

Efeito do cabo de blindagem no desempenho de linhas de distribuição frente às descargas atmosféricas

P.E. Munhoz Rojas – LACTEC e Roberto Lang - FORCEL.

Resumo - Este trabalho apresenta os resultados do projeto ANEEL destinado a avaliar a melhoria introduzida no desempenho de linhas de distribuição de 13,8 kV frente às descargas atmosféricas mediante a utilização de um cabo de blindagem.

A principal conclusão deste trabalho é de que a utilização de um cabo de blindagem de fato contribui para a melhoria de desempenho de uma linha de distribuição frente às descargas atmosféricas através de dois processos:

1) Mediante a redução da tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas, entre os cabos de fase e a terra de referência local da isolação, devido ao acoplamento tanto indutivo quanto capacitivo entre o cabo de blindagem e os cabos de fase.

2) Quando o cabo suplementar é ligado ao aterramento de hastes colocadas em estruturas críticas do ponto de vista das descargas atmosféricas diretas, de modo a fornecer uma blindagem contra descargas diretas aos equipamentos localizados nas mesmas, o cabo suplementar contribui para diminuir a corrente injetada nos equipamentos e a conseguinte sobrecarga que provocaria a danificação dos mesmos.

Palavras-chave — Descargas atmosféricas, Desempenho de linhas de distribuição, Cabos de blindagem.

I. INTRODUÇÃO

O desempenho de um sistema de distribuição é medido pelos índices de continuidade e de qualidade da energia fornecida. Dentre os fatores que afetam o desempenho de um sistema de distribuição, o efeito dos curtos-circuitos produzidos como decorrência das descargas atmosféricas é, normalmente, o fator preponderante para sistemas aéreos.

Este tipo de faltas provoca desligamentos do alimentador atingido que geralmente causam interrupções, as quais, dependendo de sua duração, afetam os índices de continuidade ou de qualidade; provocam também afundamentos de tensão nos outros alimentadores ligados ao mesmo barramento, afetando com isso os índices de qualidade.

As descargas atmosféricas, além de afetar os índices de desempenho do sistema, como acima mencionado, provocam danos ou, no mínimo, uma redução considerável da vida útil nos equipamentos da concessionária e dos consumidores.

Como as sobretensões prospectivas devidas a descargas atmosféricas (as sobretensões que existiriam se não

ocorresse descarga disruptiva na isolação) são muito altas, projetos econômicos e seguros requerem um uso extensivo de proteção contra sobretensões.

Como na prática não é possível agir sobre a fonte das perturbações, que é descarga atmosférica, existem basicamente dois tipos de métodos de proteção contra as sobretensões produzidas pelas descargas atmosféricas:

- Os que reduzem o acoplamento entre a descarga e o sistema;
- Os que reduzem a susceptibilidade dos equipamentos, limitando localmente as sobretensões.

As diversas concessionárias brasileiras de distribuição de energia, para enfrentar este problema e assim melhorar o desempenho dos seus sistemas frente a descargas atmosféricas, têm incluído nos seus projetos e têm feito nos seus sistemas diferentes tipos de modificações, as quais consomem uma quantidade substancial de recursos.

A FORCEL, que é uma companhia premiada por seu desempenho relativo a outras concessionárias brasileiras, tem utilizado com grande sucesso nas suas linhas de 13,8 kV um cabo de aterramento suplementar. Em face deste sucesso, tornou-se importante estabelecer e quantificar as melhorias obtidas com a utilização do cabo de aterramento suplementar, principalmente devido ao fato de existir bastante controvérsia sobre a eficácia deste tipo de solução.

A utilização de cabos de blindagem para melhorar o desempenho dos sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas tem uma história bastante extensa [1],[2],[3], porém, até os dias de hoje existem dúvidas, no caso dos sistemas de distribuição, a respeito da eficácia deste tipo de solução. Isto pode ser visto a partir dos pontos de vistas expressos nas duas principais publicações a respeito do tema: o Guia do JWG CIRED/CIGRE C4.4.02 [4] e o IEEE Std 1410 [5].

