



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

GSC - 10
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**AValiação DO NÚMERO DE INTERRUPÇÕES EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO DEVIDO A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS INDIRECTAS**

Alexandre Piantini*

Instituto de Eletrotécnica e Energia / USP

Jorge M. Janiszewski

PTC - Escola Politécnica / USP

RESUMO

Este trabalho apresenta inicialmente o modelo desenvolvido pelos autores para determinação das tensões induzidas em linhas aéreas devido à incidência de descargas atmosféricas em suas proximidades. O modelo, denominado "Extended Rusck Model" (ERM), permite a avaliação das tensões considerando situações realistas, como linhas com comprimento finito, a presença de condutores multiaterrados e de equipamentos como transformadores, pára-raios, etc. As comparações apresentadas mostram um aumento significativo no grau de concordância entre tensões medidas e calculadas em relação a resultados obtidos através de outros modelos. Em seguida são apresentadas comparações envolvendo cálculos e dados de campo relativos à correlação entre amplitudes e frequência de ocorrência de tensões induzidas por descargas indiretas em uma linha de média tensão com 10 km de comprimento, ao longo de um período de dois anos. Finalmente, são apresentados gráficos ilustrando a eficácia da utilização de cabos guarda e de pára-raios em termos de redução do número médio anual de interrupções.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas atmosféricas, tensões induzidas, linhas aéreas, transitórios eletromagnéticos, distribuição.

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente preocupação das concessionárias com a qualidade da energia tem tornado cada vez mais evidente a necessidade de se identificar as causas de perturbações nos sistemas elétricos e de se estudar a eficiência das técnicas a serem adotadas tendo em vista a minimização do problema. Essa situação decorre principalmente da utilização cada vez maior de equipamentos sensíveis a interferências e interrupções de curta duração. Como consequência tem-se buscado obter, cada vez mais, uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na questão e a determinação de soluções técnica e economicamente viáveis, que proporcionem uma melhoria efetiva da qualidade da energia fornecida. Neste contexto aparecem com especial destaque as descargas atmosféricas, normalmente apontadas como responsáveis pela maior parte das interrupções não programadas das linhas de distribuição, mesmo em regiões com níveis cerâmicos moderados.

Este trabalho trata da questão referente aos distúrbios provocados em redes aéreas de distribuição devido à ocorrência de descargas atmosféricas em suas proximidades (descargas indiretas). Tal fenômeno responde por uma parcela significativa do número de interrupções de fornecimento de energia, sobretudo em regiões com elevada densidade de descargas para terra. Embora as sobretensões decorrentes da incidência de descargas diretas atinjam amplitudes superiores, as tensões induzidas por descargas indiretas representam normalmente um problema maior, em virtude da sua alta frequência de ocorrência. Por essa razão são consideradas as principais

*Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289, CEP 05508-010 - São Paulo - SP - BRASIL
Tel.: (11) 3091-2580 - Fax: (11) 3812-9251 - E-mail: piantini@iee.usp.br

responsáveis pelas interrupções sofridas por linhas de classe igual ou inferior a 15 kV. A complexidade do mecanismo de indução das tensões no caso de descargas indiretas é consideravelmente maior que no caso de descargas diretas e essa é, sem sombra de dúvida, uma das razões para a existência, ainda hoje, de diferentes métodos de cálculo de tensões induzidas (1)-(10). Tais métodos conduzem a resultados amplamente divergentes mesmo em situações simples, como o caso de uma linha monofásica infinita desprovida de equipamentos como pára-raios ou transformadores. Algumas dessas teorias são analisadas em (11) onde se mostra que, ao contrário dos modelos de Chowdhuri (4) e de Liew-Mar (5), o modelo de Rusck (6) conduz a resultados coerentes, que podem ser justificados através da análise dos campos eletromagnéticos associados à descarga atmosférica. Entretanto, em sua formulação original (6), o campo elétrico é assumido constante na região compreendida entre os condutores da linha e o solo e tanto o canal da descarga quanto a linha são assumidos de comprimento infinito. Além disso, nem a incidência de descargas em estruturas metálicas próximas à linha e tampouco a ocorrência do líder ascendente podem ser levadas em consideração. Tais restrições, que limitam sobremaneira a aplicação do modelo, motivaram um esforço para aprimorá-lo, de modo que um novo modelo, denominado "Extended Rusck Model" (ERM), foi proposto em (10), (12).

