



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT 06
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SUPERFÍCIE PARA CABOS CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS DE SEÇÃO TRAPEZOIDAL

**Lúis Adriano de Melo Cabral Domingues(*) Fáblio Terra Passos Duarte
Carlos Ruy Nunez Barbosa Rafael Monteiro da Cruz Fernando Chaves Dart**

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

RESUMO

Uma etapa fundamental do projeto de Linhas de Transmissão (LTs) consiste na seleção do condutor. Um dos critérios que devem ser atendidos na fase de seleção do condutor ótimo é do desempenho quanto ao efeito corona (corona visual, radiointerferência, ruído audível e perdas) [1]. A análise de todos estes efeitos passa pela determinação do campo elétrico superficial e sua relação com o limiar de corona. O cálculo do campo elétrico superficial dos condutores é efetuado utilizando algum dos métodos de cálculo, de um leque bem conhecido, de boa precisão. Contudo a avaliação do limiar de corona baseia-se numa metodologia de base empírica e validade restrita, cuja faixa de validade este IT propõe-se ampliar.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão, campo elétrico superficial, gradiente crítico, fator de superfície, perda corona, radiointerferência, ruído audível.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para determinação do limiar de corona é corrente aplicar-se uma fórmula empírica, sendo que a de Peek [2] é de aplicação generalizada. Nestas fórmulas existe um fator – chamado fator de superfície – que é genericamente responsável por representar o afastamento do condutor real com relação a um condutor idealmente cilíndrico. Neste fator estão misturados dois aspectos totalmente independentes:

- O encordoamento dos cabos: os condutores atualmente utilizados nas linhas aéreas são cabos encordoados, pelo que o campo elétrico calculado pelos métodos convencionais – que representam superfícies cilíndricas – não representa o campo no condutor real; esta diferença é compensada no referido fator de superfície.
- Irregularidades, danos e sujeira nos cabos: é reconhecido da prática de construção e operação de linhas aéreas, que os cabos sofrem alguns danos no processo de lançamento (amassados, arranhões, etc.) e estão sujeitos a acumulação de poluição, insetos, etc., que causam elevações locais de campo elétrico. Tais imperfeições também são genericamente incluídas no referido fator de superfície.

Na prática atual de projetos de linhas de transmissão aéreas, utilizando a fórmula de Peek, costuma-se adotar um fator de superfície entre 0,75 e 0,85 para tempo bom.

Recentemente surgiram no mercado opções de cabos condutores com características diferentes dos tradicionais cabos encordoados. Como exemplo pode-se citar os cabos compactos de componentes com seção trapezoidal. Estes cabos eliminam os espaços vazios que existem entre os tentos de seção circular nos cabos convencionais, o que traz uma série de vantagens pela menor diâmetro com relação a um cabo convencional de mesma seção útil. Por outro lado, o desempenho com relação ao campo elétrico superficial é mais crítico, pois condutores de menor diâmetro geram campos superficiais mais elevados. Além disto, a prática de adotar um fator de superfície genérico é equivocada neste caso, pois a parcela deste fator que representa o encordoamento não tem sentido neste caso, uma vez que a superfície destes cabos é cilíndrica e lisa.

Neste IT apresenta-se uma metodologia que permite o cálculo do campo elétrico em cabos encordoados, considerando a geometria real da superfície dos cabos. Com os valores de campo elétrico do cabo real e da aproximação cilíndrica ideal pode-se determinar a parcela do fator de superfície devida ao encordoamento, com o que se pode avaliar a parcela restante, devida às irregularidades superficiais, a qual é comum a todos os tipos de condutor e pode ser utilizada em projetos com cabos de seção trapezoidal.

São apresentados resultados de ensaios para determinação do limiar de corona de cabos convencionais e de seção trapezoidal, obtidos através de testes numa gaiola. Os resultados destes ensaios são comparados com os das simulações para validação da metodologia apresentada.

2.0 - EFEITO CORONA

No projeto de LTs o controle dos impactos produzidos pelo efeito corona pode ser feito pelo estudo e adequado dimensionamento com respeito a cada um dos quesitos: radiointerferência, ruído audível e perda corona. Se a linha apresentar desempenho adequado no que se refere a estes fenômenos, então o desempenho quanto ao corona estará adequado. Contudo é usual efetuar-se o cálculo do campo elétrico de início de corona, ou limiar de corona visual. Isto deve-se a duas razões principais:

- O cálculo de corona visual é uma prática usual nos bons projetos de linhas de transmissão.
- As regras do Edital de Licitação (o quesito referente ao controle de corona visual tem sido mantido desde as primeiras versões do edital) estipulam controle do corona visual, apesar de não haver prática usual de verificação do cumprimento desta exigência.