1) O Guia do JWG CIRED/CIGRE C4.4.02 sobre 'Proteção de redes de média tensão e baixa tensão contra descargas atmosféricas'[4], que está atualmente sendo elaborado, apresenta uma visão relativamente pessimista ao respeito do problema da proteção das linhas de média tensão. Ele registra que:

“Uma redução efetiva da taxa de faltas devidas a descargas atmosféricas de uma linha de MT pode ser obtida unicamente através de medidas muito custosas, como converter a linha aérea num cabo ou instalando pára-raios em cada poste e cada fase”.

“Outras medidas, como aumentar a suportabilidade da isolação da linha ou adicionar cabo pára-raios, podem

A equipe agradece à FORCEL pelo apoio e pela oportunidade de desenvolvimento do tema no âmbito do programa de P&D da ANEEL.

P.E. Munhoz Rojas trabalha no LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: patricio@lactec.org.br).

Roberto Lang trabalha na FORCEL (e-mail: forcel@terra.com.br).

reduzir somente o número de faltas devidas a tensões induzidas, porém não tem influência no número de faltas devidas a descargas diretas. O custo-benefício destas soluções deve ser sempre avaliado”.

2) O IEEE Std 1410 “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”[5], diz que: “os cabos pára-raios podem prover uma proteção efetiva somente se:

- a) Forem utilizadas boas práticas de projeto da isolação, de modo a prover uma tensão suportável adequada entre os condutores de descida da blindagem e os condutores de fase;
- b) Forem obtidas baixas resistências de aterramento nos postes aterrados.”

Diz também que os cabos de blindagem diminuem as tensões induzidas devido ao acoplamento capacitivo, porém, a melhora do acoplamento capacitivo pode provocar uma diminuição da tensão suportável.

Todavia, registra que “a pesar do custo e das dificuldades de projeto, cabos de blindagem têm sido utilizados por algumas concessionárias com grande sucesso”.

A diferença nas conclusões provavelmente se deve aos diferentes métodos utilizados para o cálculo das tensões produzidas seja por indução ou pela circulação da corrente de descarga.

No Japão, Yokoyama[6] propôs acrescentar às causas de defeitos consideradas nos guias do IEEE e do CIGRÉ, que são as descargas diretas e as sobretensões induzidas, uma terceira causa que chamou “corrente de retorno”. Propôs então classificar as causas de defeitos em linhas de distribuição, devidos a descargas atmosféricas, em três tipos principais:

- 1) Sobretensões induzidas. Devidas a descargas atmosféricas que atingem a vizinhança da linha de distribuição e induzem sobretensões a distância, através de ar;
- 2) Descargas diretas. Devidas a descargas atmosféricas que atingem diretamente a linha de distribuição;
- 3) Correntes de retorno. Devidas a descargas atmosféricas que atingem construções na vizinhança da linha de distribuição e, através das linhas de alimentação dessas construções, atingem os equipamentos de conexão com a linha de distribuição.

Segundo Yokoyama[6], aproximadamente a metade das falhas de pára-raios seriam causadas por correntes de retorno.

Este projeto ANEEL foi realizado para avaliar a melhoria introduzida no desempenho de linhas de distribuição de 13,8 kV frente às descargas atmosféricas pela utilização de um cabo de aterramento suplementar, e assim contribuir para melhorar os processos da FORCEL referentes à:

- Avaliação da eficácia das providências tomadas para assegurar um bom desempenho das linhas da FORCEL frente a descargas atmosféricas;
- Avaliação da efetividade dos investimentos realizados em melhoria de desempenho do sistema.

A hipótese básica do projeto foi a seguinte: a causa preponderante da melhoria de desempenho devida à utilização de um cabo de aterramento suplementar é a diminuição das sobretensões sofridas pela rede e pelos

equipamentos da rede de distribuição de 13,8 kV. Portanto, era imprescindível poder determinar e quantificar adequadamente essa diminuição das sobretensões. Todavia, como já foi mencionado anteriormente, não existe consenso internacional a respeito da maneira adequada de calcular essas sobretensões.