O ERM tem por base a teoria de Rusck, porém as modificações introduzidas na formulação original permitem levar em consideração os comprimentos finitos da linha e do canal da descarga atmosférica, bem como o caso de descargas em estruturas metálicas nas proximidades da linha e o efeito do líder ascendente. Ao contrário do modelo original, a linha não precisa ser retilínea e o efeito de condutores multiterrados (neutro ou cabo guarda) pode ser levado em conta, assim como a presença de equipamentos como transformadores e pára-raios. São apresentadas em seguida algumas das centenas de comparações efetuadas com tensões obtidas experimentalmente que comprovam a validade do ERM, as quais mostram um aumento significativo no grau de concordância entre os resultados de medição e de cálculo em relação a outros modelos comumente utilizados para a determinação das tensões induzidas. Tais resultados asseguram a confiança necessária para a utilização e aplicação do modelo em situações de interesse prático, como a avaliação do número médio anual de interrupções causadas por descargas indiretas em linhas com diferentes configurações.

2.0 - VALIDAÇÃO DO MODELO ERM

O cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas devido a descargas indiretas baseia-se na determinação dos potenciais elétrico e magnético associados, respectivamente, às cargas e à corrente no canal da descarga. O potencial escalar indutor, relacionado às cargas, age como uma fonte distribuída e é responsável pelas ondas que se propagam ao longo da linha, originando um dos componentes da tensão induzida. O outro se deve ao potencial magnético, cuja derivada em relação ao tempo se soma ao componente anterior para gerar a tensão induzida em cada ponto da linha. No caso de descargas diretas em estruturas metálicas, a descarga de retorno ("return stroke") se inicia no topo da estrutura. As correntes na estrutura e no canal apresentam mesma amplitude e polaridade, porém diferentes velocidades e sentidos de propagação. Na estrutura a corrente se propaga com velocidade muito próxima à da luz no vácuo, enquanto que no canal a velocidade fica em geral na faixa de 10 % a 60 % desse valor. O procedimento desenvolvido para determinação da tensão induzida em uma linha próxima a uma estrutura metálica atingida por uma descarga é apresentado em (10). A ocorrência de um "leader" ascendente, que pode ser iniciado quando o leader descendente ("stepped leader") se aproxima do solo, pode ser considerada de maneira análoga (12), (13). Nesse caso as cargas nos dois canais têm polaridades opostas, enquanto que as correntes apresentam mesmas amplitudes, polaridades e velocidades de propagação. Verifica-se que, em geral, a ocorrência do "leader" ascendente acarreta uma redução da amplitude da tensão induzida, sendo essa redução tanto maior quanto maior for o comprimento do canal do "leader" ascendente (12), (13), (14).

A comprovação da validade do ERM se deu através de centenas de comparações entre resultados teóricos e experimentais obtidos por meio de pesquisas em modelo reduzido e em escala real. Ressalta-se que o ERM e o modelo de Agrawal et al (9) conduzem aos mesmos resultados quando o canal da descarga é perpendicular ao solo. Assim, como era de se esperar, as tensões induzidas previstas pelo modelo de Agrawal et al apresentaram boa concordância com os resultados obtidos através do modelo em escala reduzida desenvolvido em pesquisa realizada na Universidade de São Paulo (15). São apresentadas a seguir algumas comparações envolvendo medições de tensões induzidas por descargas naturais obtidas por Yokoyama et al (2), (3). As tensões foram medidas em uma linha de 820 m de comprimento (1), tendo sido induzidas por descargas que atingiram uma torre de 200 m de altura situada a 200 m de distância da linha. Conversores eletro-ópticos foram utilizados para transmissão das tensões obtidas via fibra óptica e, segundo (1), em função das características desses conversores as formas de onda registradas apresentaram decaimentos mais acentuados (tempos de cauda mais curtos) que os das formas de onda reais. Como a velocidade de propagação da corrente e o comprimento do canal não foram determinados, nas simulações foram assumidos os valores típicos de 30 % da velocidade da luz no vácuo e 3 km, respectivamente.

A primeira comparação, apresentada na Figura 1, refere-se ao Caso 86-03 (3), enquanto que a Figura 2 mostra os resultados relativos ao Caso 81-02 (2). Em ambas as figuras são apresentadas, além das tensões medidas, as tensões calculadas de acordo com os modelos de Chowdhuri (4), Liew-Mar (5), Rusck (6) e pelo ERM (10).

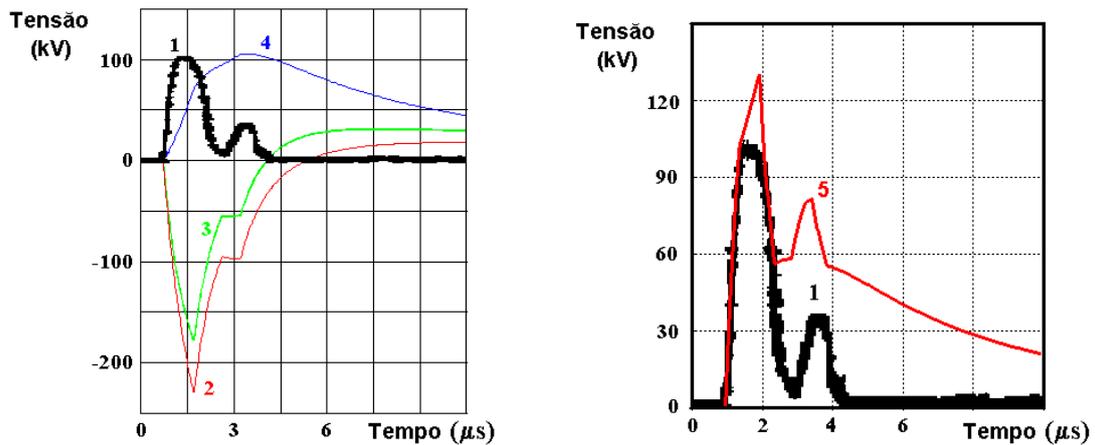


FIGURA 1 - Tensões induzidas medida e calculadas - Caso 86-03 (3).

1) Medição (3) 2) Cálculo (4) 3) Cálculo (5) 4) Cálculo (6) 5) Cálculo ERM (10)

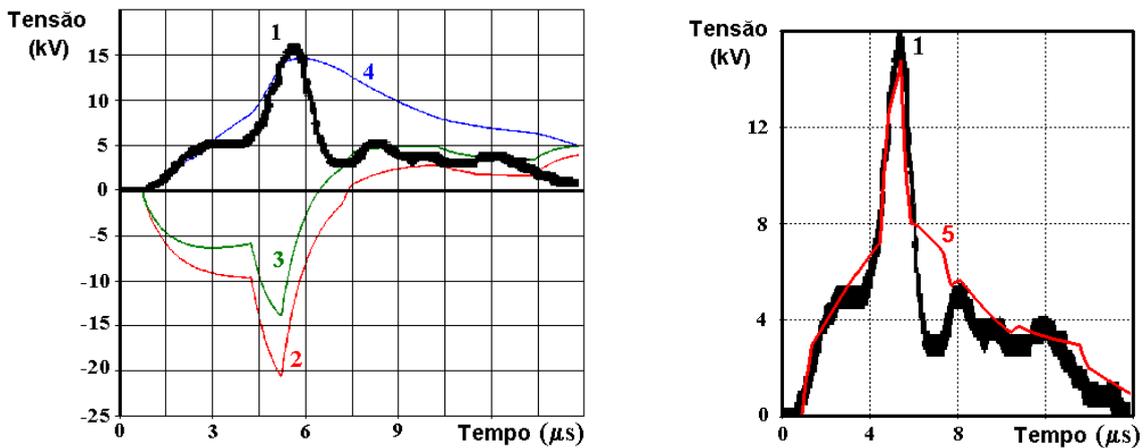


FIGURA 2 - Tensões induzidas medida e calculadas - Caso 81-02 (2).

1) Medição (3) 2) Cálculo (4) 3) Cálculo (5) 4) Cálculo (6) 5) Cálculo ERM (10)

Com base nas figuras 1 e 2 nota-se que, tanto em termos de amplitude como de polaridade, as tensões calculadas de acordo com os métodos propostos em (4) e (5) diferem substancialmente das tensões medidas. Os valores de crista previstos pelo modelo de Rusck (6) são relativamente próximos aos valores medidos, embora diferenças apreciáveis possam ser observadas tanto nas frentes como nas caudas das ondas, em especial na Fig. 1. Por outro lado, quando as tensões são calculadas através do ERM (10) e os efeitos da torre, da topologia da linha e dos comprimentos finitos desta e do canal da descarga são levados em consideração, obtém-se, em ambos os casos, um grau de concordância consideravelmente superior. Várias outras comparações realizadas em linhas com diferentes configurações confirmaram esses resultados, atestando a validade do ERM.

3.0 - NÚMERO MÉDIO ANUAL DE INTERRUPÇÕES CAUSADAS POR DESCARGAS INDIRETAS

A definição da alternativa mais adequada de proteção tendo em vista a melhoria do desempenho de uma determinada linha frente a descargas atmosféricas requer o conhecimento dos números médios anuais de interrupções de fornecimento de energia ao qual ela estaria sujeita, considerando cada uma das possíveis configurações. Assim, uma vez validado o modelo para cálculo das tensões induzidas por descargas próximas à linha, a etapa seguinte corresponde à determinação do número médio anual de vezes em que tais tensões atingirão amplitudes superiores àquela necessária para provocar uma descarga disruptiva na linha. Admite-se, neste trabalho, que ocorrerá uma interrupção sempre que a tensão ultrapassar o nível básico de isolamento (NBI) da linha.

3.1 Metodologia

Devido à grande quantidade de parâmetros com influência significativa nas tensões induzidas e ao elevado número de possíveis combinações entre os mesmos, algumas simplificações se fazem necessárias para avaliação do desempenho da linha frente a descargas indiretas. Inicialmente, assume-se que cada descarga atmosférica consiste em um evento composto por duas descargas, a primeira e a subsequente. A forma de onda da corrente foi admitida como triangular com tempo até o meio valor, na cauda, igual a 50 μ s, e o canal foi considerado com comprimento de 3 km. As amplitudes das correntes associadas à primeira descarga (I) variaram na faixa de 2 kA a 200 kA, com passo de aproximadamente 1,5 kA, sendo utilizada a expressão (1) para definir a probabilidade $P(I)$ de que um determinado valor de corrente seja excedido (16):

$$P(I) = \frac{100\%}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (1).$$

Por sua vez, as amplitudes das correntes relacionadas às descargas subseqüentes assumiram valores correspondentes a 40 % de I , com limite superior igual a 30 kA. As faixas de variação das velocidades de propagação das ondas de corrente ao longo do canal foram, respectivamente, de 10 % a 50 % e de 20 % a 70% da velocidade da luz no vácuo para as primeiras e para as descargas subseqüentes. Para cada evento o tempo até a crista (t_f) foi determinado através da relação entre a amplitude da corrente e a sua taxa de subida. Tanto para as primeiras como para as descargas subseqüentes os valores considerados para as taxas de subida foram aqueles com 5 % de probabilidade de serem excedidos (TV5%), segundo os dados publicados em (16). Como esse critério conduz a resultados conservativos, algumas simulações foram realizadas considerando-se a taxa de variação média (TVm). O solo foi admitido como condutor perfeito, hipótese que pode, em certas circunstâncias, acarretar tensões induzidas com amplitudes inferiores àquelas correspondentes a solos com condutividade finita (7). Em seguida são calculadas, para cada evento, as distâncias limite correspondentes à primeira e à descarga subsequente, sendo a maior delas definida como a distância limite do evento. Esse parâmetro corresponde à distância para a qual a amplitude da tensão induzida se torna igual à da tensão que provoca descarga disruptiva na linha (Udisrup), e significa que, se a descarga atinge um ponto a uma distância em relação à linha inferior a esta, a tensão induzida assumirá amplitude superior a Udisrup. A cada evento também está associada uma distância crítica (d_c) de modo que, se a distância prospectiva entre a linha e o ponto que seria atingido pela descarga, na sua ausência, for inferior a d_c , então o "leader" descendente será atraído pela linha, ocorrendo uma descarga direta. Considerando a altura dos condutores (h) em metros, a distância crítica (em metros) é obtida através da expressão (2), correspondente ao raio médio de atração proposto por Eriksson (17):

$$d_c = 14 \cdot h^{0.6} \quad (2).$$

3.2 Resultados e Análise

A Figura 3 apresenta os gráficos relativos ao número médio anual de interrupções decorrentes de descargas atmosféricas indiretas (NIDI) para linhas sem proteção (sem neutro, cabo guarda ou pára-raios) com 10 m de altura e tensão disruptiva Udisrup na faixa de 50 kV a 300 kV considerando, para as correntes do primeiro e dos "strokes" subseqüentes, os tempos de frente determinados a partir das taxas de variação TVm e TV5%. Juntamente com os resultados de cálculo são também apresentados, para fins de comparação, os dados publicados em (18) (normalizados para $N_g = 10$ descargas/(km².ano) e 100 km de linha), correlacionando amplitudes de tensões induzidas com frequências de ocorrência. Tais medições de tensão foram realizadas em uma estação situada a uma distância de aproximadamente 4 km de uma das extremidades de uma linha de distribuição rural, desenergizada, com aproximadamente 8 m de altura (em (18), contudo, os dados apresentados estão referidos à altura de 10 m) e 10 km de comprimento, na África do Sul. Uma das extremidades da linha (a mais próxima do local de medição) foi terminada através de um curto-circuito, ao passo que a outra permaneceu em aberto. Ao longo de dois anos com a linha nessas condições foram obtidos 279 registros de surtos, sendo 258 relativos a descargas indiretas e 21 referentes a descargas diretas. Apesar das diferenças entre as condições experimentais e de simulação, os dados obtidos na pesquisa sul-africana permitem uma avaliação qualitativa da metodologia apresentada neste trabalho.

Observa-se que a variação de NIDI em função da tensão disruptiva é bastante acentuada, independentemente dos critérios utilizados para determinação dos tempos de frente das correntes das descargas. Nota-se, por exemplo, que quando os tempos de frente são obtidos a partir da taxa de variação média TVm, a redução de NIDI é de aproximadamente 72:1 quando Udisrup aumenta de 100 kV para 175 kV. Por esses critérios, verifica-se ainda que se Udisrup for igual a 200 kV a linha sofrerá em média (para cada 100 km) aproximadamente uma interrupção a cada 11,1 anos devido a descargas indiretas (considerando $N_g = 10$ descargas / (km². ano)). A título de comparação, o número médio anual de interrupções devido a descargas diretas, para esse caso, é de aproximadamente 112 para cada 100 km de linha, admitindo-se esta situada em região rural. Para linhas construídas em regiões urbanas esse número é menor em função da blindagem proporcionada por estruturas e edificações situadas nas suas vizinhanças. Esses objetos atraem para si algumas descargas que, na sua

ausência, incidiriam diretamente na linha, deixando-a dessa forma menos exposta às descargas diretas. Pela mesma razão, a proporção entre os números de interrupções decorrentes de descargas indiretas e de descargas diretas tende a ser maior em regiões urbanas que em regiões rurais.

Quando os tempos de frente são calculados a partir da taxa de variação TV5%, nota-se um crescimento significativo de NIDI, uma vez que esse critério, mais conservativo, conduz a tensões induzidas com amplitudes mais elevadas. A redução de NIDI é de aproximadamente 159:32 quando Udisrup passa de 100 kV para 175 kV. O número de interrupções causadas por descargas diretas permanece inalterado. Admitindo-se que o valor de Udisrup seja igual àquele correspondente ao nível básico de isolamento (NBI), verifica-se então que, no caso de linhas de classe 15 kV (NBI igual a 95 kV ou 110 kV), as descargas indiretas representam, em termos de número de interrupções, um problema maior que as descargas diretas, fato também verificado a partir dos dados apresentados em (18).

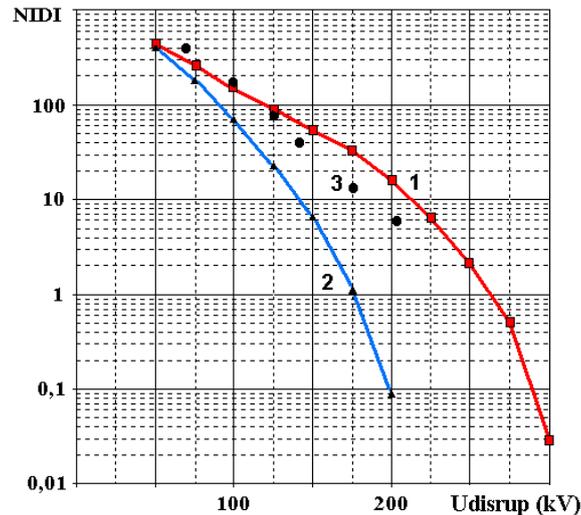


FIGURA 3 - Número médio anual de interrupções, por 100 km de linha, devido a descargas indiretas (NIDI), em função da tensão disruptiva Udisrup. Linha sem proteção; $N_g = 10$ descargas / (km² . ano); $h = 10$ m.

1) Taxa de variação: TV5% 2) Taxa de variação: TVm 3) Dados de campo (18)

Lembrando que NIDI pode ser entendido como o número de vezes em que a tensão induzida atinge amplitude superior ao valor indicado na abscissa, verifica-se, através da Figura 3, que as tensões medidas na linha sul-africana apresentaram amplitudes superiores àquelas calculadas com base na taxa de variação TVm para as correntes. A linha encontrava-se em uma região relativamente plana e com pouca vegetação. Na realidade, ao longo de um certo trecho da linha, a uma distância de aproximadamente 20 m, havia uma linha telefônica com 5 m de altura (18). Tal linha provocava uma certa blindagem, atraindo para si algumas descargas que, na sua ausência, incidiriam na linha de distribuição; como conseqüência, o número de tensões induzidas com amplitudes mais elevadas, nesta última, tenderia a aumentar um pouco. Por outro lado, os valores medidos permaneceram em geral inferiores (ou muito próximos) aos calculados quando os tempos de frente das correntes foram determinados a partir da taxa de variação TV5% (critério mais conservativo).

De qualquer modo, deve-se ressaltar que essas comparações devem ser feitas sob o aspecto qualitativo, observando-se que tanto nas medições como nos cálculos verifica-se a mesma tendência de variação de NIDI em função da tensão disruptiva Udisrup. O principal obstáculo para a realização de comparações quantitativas é o tempo relativamente curto de medições (dois anos), uma vez que os cálculos referentes aos números de interrupções decorrentes de descargas diretas e indiretas correspondem a valores médios ao longo de um período de tempo relativamente longo. Os seguintes fatores também devem ser considerados quando das comparações entre valores medidos e calculados:

- a linha sul-africana encontrava-se com uma das extremidades em aberto e com a outra em curto-circuito; dependendo do tempo de frente da corrente e da posição relativa entre o ponto de incidência da descarga e a linha, o efeito das extremidades pode ter provocado aumento ou redução da amplitude da tensão em relação ao caso de linha longa (situação analisada nas simulações);
- as expressões utilizadas nas simulações para os cálculos das probabilidades de frequência cumulativa, das taxas de variação e das velocidades de propagação das correntes são baseadas em um número limitado de dados; pesquisas visando a obtenção de um número maior de dados e de informações continuam a ser desenvolvidas em diversos países;

- os erros de medição das tensões foram da ordem de 8 % a 10 % (19). Como as variações de NIDI em função do NBI são significativas, erros sistemáticos dessa ordem podem conduzir a erros muito maiores em NIDI, principalmente no caso de tensões mais elevadas;
- as tensões foram medidas em um ponto fixo da linha, enquanto que nas simulações os cálculos foram efetuados sempre no ponto mais próximo ao local de incidência da descarga (onde a tensão induzida atinge sua máxima amplitude), partindo-se do pressuposto de que, se o valor da tensão disruptiva da linha for o mesmo em todos os pontos, então haverá uma interrupção sempre que em um deles esse valor for ultrapassado;
- nas simulações o solo foi admitido como um plano condutor perfeito. Em (6) Rusck afirma que essa suposição é conservativa, uma vez que as perdas decorrentes da resistividade não nula do solo tenderiam a reduzir os campos e, por conseguinte, as tensões induzidas. Em estudos mais recentes (7), (8), (20), contudo, tem-se verificado que a componente horizontal do campo elétrico pode ocasionar, sob determinadas condições, tensões induzidas com amplitudes mais elevadas no caso de solos de altas resistividades.

Apesar das dificuldades envolvendo a comparação dos resultados, destaca-se que a pesquisa sul-africana, que teve ainda outros desdobramentos, se constitui em um dos trabalhos experimentais mais relevantes já realizados nessa área.

No caso de uma linha com desempenho insatisfatório frente a descargas atmosféricas, a decisão sobre o método mais adequado a ser utilizado tendo em vista a melhoria desse desempenho deve, em princípio, ser feita com base nas relações custo / benefício das diversas alternativas. Por sua vez, os benefícios associados a cada opção estão relacionados à redução do número de interrupções e à conseqüente melhoria da qualidade da energia que serão obtidas quando da sua aplicação. Diversos fatores afetam as tensões induzidas por descargas indiretas, como a altura dos condutores, a presença do condutor neutro, transformadores, cabo guarda e pára-raios. A altura do condutor neutro (e do cabo guarda) e a característica dos pára-raios também influenciam os resultados, bem como os valores das resistências de terra (Rat) e as distâncias entre os pontos de aterramento (xat). A título de ilustração, a Figura 4 apresenta os resultados (NIDI em função de Udisrup) correspondentes a linhas com as seguintes configurações:

- 1) linha sem proteção;
- 2) linha com cabo guarda (posicionado à altura $h_g = 9$ m, com $R_{at} = 200 \Omega$ e $x_{at} = 450$ m);
- 3) linha com pára-raios (ZnO, sem centelhador) nas três fases ($R_{at} = 200 \Omega$ e $x_{at} = 450$ m).

As linhas consideradas são mais representativas de redes rurais, caracterizadas por distâncias relativamente longas entre transformadores. Assim, considera-se, nas simulações, que a distância entre o ponto onde se calcula a tensão e o transformador mais próximo é muito grande, de modo que os efeitos da presença desses equipamentos na linha só são sentidos após a tensão ter atingido o seu valor de crista. Em todos os casos considerou-se altura das fases $h = 10$ m e ausência de transformadores e do condutor neutro. Nas configurações (2) e (3) o valor da indutância do condutor de descida (para o aterramento do cabo guarda e dos pára-raios) foi de $22 \mu\text{H}$ e as simulações consideraram, em termos de posição relativa entre o ponto de incidência da descarga e a linha, a situação mais crítica em termos de amplitudes das tensões induzidas, ou seja, descarga equidistante a dois pontos de aterramento. Tal procedimento conduz a resultados conservativos.

Nota-se que tanto a utilização do cabo guarda (ainda que à altura de 9 m, inferior à dos condutores fase) quanto o emprego de pára-raios levam a uma melhoria no desempenho da linha frente a descargas indiretas. A diferença relativa entre os desempenhos das linhas (relação entre os valores de NIDI correspondentes a cada alternativa) tende a crescer com o aumento do valor da tensão disruptiva Udis. Verifica-se, por exemplo, que a relação entre os valores de NIDI referentes às linhas sem proteção e com cabo guarda (configurações 1 e 2, respectivamente) para o caso de $U_{disrup} = 100$ kV, é de 1,3:1, ou seja, o número médio anual de vezes em que as tensões induzidas atingem valores superiores a 100 kV é 30 % maior na linha sem proteção. Em outras palavras, ao se introduzir o cabo guarda na linha, o número de sobretensões superiores a 100 kV diminui para aproximadamente 80 % daquele correspondente à linha sem proteção (redução de 20 %). Quando a comparação é feita para $U_{disrup} = 200$ kV a relação entre os valores de NIDI é de 3,8:1, ou seja, o número de sobretensões na linha com cabo guarda é de aproximadamente 26 % daquele relativo à linha sem proteção (redução de 74 %).

Por sua vez, a instalação de pára-raios nas três fases acarreta uma diminuição ainda mais significativa do número de sobretensões induzidas na linha. No caso de $U_{disrup} = 100$ kV, a redução é de aproximadamente 40 % em relação à linha sem proteção e de 27 % em relação à linha com cabo guarda. O efeito dos pára raios é ainda mais expressivo para $U_{disrup} = 200$ kV; nesse caso as reduções do número de sobretensões atingem valores em torno de 90 % e 50 % em relação às linhas sem proteção e com cabo guarda, respectivamente. Para o caso de tensão disruptiva da linha superior a 250 kV, a instalação de pára-raios nas condições consideradas virtualmente elimina as sobretensões decorrentes de descargas indiretas.

É importante ressaltar que os números apresentados são conservativos e se aplicam exclusivamente às situações específicas analisadas. Conforme mencionado anteriormente, a distância entre os pontos de aterramento e o valor da resistência de terra, por exemplo, são parâmetros muito importantes e que afetam consideravelmente o desempenho da linha.

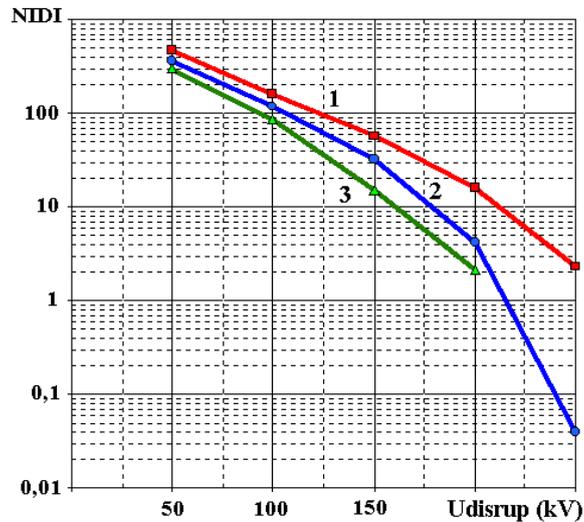


FIGURA 4 - Número médio anual de interrupções, por 100 km de linha, devido a descargas indiretas (NIDI), em função da tensão disruptiva U_{disrup} . $N_g = 10$ descargas / (km² . ano); $h = 10$ m; taxa de variação: TV5%; distância entre pontos de aterramento: 450 m; resistência de terra: 200 Ω .

1) Linha sem proteção 2) Linha com cabo guarda ($h_g = 9$ m) 3) Linha com pára-raios (ZnO) nas três fases

4.0 - CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar aplicação da metodologia desenvolvida para análise das diferentes alternativas existentes para melhoria do desempenho de linhas aéreas frente a descargas atmosféricas. Não se pretendeu aqui realizar uma análise extensiva, mas mostrar a aplicação prática da ferramenta desenvolvida. Embora a ênfase tenha sido voltada às redes de distribuição, onde o problema se faz sentir muito mais intensamente, o procedimento, que se baseia em modelo teórico validado a partir de resultados experimentais, é também aplicável às linhas de transmissão. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a metodologia desenvolvida possibilita a realização de comparações entre os benefícios - em termos de redução do número de interrupções - decorrentes da utilização de diferentes alternativas de proteção contra sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas, constituindo-se em uma ferramenta bastante útil para análise do problema.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) YOKOYAMA, S., MIYAKE, K., MITANI, H., YAMAZAKI, N. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 1, no. 2, pp. 129-139, Apr. 1986.
- (2) YOKOYAMA, S., MIYAKE, K., MITANI, H., TAKANISHI, A. Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102, no. 8, pp. 2420-2427, Aug. 1983.
- (3) YOKOYAMA, S., MIYAKE, K., FUKUI, S. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines (II), IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, no. 4, pp. 2196-203, Oct. 1989.
- (4) CHOWDHURI, P. Response of overhead lines of finite length to nearby lightning strokes, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, no. 1, pp. 343-351, Jan. 1991.
- (5) LIEW, A. C., MAR, S. C., Extension of the Chowdhuri - Gross model for lightning induced voltage on overhead lines, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 1, no. 2, pp. 240-247, Apr. 1986.
- (6) RUSCK, S. Induced lightning over-voltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks, Trans. of the Royal Institute of Technology, no. 120, pp. 1-118, 1958.
- (7) NUCCI, C. A., RACHIDI, F. Lightning-induced overvoltages. IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session "Distribution Lightning Protection", New Orleans, April 1999.
- (8) ISHII, K., MICHISHITA, K., HONGO, Y., OGUME, S. Lightning-induced voltage on an overhead wire dependent on ground conductivity, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 109-118, Jan. 1994.

- (9) AGRAWAL, A. K., PRICE, H. J., GURBAXANI, S. H. Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-22, no. 2, pp. 119-129, May 1980.
- (10) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 2799-2802, Sep. 1998.
- (11) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., Analysis of three different theories for computation of induced voltages on distribution lines due to nearby lightning, in Proc. of the International Conference on Electricity Distribution, pp. Session 1 / 127-132, Buenos Aires, Dec. 1996.
- (12) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines, in Proc. of the VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 151-155, Curitiba, Nov. 2003.
- (13) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., The influence of the upward leader on lightning induced voltages, in Proc. of the 23rd International Conference on Lightning Protection, vol. 1, pp. 352-357, Florence, Sep. 1996.
- (14) PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., An improved model for lightning induced voltages calculations, in Proc. of the IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. São Paulo, Nov. 2004.
- (15) NUCCI, C. A., BORGHETTI, A., PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., Lightning-induced voltages on distribution overhead lines: Comparison between experimental results from a reduced-scale model and most recent approaches, in Proc. of the 24th Int. Conf. on Lightning Protection, pp. 314-320, Birmingham, Sep. 1998.
- (16) ANDERSON, R. B., ERIKSSON, A. J., A Summary of lightning parameters for engineering applications, in CIGRÉ: International Conference on Large High Voltage Electrical Systems, Paris, Aug. 1980. (WG 33-01).
- (17) ERIKSSON, A. J. The Incidence of lightning strokes to power lines, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 2, n. 3, p. 859-870, July 1987.
- (18) GELDENHUYS, H. J., GAUNT, C. T. Insulation co-ordination of rural distribution lines, in Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2., Belo Horizonte, 1990.
- (19) ERIKSSON, A. J., STRINGFELLOW, M. F. /DISCUSSION/ Lightning - induced overvoltages on overhead distribution lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 101, n. 4, p. 960-968, Apr. 1982.
- (20) MICHISHITA, K., ISHII, M., IMAI, Y. Lightning-induced voltage on multiconductor distribution line influenced by ground conductivity, in Proc. of the 23rd Int. Conf. on Lightning Protection, v. 1, pp. 304-309, Florence, Sep. 1996.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alexandre Piantini nasceu em Londrina - PR em 10/08/1963. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 1985 e obteve os graus de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1991 e em 1997, respectivamente.

Integrou-se à Universidade de São Paulo em 1986 como pesquisador do Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia, sendo atualmente professor do Programa de Pós-Graduação em Energia da USP, onde atua como coordenador da linha de pesquisa "Redes Elétricas, Equipamentos e Qualidade de Energia" e do Grupo de Alta Tensão / Descargas Atmosféricas (GATDA/USP). É "*Senior Member*" do IEEE desde 2004 e autor ou co-autor de mais de 40 artigos científicos apresentados em conferências internacionais ou publicados em revistas indexadas.



Jorge M. Janiszewski graduou-se em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) em 1963. Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia na EPUSP em 1970 e em 1978, respectivamente.

Atua na Escola de Engenharia Mauá como Professor Titular. Como Professor Livre Docente na EPUSP, ministra aulas e participa de projetos de pesquisa. Suas áreas de interesse incluem simulações computacionais de campos eletromagnéticos e fenômenos relacionados a descargas atmosféricas. Tem participado de várias conferências e publicado trabalhos na área de Eletromagnetismo Aplicado.