Em princípio parece perfeitamente possível projetar e construir linhas de transmissão sem passar pelo cálculo do gradiente de início de corona, bastando dimensionar as LTs para os efeitos mais diretamente mensuráveis. Porém há uma razão forte para manter este item no processo de dimensionamento: o limiar de corona dos cabos de linhas aéreas em alta tensão é extremamente sensível ao estado superficial desses cabos. Deste modo uma LT projetada muito próxima ao limiar de corona pode, na ocorrência de eventos como elevada umidade, poluição, depósito de resíduos vegetais ou animais, etc, apresentar uma degradação de desempenho inaceitável. Como os fatores que podem levar a essa deterioração da condição superficial dos condutores estão, na maioria dos casos, fora do controle do projetista, é usual adotar, por prudência, uma margem de segurança. O mais comum é calcular o gradiente de início de corona e estipular como gradiente máximo de operação da linha um valor entre 0,8 e 0,9 daquele limiar.

3.0 - CÁLCULO DO LIMIAR DE CORONA

A determinação do campo elétrico crítico, correspondente ao limiar de corona, pode ser feita por métodos experimentais ou por intermédio de fórmulas empíricas:

- O processo experimental consiste em energizar uma amostra do cabo, elevando a voltagem até o início do corona, num arranjo onde se possa determinar o campo elétrico analiticamente (gaiola cilíndrica) ou por calibração. A determinação experimental tem a vantagem de levar em conta diretamente todas as características físicas do cabo, sem necessidade de fatores de compensação, produzindo diretamente o valor do gradiente de início de corona. Em contrapartida o valor refere-se exclusivamente ao cabo testado, nas condições específicas em que se encontra.
- As fórmulas empíricas [1] utilizadas para determinação do gradiente de início de corona são baseadas em séries de valores determinados em laboratório. Das diferentes alternativas, a mais comumente utilizada é a fórmula de Peek [2], que é a mais adequada, pois apesar de ser uma fórmula de base empírica, tem uma fundamentação física robusta, à luz da física de descarga [3]. A vantagem da utilização dessas fórmulas é permitir analisar e comparar rapidamente uma grande variedade de cabos, de diferentes diâmetros, com ganhos de tempo e custo.

A fórmula de Peek é:

$$E_0 = 30m\delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r\delta}} \right) kV/cm$$

Onde:

E_0 é o valor do gradiente de início de corona em kV_p/cm

δ é a densidade relativa do ar

r é o raio do condutor em cm

m é o fator de superfície

4.0 - FATOR DE SUPERFÍCIE

O parâmetro adimensional m , designado por fator de superfície, introduz a consideração que os cabos utilizados na prática não são perfeitamente cilíndricos. Desta forma um valor $m=1$ resultaria idealmente no gradiente de início de corona de um cabo cilíndrico perfeito. Em estudos e projetos é usual adotar um valor entre 0,75 e 0,85 como representativo da condição real de condutores de linhas de transmissão aéreas.

No entanto, como se depreende da definição desse fator de superfície, nele estão embutidos todos os aspectos que afastam um cabo de transmissão da condição cilíndrica ideal:

- Encordoamento: a grande maioria dos cabos atualmente utilizados em LTs aéreas é formado por fios mais finos enrolados de modo espiralado alternado sobre um núcleo. Isso faz com que a sua superfície fique com uma formação ondulada característica.
- Arranhões, amassados, danos físicos: no processo de transporte, armazenagem e lançamento é possível que o cabo sofra danos que alteram sua superfície. Especialmente prejudiciais para o desempenho corona são arranhões e amassados na superfície.
- Poluição: quaisquer resíduos de natureza vegetal ou animal que se agreguem à superfície dos cabos deterioram o seu desempenho quanto a corona.

Geralmente a utilização de um fator de superfície genérico não tem sido impedimento para os estudos e projetos de LTs. Porém a introdução de cabos especiais, com características construtivas diferentes dos cabos encordoados convencionais gera a questão: que fator de superfície utilizar, uma vez que a parcela referente ao encordoamento não se aplica neste caso?

Com estas considerações, este trabalho teve como objetivo determinar qual a parcela do fator de superfície devida ao encordoamento dos cabos. Determinada esta parcela, o restante do fator de superfície é devido aos outros fatores. Conseguindo-se fazer este desmembramento passa-se a ter um indicativo de qual valor utilizar para o fator de superfície de cabos fabricados com novas tecnologias, não encordoados.

5.0 - CABOS ESPECIAIS

Recentemente um novo tipo de cabo foi apresentado por fabricantes: trata-se de um cabo construído de forma que os elementos constitutivos de alumínio se encaixam, praticamente eliminando os espaços de ar que nos cabos tradicionais se formam entre os tentos de alumínio, resultando num cabo compacto, de superfície lisa. Estes cabos podem apresentar diversas vantagens tais como:

- Para uma mesma bitola a área útil de alumínio é maior (vantagem do ponto de vista da ampacidade)
- Para uma mesma área útil de alumínio a bitola é um pouco menor (menos esforço de vento).

Porém, para aplicação destes cabos é necessário estudar o seu comportamento com relação ao corona, pela grande diferença da sua condição superficial comparada com os cabos encordoados.

6.0 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SUPERFÍCIE PARA CABOS ESPECIAIS

Neste trabalho o fator de superfície foi avaliado por modelagem e através de ensaios em laboratório. Na modelagem foram simulados, para uma série de cabos de diâmetros variados, o condutor ideal, cilíndrico, e o condutor real, encordoado, modelado como se fosse um conjunto de condutores cilíndricos dispostos em coroa. Utilizando-se, em cada caso, a relação entre o campo superficial máximo e o campo crítico (E_m/E_0) como medida da distância ao ponto de início de corona, determinou-se quanto o campo elétrico na simulação do cabo real está mais próximo do crítico que o do condutor ideal. Esta redução de campo superficial admissível é a parcela do fator de superfície correspondente ao encordoamento.

Nos ensaios de laboratório verificou-se experimentalmente o fator de superfície de cabos convencionais, não convencionais, e de tubos lisos utilizados em arranjos de ensaio no próprio laboratório.

6.1 Modelagem desenvolvida

Para cálculo do campo elétrico superficial de condutores idealmente cilíndricos há uma gama razoavelmente extensa de métodos de cálculo. O levantamento efetuado no "survey IEEE" [5] continua válido, no sentido de identificar métodos de precisão mediana e métodos de elevada precisão. Os métodos de elevada precisão, garantem um cálculo com erro máximo inferior a 2%, que é proposto como um limiar de erro aceitável para que se possa classificar um método de cálculo nesta categoria. Os principais métodos que se enquadram na precisão elevada são:

- Simulação de cargas;
- Imagens sucessivas;
- Momentos (série harmônica).

Atualmente podem-se acrescentar as famílias de métodos de elementos finitos e diferenças finitas, porém esses métodos, embora garantam elevada precisão, continuam sendo pouco adequadas a estudos de linhas de transmissão, onde se trata com arranjos de grandes dimensões e fronteiras abertas.

Para cálculo do campo elétrico de condutores, adotando a hipótese de condutor perfeitamente cilíndrico, qualquer dos métodos citados é adequado em termos de precisão e facilidade de cálculo. Porém, para simular o condutor encordoado, há problemas de precisão e convergência, provocados pelos detalhes geométricos da tangência entre os tentos na coroa externa. Foram feitos testes com os três métodos e desenvolvida uma implementação do método de momentos, com otimização da colocação dos pontos de contorno, que se mostrou capaz de efetuar os cálculos necessários.

Percorrendo a série de cabos ACSR, das menores até às maiores bitolas, foi feita, para cada um, o cálculo do campo superficial (para uma configuração padrão cabo-solo), e do campo crítico, tanto para o cabo cilíndrico ideal quanto para o cabo encordoado, considerado como uma coroa de tentos. Em seguida foi verificada a relação entre campo máximo e o campo crítico, para finalmente se verificar quanto o efeito do encordoamento reduz o limiar de corona por comparação com o cabo liso. O gráfico da relação E_m/E_0 pode ser visto na figura 1 a seguir.

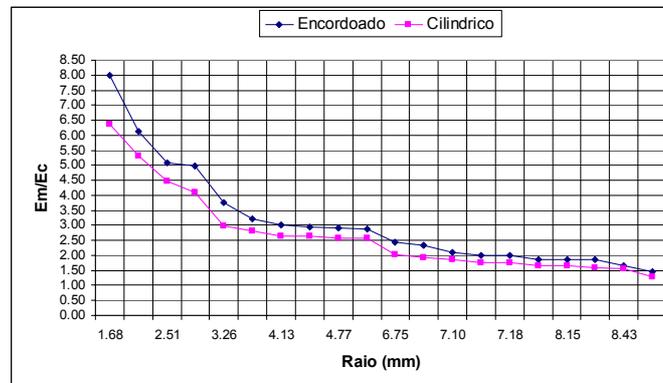


Figura 1. Evolução da relação Campo máximo / Campo crítico em função do raio do encordoamento.

Verificou-se que, embora a relação E_m/E_0 varie com a bitola do encordoamento, a relação dos dois fatores mantêm-se praticamente constante em 0,88. Este valor representa a redução na suportabilidade ao corona do cabo encordoado, sendo pois a parcela do fator de superfície devida ao efeito do encordoamento.

6.2 Ensaios de Laboratório

Foram desenvolvidos ensaios em gaiola de Faraday de forma a poder verificar experimentalmente e comparar o gradiente crítico dos cabos convencional e AERO_Z, figura 2. Para efeito de comparação foi também ensaiado um tubo de alumínio utilizado em ensaios no laboratório. Os condutores ensaiados foram todos de mesmo diâmetro. O procedimento de ensaio é padrão. A partir da colocação do cabo na gaiola, como pode ser observado na Figura 3, realiza-se a calibração do circuito de medição com a colocação de uma esfera de 4 mm na superfície do

cabo e a aplicação de dez elevações do potencial no cabo, com intervalo de 1 minuto, até a observação do início do corona.



Figura 2 – Detalhe do encordoamento do cabo AERO_Z



Figura 3 – Circuito de ensaio

A esfera então é retirada e as mesmas dez aplicações são realizadas, o gradiente de início de corona é então definido a partir da média dos valores de tensão dividida pela dos raios interno e externo da gaiola. Foram também observados os valores do campo elétrico superficial para a condição de corona generalizado.

Nas Figuras 4 a 6 são apresentados detalhes dos cabos e do tubo utilizados nos ensaios, e na tabela I são apresentados os valores obtidos de campo elétrico.



Figura 4 – Cabo AERO_Z



Figura 5 – Cabo ACSR

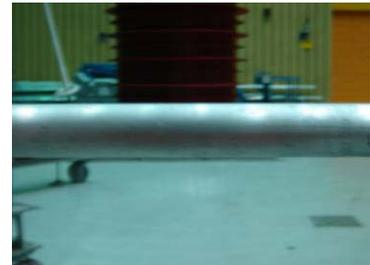


Figura 6 – Tubo de alumínio

Tabela I – Valores de campo elétrico em kV/cm

Cabo	Calibração	Início de Corona	Corona Generalizado	Fator de Superfície
AERO_Z	15,2	20,4	28,8	0,80
ACSR	14,1	19,0	25,9	0,74
Tubo	14,3	20,3	24,6	0,79

Da tabela I pode-se observar o bom desempenho do cabo AERO_Z tanto o gradiente de início de corona quanto o de corona generalizado em relação ao cabo ACSR e ao tubo de alumínio. A partir destes valores foram calculados seus respectivos fatores de superfície experimental (m) para uma densidade relativa do ar de 0,95.

Em princípio seria de esperar que o fator de superfície do tubo fosse semelhante ao do cabo AERO_Z, por se tratar de uma superfície lisa. Porém o tubo de alumínio utilizado tem uma superfície desgastada, por ter sido submetido a utilização no dia a dia de ensaios no laboratório, não estando mais numa condição lisa e polida.

Finalmente foram testados os mesmos cabos AERO_Z e ACSR, porém com suas superfícies arranhadas e riscadas simulando um lançamento de cabos na LT realizado sem os devidos cuidados, Figuras 7 e 8.



Figura 7 – Cabo AERO_Z



Figura 8 – Cabo ACSR

Como era esperado os testes mostraram que o valor de início de corona diminui para 13,1 kV/cm ($m = 0,51$) no cabo AERO_Z e para 13,4 kV/cm ($m = 0,52$) no cabo ACSR. Essa diferença era esperada uma vez que numa superfície lisa qualquer arranhão representa uma imperfeição proporcionalmente maior que numa superfície ondulada, como é o caso do cabo encordoado.

6.2 Análise dos resultados

A modelagem desenvolvida identificou um fator de 0,88 como a parcela do fator de superfície devida ao encordoamento. Este valor permaneceu praticamente constante variando a bitola dos cabos simulados.

A este fator deve ser agregado um segundo termo, responsável pelas condições de danos e contaminação superficial dos cabos. Pelos ensaios realizados, essa segunda parcela reduz o fator de superfície para uma faixa de 0,75 a 0,80. Por se tratar de ensaio em cabos novos, seria de esperar um fator de superfície mais elevado, porém deve-se registrar que os cabos foram ensaiados numa condição natural, sem tratamento ou limpeza superficial especial, como é usual ocorrer em ensaios de aceitação em alta tensão.

Verificou-se nos ensaios que um tratamento inadequado dos cabos, provocando arranhões e amassados, compatível com o que se observa no campo em LTs cujos cabos foram lançados sem o cuidado devido, reduz drasticamente o fator de superfície, atingindo-se valores até 0,5.

7.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia que permitiu calcular a parcela do fator de superfície, utilizada para determinar o limiar de corona de condutores, devida ao encordoamento dos cabos convencionais. O valor encontrado ficou em torno de 0,88 para toda a faixa de bitolas estudadas.

A partir deste fator de superfície básico verificou-se, nos ensaios em gaiola, uma redução adicional de cerca de 10%, por conta das condições superficiais dos cabos.

Um trabalho similar [10] identificou o efeito do encordoamento similar ao deste IT, porém variando com o diâmetro. Atribui-se essa diferença a uma combinação do método de cálculo utilizado por esses autores, consistindo numa formulação analítica aplicada a uma arranjo coaxial, com o critério de início de corona, que utiliza o valor do campo numa região próxima à superfície do condutor onde ocorre a ionização. A combinação desses fatores faz com a distribuição de campo seja mais sensível ao diâmetro dos cabos que o arranjo utilizado neste IT (condutor acima do solo).

Foram realizados ensaios para determinação do gradiente de início de corona e correspondente fator de superfície de: cabo AERO_Z, ACSR convencional e tubo de alumínio. O cabo AERO_Z apresentou um fator de superfície superior ao do cabo convencional, como se esperava, porém, no caso de qualquer dano superficial a degradação de seu fator de superfície é mais significativa que a do cabo convencional. Este efeito era esperado uma vez que uma mesma imperfeição é mais significativa numa superfície lisa do que numa superfície ondulada. Esta observação reforça a necessidade de cuidados especiais no manuseio e lançamento de cabos compactos, do tipo AERO_Z.

Pelos estudos e ensaios realizados, o fator de superfície que vem sendo utilizado em diversos projetos ($m=0,82$) é relativamente otimista, correspondendo a um condutor com superfície limpa e intacta, sem qualquer arranhão ou amassado. Um valor mais aderente ao verificado nos ensaios seria ($m=0,75$ a $m=0,8$).

No caso de descuido no transporte, armazenagem ou lançamento essa fator cai significativamente, podendo ser tão baixo quanto $m \approx 0,5$.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/ Second Edition, EPRI, 1982.
- (2) Peek, F., “Determination Phenomena in High Voltage Engineering”, McGraw-Hill, New York, pp. 52-80, 1929.
- (3) Gary, C., Moreau, M., “Léffect de Couronne em Tension Alternative, Editeur Paris, 1978.
- (4) Domingues, L. A. M. C., Fernandes, C., Barbosa, C. R. N., Dart, F. C., “Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas”, Relatório Técnico CEPEL, 1995.
- (5) IEEE Corona and field effects subcommittee Report Radio Noise Working Group, “A Survey of methods for calculating transmission line conductor surface voltage gradients”, IEE PES Winter Meeting, New York, NY, February 4-9, 1979.
- (6) Harrington, R. F., “Field Computation by Moment Methods”, The Macmillan Company, New York, 1968.
- (7) França, A. M., Yamaguti K., Domingues, L. A. M. C., “Estudo Sobre Efeitos dos Campos Eletrostáticos”, Relatório Técnico CEPEL, 1980.
- (8) Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/ Second Edition, EPRI, 1982.
- (9) “Coletânea de Normas Linha de Transmissão”, NBR – 5422/1985.
- (10) “Application of a Corona Onset Criterion to Calculation of Corona Onset Voltage of Stranded Conductors”, K. Yamazaki, R. Olsen, IEEE Transactions of Dielectrics and Electric Insulation, Vol 11, N 4, August 2004.