Os resultados do cálculo das tensões induzidas são afetados principalmente por três razões diferentes:

- A natureza do campo eletromagnético produzido pela descarga atmosférica (isto depende do modelo adotado para a descarga e do modelo adotado para a influência do solo no processo da descarga);
- O processo de acoplamento entre o campo eletromagnético incidente e a linha (isto depende do modelo utilizado para o acoplamento);
- A resposta da linha ao campo eletromagnético incidente (isto depende do modelo de linha e do modelo do solo utilizados).

Neste trabalho são apresentados os principais resultados obtidos utilizando um programa para calcular as sobretensões produzidas pelas descargas, o qual foi desenvolvido visando levantar algumas restrições feitas aos programas atualmente existentes.

A parte II deste trabalho descreve a forma de aplicação do cabo de aterramento suplementar na FORCEL; a parte III descreve os resultados dos estudos efetuados para calcular as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas e a parte IV destaca as principais conclusões.

II. UTILIZAÇÃO DO CABO DE ATERRAMENTO SUPLEMENTAR NA FORCEL

Sendo um dos objetivos do projeto determinar e quantificar a diminuição das sobretensões sofridas pela rede e pelos equipamentos da rede de distribuição de 13,8 kV com a utilização de um cabo de aterramento suplementar; a tarefa a seguir foi verificar as características da utilização do cabo de aterramento suplementar na FORCEL para determinar os possíveis impactos na diminuição de defeitos.

A utilização do cabo de aterramento suplementar na FORCEL tem duas características marcantes, como pode ser apreciado nas figuras Nos. 1, 2 e 3 abaixo:



Figura 1 – Cabo de aterramento suplementar e haste para proteção de um transformador.

A primeira é o fato de utilizar a extensão do cabo neutro da baixa tensão (no poste a 1.50 m abaixo da cruzeta), o qual é multi-aterrado, como cabo de blindagem (cabo de aterramento suplementar).



Figura 2 – Cabo de aterramento suplementar e haste para proteção de chaves e isoladores.

A segunda é o fato de utilizar hastes para lidar localmente com as descargas diretas.

Como pode ser facilmente apreciado, o cabo de aterramento suplementar é utilizado como cabo de blindagem e não como cabo pára-raios e, portanto, não é utilizado para interceptar raios. Todavia, no caso das descargas diretas, o cabo de aterramento suplementar terá um efeito benéfico, já que por constituir um eletrodo multi-aterrado, provocará uma diminuição do potencial produzido pela descarga no eletrodo de aterramento do poste, devido ao escoamento de parte da corrente de descarga para fora do aterramento do poste.



Figura 3 – Cabo de aterramento suplementar e haste para proteção de isoladores.

No caso das sobretensões induzidas, o cabo de aterramento suplementar, atuando como cabo de blindagem, afetará as sobretensões induzidas nos condutores de fase, devido ao acoplamento capacitivo e indutivo com os

condutores de fase e, também, devido ao fato de estar aterrado a cada certo trecho.

Finalmente, contra as "correntes de retorno", o cabo de aterramento suplementar representa caminhos alternativos para a corrente de retorno, aliviando deste modo a labor dos pára-raios.

As hastes colocadas em certos postes reportados como "críticos" com respeito às descargas diretas propiciam uma blindagem contra as descargas diretas nesse poste, sendo utilizadas para interceptar raios que de outra maneira atingiriam diretamente os condutores de fase ou o equipamento localizado no poste. Desta maneira diminuem a corrente injetada nos equipamentos protegidos e a conseguinte sobrecarga que provocaria a danificação dos mesmos. A ligação destas hastes no cabo de aterramento suplementar contribui para melhorar a eficiência do processo de diminuição da corrente injetada nos equipamentos protegidos.

III. CALCULO DAS SOBRETENSÕES PRODUZIDAS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A. Sobretensões devidas a descargas indiretas

Nas décadas de 70 e 80 foi colocada de relevo a importância das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas ocorridas a pouca distância da linha, para sistemas de distribuição tipo europeu, especialmente aqueles com cruzetas aterradas, chegando alguns autores a afirmar que o problema de proteção das linhas de distribuição seria determinado principalmente pelas sobretensões induzidas [6],[7].

O cálculo destas sobretensões tem sido o objeto de diversos estudos efetuados nestas últimas décadas, os quais chegam a resultados divergentes e às vezes até conflitantes [8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24].

Do estudo detalhado desses trabalhos chegamos ao diagnóstico de que os principais pontos de controvérsia estariam no modelo de acoplamento do campo eletromagnético incidente com a linha e na importância do modelo do solo na determinação das tensões induzidas.

Primeiramente foi mostrado que o efeito dos diferentes modelos da descarga atmosférica não tem a importância que alguns autores atribuem a ela [23] e, que no caso de uma linha infinita e solo perfeitamente condutor, as diversas teorias de acoplamento produzem exatamente o mesmo resultado se alguns erros comuns de cálculo são evitados [24]. Portanto, a diferença principal entre os diferentes modelos de acoplamento reside na facilidade ou dificuldade de incorporar neles modelos do comportamento do solo mais avançados.

Com base no diagnóstico acima mencionado foi adotado o método de cálculo dos acoplamentos baseado nos potenciais escalares e foi elaborado um programa de computador, no ambiente MatLab, para o cálculo das sobretensões induzidas.

Quando o programa foi aplicado ao caso de uma linha de quatro vãos terminada numa resistência quase igual a sua impedância característica, com resistências de aterramento nos postes de 10Ω , foram obtidos os resultados mostrados

nas figuras 4, 5, 6 e 7, para uma descarga de 1kA que ocorra frente ao poste central a uma distância de 100m do eixo da linha. Os resultados são mostrados para duas resistividades do solo, de valores 100 e $1000 \Omega\text{m}$ respectivamente.

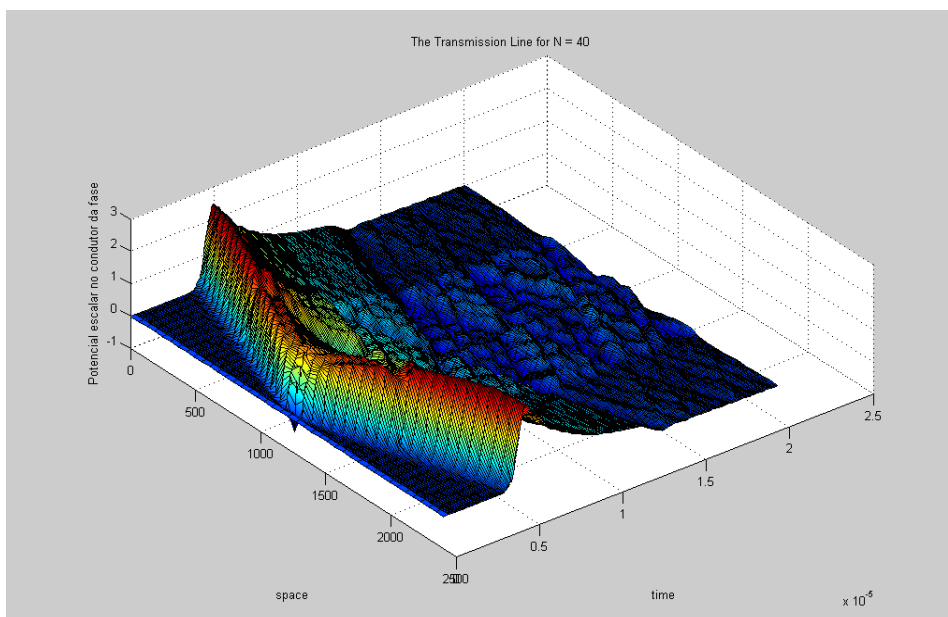


Figura 4a – Potencial escalar no condutor de fase ($\rho=100\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

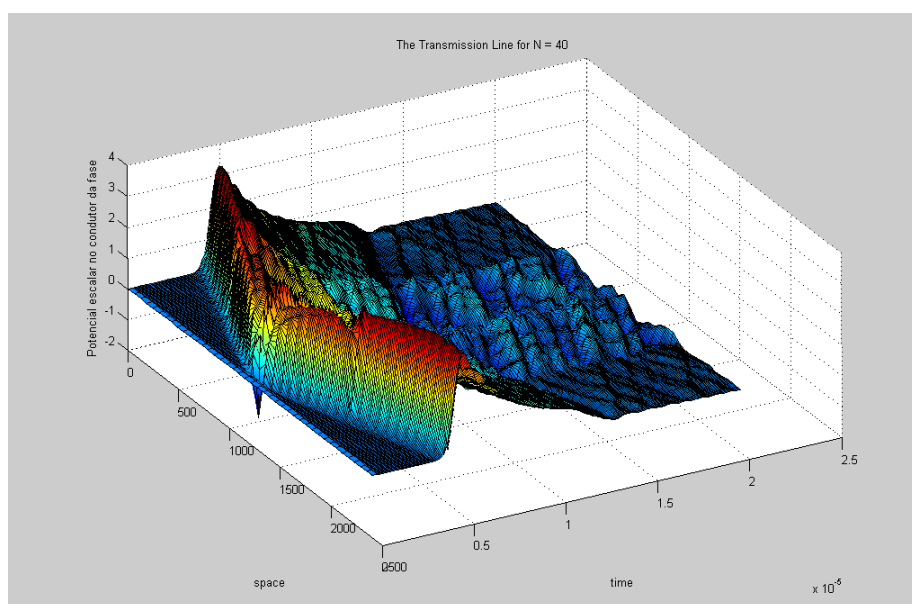


Figura 4b – Potencial escalar no condutor de fase ($\rho=1000\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

Na figura 4 que mostra o potencial escalar no condutor de fase, pode-se ver que o potencial escalar no condutor de fase é influenciado pela presença do cabo de blindagem e pela corrente que nele circula, sendo menor que o potencial escalar que seria induzido numa linha infinita sem cabo de

blindagem (Rusck), especialmente nos dois vãos vizinhos ao ponto mais perto da descarga, localização onde é notório o efeito da corrente no cabo de blindagem. Este efeito é mais evidente para resistividades mais altas.

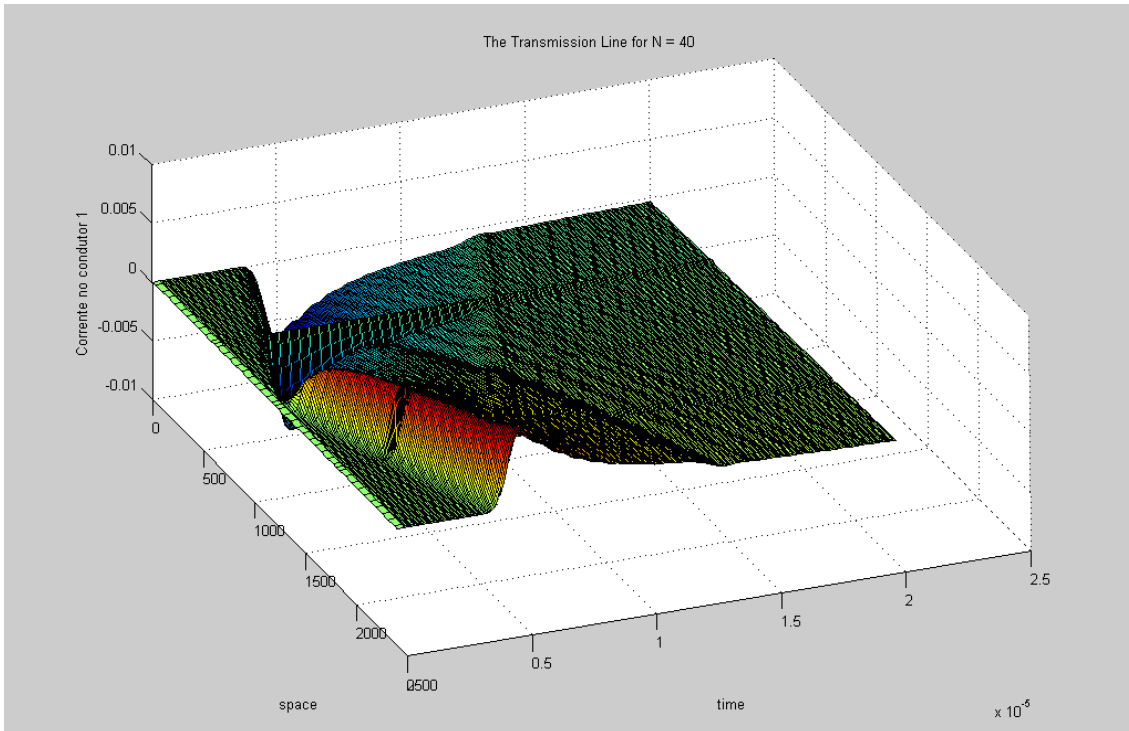


Figura 5a – Corrente no condutor de fase ($\rho=100\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

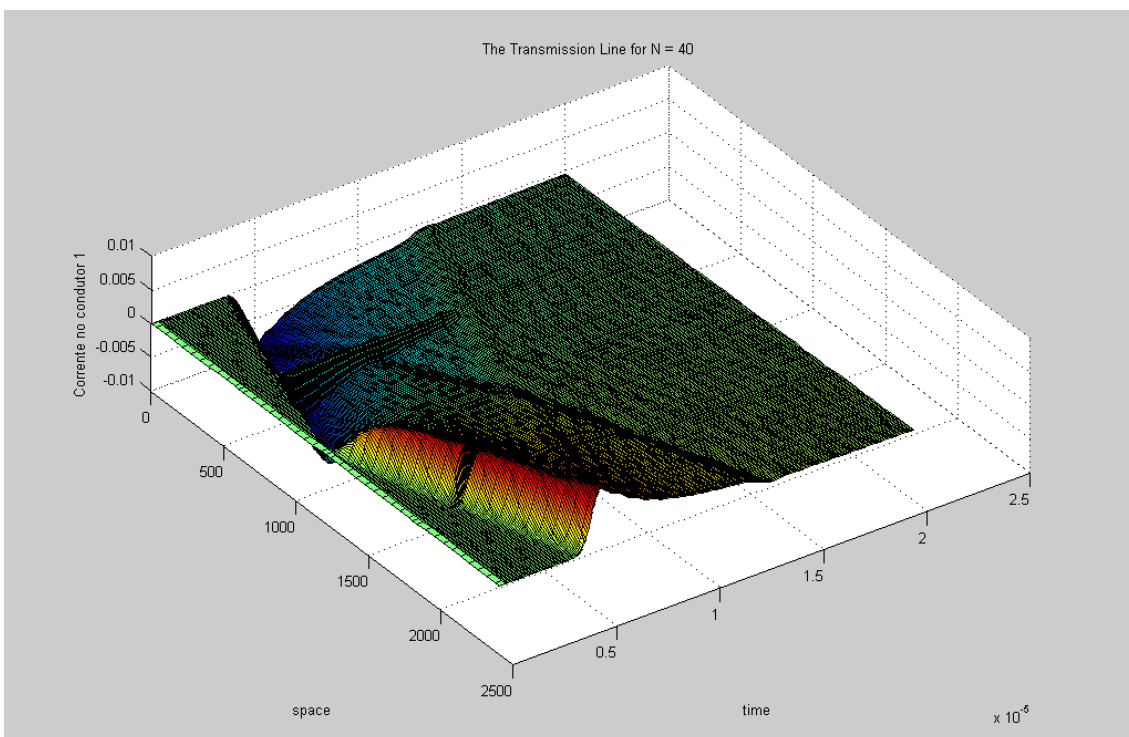


Figura 5b – Corrente no condutor de fase ($\rho=1000\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

Na figura 5 que mostra a corrente no condutor de fase, pode-se ver que a corrente no condutor de fase praticamente não é afetada, sendo quase a mesma que seria se o condutor de fase estivesse sozinho.

Já na figura 6 que mostra a corrente no cabo de blindagem, pode-se ver que a corrente no cabo de blindagem

circula no sentido contrário à corrente no condutor de fase, devido à injeção de corrente no aterramento do poste mais próximo à descarga atmosférica (neste caso poste central) e circula principalmente nos vão vizinhos ao poste mais próximo à descarga atmosférica.

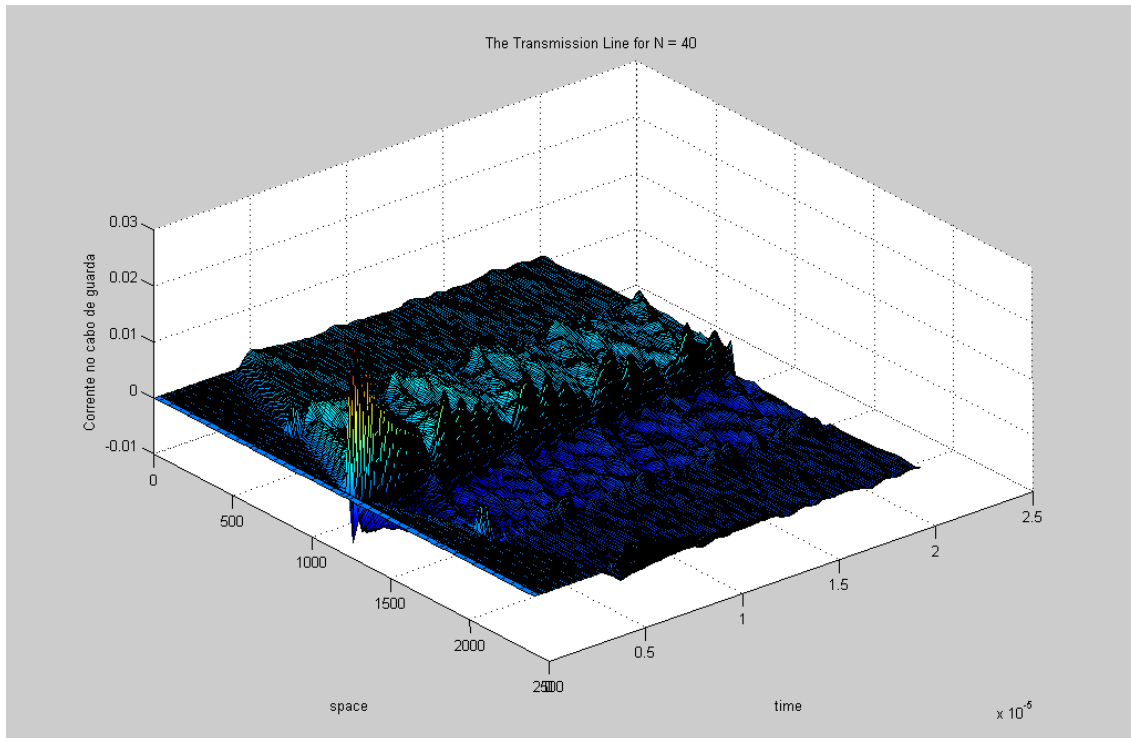


Figura 6a – