manutenção dos cabos. Estes englobam possíveis substituições de forma prematura.

Neste sentido, o custo total para a operação de cabos elétricos isolados de média tensão pode ser expresso através da seguinte equação.

$$C_T = C_I + C_{OP} + C_{env} \quad (1)$$

De acordo com [14] os custos de investimentos iniciais  $C_I$  em (1) é função do comprimento do condutor; e pode ser obtido através da expressão (2).

$$C_I = L(AS + C) \quad (2)$$

Onde:

L – Comprimento do cabo;

A – Componente variável de custo relativa à extensão e bitola do condutor;

S – Seção transversal do condutor.

C – Componente constante do custo não afetado pela extensão e bitola do condutor.

Contudo, para efeitos de simplicidade nos cálculos dos custos iniciais, utilizar-se-á os valores em R\$/m correntes no ano de 2003.

No tocante aos custos financeiros ocasionados pela operação de cabos isolados, envolvendo as perdas sob condições senoidais e não-senoidais de tensão e corrente, estas podem ser obtidas pela equação a seguir:

$$C_{OP} = L \cdot N_p \cdot Kw \left( \sum_{n=1}^h P_{Jn} + P_{Dn} + P_{Bn} \right) \Delta t \quad (3)$$

Na equação,

$N_p$  – Número de fases;

$Kw$  – Custo unitário da energia elétrica;

$P_{Jn}$  – Perdas Joule de energia devido a fundamental e harmônicas;

$P_{Dn}$  – Perdas dielétricas de energia para fundamental e harmônicas;

$P_{Bn}$  – Perdas de energia na blindagem relativas à fundamental e harmônicas;

$\Delta t$  – Período de tempo em análise.

Neste momento, é interessante avaliar os custos operacionais ao longo dos vários anos de funcionamento do cabo. Para tanto, faz-se necessário considerar dois fatores econômicos:

- A taxa anual de variação do custo unitário da energia elétrica;
- Valor presente dos custos que acontecem anualmente;

Pressupondo-se que as análises sejam realizadas ano a ano, deve-se fazer a correção anual do custo unitário da energia elétrica atual (ano 1) para cada 12 meses. A expressão (4) permite tal avaliação.

$$(Kw)_{ni} = (Kw)_1 (1 + \alpha)^{ni-1} \quad (4)$$

Onde:

$\alpha$  - taxa anual de variação do custo unitário da energia elétrica (0,073);  
 $n_i$  - número de anos de análise;  
 $(Kw)_{n_i}$  - custo unitário da energia elétrica no ano  $n_i$ ;  
 $(Kw)_1$  - custo unitário da energia elétrica no ano 1;

Para o cálculo do valor presente da série uniforme dos gastos operacionais anuais, emprega-se a expressão (5):

$$(C_{op})_{n_i}^{vp} = \frac{(C_{op})_{n_i}}{(1+a)^{n_i-1}} \quad (5)$$

Onde:

$(C_{op})_{n_i}^{vp}$  - valor presente do custo que ocorre no ano  $n_i$ ;  
 $(C_{op})_{n_i}$  - custo operacional no ano  $n_i$ ;  
 $a$  - taxa anual de juros (8,3 aa);

Finalmente, é possível calcular os custos operacionais totais referentes a todo o período de análise ou durante toda a vida útil do sistema elétrico, empregando-se para tanto a expressão (6)

$$C_{op} = \sum_{n=1}^{N_T} \frac{(C_{op})_{n_i}^{vp}}{(1+a)^{n-1}} \quad (6)$$

Onde:

$N_T$  - número de anos de análise;

As perdas Joule para a componente fundamental, bem como para as harmônicas, podem ser determinadas através da expressão (7).

$$P_{Jn} = \sum_{n=1}^h R_n I_n^2 \quad (7)$$

Sendo:

$R_n$  - Resistência do condutor para a  $n$ -ésima ordem harmônica;  
 $I_n$  - Corrente no condutor para a  $n$ -ésima ordem harmônica.

Para a correção da resistência do condutor com a frequência tem-se a seguinte equação:

$$R_n = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta_{op} - 20)] (1 + \gamma_{hs} + \gamma_{hp}) \quad (8)$$

Na equação:

$\rho_{20}$  - Resistividade elétrica do condutor a 20°C;  
 $\alpha_{20}$  - Coeficiente de temperatura a 20°C;  
 $\theta_{op}$  - Temperatura de operação do condutor;  
 $\gamma_{hs}$  - Fator de efeito "Skin";  
 $\gamma_{hp}$  - Fator de efeito proximidade.

Os fatores de efeitos "Skin" e proximidade dependem da bitola do condutor, da frequência de operação e da geometria dos cabos. A referência [7] aborda todos os procedimentos necessários para a obtenção destes parâmetros e mostra alguns exemplos numéricos inclusive para condições não-senoidais.

Com relação às perdas dielétricas para condições ideais e não-ideais estas podem ser obtidas de acordo com a expressão (9):

$$P_{Dn} = \sum_{n=1}^h \frac{V_n^2 \cdot tg \delta}{X_{Cn}} \quad (9)$$

Onde:

$V_n$  - tensão aplicada ao condutor de ordem  $n$ ;  
 $tg \delta$  - ângulo de perdas da isolação;  
 $X_{Cn}$  - reatância capacitiva de ordem  $n$ .

O ângulo de perdas da isolação depende do tipo de material empregado na isolação. Ademais, sabe-se que o mesmo sofre pequenas alterações em função da frequência de operação. Para os estudos este será considerado constante para todas as faixas de frequência. O erro que se comete em admitir tal hipótese é insignificante.

Para a reatância capacitiva será empregada a expressão (10) que a corrige com a frequência:

$$X_{Cn} = \frac{1}{n} \cdot X_{C1} \quad (10)$$

Sendo:

$X_{C1}$  - Reatância capacitiva do cabo à frequência fundamental.

As perdas nas partes metálicas podem ser estimadas como um percentual das perdas Joule e podem ser expressar por:

$$P_{Bn} = \sum_{n=1}^h \lambda_n \cdot P_{Jn} \quad (11)$$

O fator  $\lambda_n$  depende da frequência de operação do sistema, da disposição dos cabos e do tipo de

aterramento empregado na blindagem. A referência [7] aborda com detalhes os procedimentos e parâmetros necessários para sua obtenção, além de fornecer alguns exemplos numéricos.

Finalmente, a quantificação dos custos decorrentes da diminuição da vida útil do cabo consiste em determinar o momento em que se dará a completa degradação do isolamento e o subsequente investimento para a substituição do componente. Nestes termos, a estratégia a ser utilizada consiste basicamente em verificar os investimentos na aquisição de novo(s) cabo(s) em substituição àquele(s) danificado(s).

Estes gastos financeiros, denominados por custos adicionais devido ao envelhecimento do(s) cabo(s), podem ser determinados através da equação:

$$C_{env} = C_{ns} - C_s \quad (12)$$

Na expressão (12), a grandeza  $C_{ns}$  corresponde ao investimento total para aquisição de novo(s) cabo(s) ao longo da vida útil do sistema elétrico, sob condições operacionais não-senoidais. Por outro lado,  $C_s$  está associado aos custos dos cabos em regime de funcionamento ideal.

Convém salientar que, o custo residual dos cabos ao final de sua vida útil, não será contemplado nas análises que se seguem.

O investimento necessário para aquisição dos cabos sob operação ideal será determinado aplicando-se os conceitos da matemática financeira. Assim, deve-se trazer para uma mesma referência de tempo, para fins de comparação, todos os gastos realizados com compras de cabos dentro do período estabelecido pela vida útil dos componentes. Para tanto:

$$C_s = \sum_{i=1}^{N_s} C_{s,i}^{vp} \quad (13)$$

Na expressão:

$C_{s,i}^{vp}$  - valor presente dos custos necessários para aquisição de novos cabos durante o período de  $N_T$  anos – alimentação senoidal;  
 $N_s$  – número de vezes que deve ser adquirido novos cabos.

De maneira análoga, o gasto necessário para aquisição de cabos em condições não-senoidais é dado pela equação:

$$C_{ns} = \sum_{i=1}^{N_{ns}} C_{ns,i}^{vp} \quad (14)$$

Onde:

$C_{ns,i}^{vp}$  - valor presente do custo necessário para aquisição de novos cabos durante o período  $N_T$  anos – alimentação não-senoidal;  
 $N_{ns}$  – número de vezes que deve ser feito a compra de novos cabos em condições não-senoidal.

### 3.0 - ESTUDO DE CASOS

Para a verificação da eficácia da estratégia proposta no item precedente, optou-se por utilizar dados extraídos de um sistema real referente a uma indústria álcool/açucareira localizada na região noroeste do estado de São Paulo. Em princípio, o engenheiro electricista responsável pela empresa sugeriu que para a seleção dos novos cabos a serem instalados, fossem consideradas somente questões pertinentes a ampacidade. Dessa forma, foram realizadas medições nos cabos a serem substituídos e a escolha recaiu sobre o cabo de 95 mm<sup>2</sup> classe de tensão 8,7/15 kV. Neste estudo preliminar, não foram abordados itens como distorções harmônicas e custos relacionados às perdas de energia inerentes a estes componentes, bem como aos possíveis custos financeiros advindos de manutenções/substituições futuras nas instalações da rede.

Tendo esta situação como referência, três casos são simulados com o intuito de averiguar qual a melhor opção para atender as necessidades da instalação elétrica, considerando todas as variáveis de custos envolvidas. A tabela 1 fornece os dados relativos às situações em análise, as quais serão consideradas para as simulações computacionais.

Tabela 1. Casos analisados

Casos Estudados	Bitola do Cabo (mm <sup>2</sup> )	Situação Avaliada
I	95	Somente considerando a ampacidade do cabo a 60Hz.
II	95	Presença de componentes harmônicas sobrepostas a fundamental.
III	120	Presença de componentes harmônicas sobrepostas a fundamental.

Vale ressaltar que para o caso 1 a corrente eficaz fundamental medida e utilizada nos estudos são

de 325 A, igual àquela medida pelo engenheiro da indústria. Para o caso 2, foram realizadas medições empregando um analisador espectral com a finalidade de conhecer as ordens harmônicas mais expressivas presentes na tensão e corrente. A tabela 2 ilustra os níveis encontrados, os quais serão usados nas simulações computacionais.

Tabela 2. Níveis harmônicos encontrados.

Ordem Harmônica	Níveis de tensão (pu)	Níveis de Corrente (pu)
1	1	1
5	0.05	0.20
7	0.035	0.12
11	0.015	0.09
13	0.01	0.07

Na tabela anterior a corrente e a tensão fundamental medidas foram de 325 A e 13,8 kV, respectivamente.

Finalmente, para o último caso estudado, são empregados os mesmos níveis de tensão e corrente do caso 2, contudo os trabalhos contemplam cabos de 120 mm<sup>2</sup>.

#### 4.0 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES

Uma vez conhecido o sistema elétrico utilizado para as simulações, assim como os valores de tensão e corrente, procede-se às análises e avaliações sobre a situação mais apropriada e conveniente para a indústria. Além dos dados ora mencionados, outras informações são requeridas pelo software, as quais são abordadas a seguir:

- Vida útil do sistema elétrico: 40 anos
- Vida útil nominal dos cabos: 40 anos
- Número de fases: 3
- Comprimento do cabo: 800 metros
- Valor presente do custo do Kwh: 1 pu
- Valor presente o cabo 95 mm<sup>2</sup>: 1 pu
- Valor presente do cabo 120 mm<sup>2</sup>: 1.32 pu
- Taxa anual de variação do custo do cabo: 0,073
- Taxa anual de juros: 20 aa
- Taxa anual de variação do custo da energia elétrica: 0,073
- Temperatura ambiente no solo ou duto: 25°C

Nos estudos que contemplam o cabo de 95 mm<sup>2</sup> conduzindo apenas a corrente fundamental, os resultados mostram que a vida útil do cabo para o caso 1 é preservada, pois a corrente encontra-se em patamares inferiores à nominal do cabo. Todavia, estes números não expressam a situação real vivenciada pelo cabo uma vez que o sistema elétrico sob análise apresenta fortes níveis de distorção harmônica. No entanto, para efeitos de comparação este caso será tomado como referência nas análises que se seguem. Sendo assim, o custo total (C<sub>T</sub>) ao longo de 40 anos, é de 1 pu.

Para a situação designada por 2, na qual a rede elétrica apresenta níveis de distorções harmônicas como aqueles descritos na tabela 2, os resultados demonstraram aumentos substanciais relacionados às perdas nos cabos. Estes incrementos ocasionaram elevações de temperatura acima do nominal permitido pelo isolamento, causando redução na vida útil dos cabos na ordem de 25 %. Isto implica em custos adicionais relativos à manutenção/substituição destes componentes de forma prematura.

Com relação aos custos totais, houve um acréscimo de 8% a mais quando comparado ao caso 1. Este valor evidencia os impactos que as distorções harmônicas causam na operação dos condutores elétricos e, portanto, devem ser consideradas.

Finalmente, o caso 3, o qual utiliza-se de cabos com maiores seções transversais, constata-se que as perdas envolvidas são menores que as apresentadas nos casos 1 e 2. Tal afirmativa deve-se à menor resistência elétrica apresentada pelo condutor e pelo fato do efeito "skin" não se fazer muito pronunciado. Em decorrência disto, a temperatura de operação dos cabos atingiram patamares inferiores àqueles suportados pelo isolante. Desta forma, além da vida útil ser preservada, pôde se observar incrementos da vida útil.

Quanto aos custos totais envolvidos, os mesmos foram reduzidos em 14% em relação à situação tomada como referência (caso 1). Este caso mostra que embora os custos relacionados aos investimentos iniciais sejam superiores às situações que empregam cabos de 95 mm<sup>2</sup>, verifica-se que esta estratégia é mais atrativa financeiramente, quando o retorno a médio/longo prazo é considerado.

Com o intuito de ilustrar a diferença entre os casos investigados, a figura 1 apresenta tal comparação.

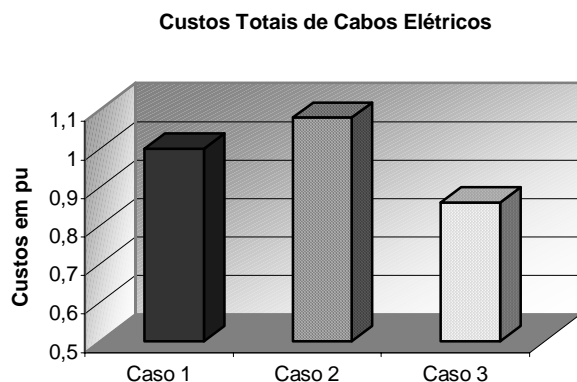


Figura 1. Gráfico comparativo dos custos envolvidos nos casos avaliados.

## 5.0 - CONCLUSÕES

A queda de rendimento dos diversos equipamentos e componentes elétricos quando estes experimentam uma perda qualitativa da energia, tem demandado crescentes esforços dos mais diferentes segmentos envolvidos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Assim, os cabos elétricos isolados vêm merecendo especial atenção, visto sua ampla aplicação nos mais diferentes tipos de instalações.

Neste sentido, o presente artigo abordou os aspectos financeiros relacionados com o dimensionamento de cabos elétricos isolados de média potência alimentando cargas não-lineares. Inicialmente, foi mostrada uma equação matemática para o cálculo dos custos iniciais da compra do cabo. Em seguida, apresentou-se um procedimento apropriado à determinação dos incrementos nos custos financeiros associados à instalação e operação de cabos isolados sob condições não ideais.

Basicamente, a metodologia permitiu, a partir dos valores de distorções da tensão e corrente de alimentação, determinar os acréscimos com o consumo de energia elétrica (custos operacionais) e gastos quando da necessidade de aquisição de novos cabos (custos de envelhecimento prematuro) devido a sua redução de vida útil.

Finalmente, para demonstrar a aplicabilidade e eficácia do método, foram simulados três casos práticos utilizando dados de um sistema real. Como pode ser observada, a presença de harmônicos na rede elétrica fez aumentar, substancialmente, os custos envolvidos na operação de cabos de 95 mm<sup>2</sup>. Como alternativa, o cabo de 120 mm<sup>2</sup> pode ser adotado com grande sucesso, pois, apesar de ter custos iniciais superiores ao primeiro, este mostrou

baixas perdas, reduzindo sobremaneira os custos operacionais e com manutenção/substituição.

Dessa forma, este trabalho procurou atender-se para o retorno financeiro a médio/longo prazo. Uma vez que, o montante financeiro inicial, pode ser irrelevante frente aos custos operacionais decorrentes ao longo da vida de cabos isolados alimentando cargas não senoidais.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dugan, R. et al, *Electrical Power System Quality*, McGraw-Hill, USA, 1996.
- [2] Arrilaga, J. et al, *Power Systems Harmonics*, John Wiley & Sons, USA, 1995.
- [3] A. Hiranandani, "Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics" *IEEE Ind. Applicat. Mag.*, pp. 42-51, Mar./Apr. 1998.
- [4] J. A. Palmer, R. C. Degeneff, T. M. McKernan, and T. M. Halleran "Pype-type cable ampacity in the presence harmonics" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, pp. 1689-1695, Oct. 1993.
- [5] G. Carpinelli, F. Donazzi, and D. Valenza "On the low voltage and medium voltage cables sizing problem in presence of current and voltage nonsinusoidal waveforms" *L'Energia Elett.*, no. 5, pp. 181-187, 1987.
- [6] G. Carpinelli, F. Donazzi, F. Gagliardi, V. Mangoni, F. Rossi, and D. Valenza, "On the médium voltage cables sizing problem in presence of current and voltage nonsinusoidal waveforms" *L'Energia Elettrica*, no. 7/8, pp. 181-187.
- [7] G. J. Anders, *Rating of Electric Power Cables*. New York: IEEE Press, 1997.
- [8] R. G. Parr "The economic choice of conductor size" *Rév. Gén. L'Electricité*, no. 10, pp. 49-55, Nov. 1989.
- [9] G. J. Anders, M. Vainberg, D. J. Horrocks, S. M. Foty, and J. Motlis "Parameters affecting economic selection of cable sizes" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, pp. 1661-1667, Oct. 1993.
- [10] Insulated Conductors Committee – Task Group 7-39 "Cost of losses: Loss evaluation for underground transmission and distribution cable systems" *IEEE Trans. Power Delivery*, pp. 1652-1659, Nov. 1990.
- [11] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [12] "Economic optimization of power cable size" *IEC Publ.* 1059, 1991.
- [13] Pacheco C. R. Oliveira J. C. Vilaça A. L. A. "Power Quality Impact on Thermal Behaviour and Life Expectancy of Insulated Cables" *ICHQP 2000*, Orlando, EUA.
- [14] P. Caramia, G. Carpinelli, A. L. Vitola, and Paola Verde "On the economic selection of médium voltage cable sizes in nonsinusoidal conditions" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 1, Jan. 2002.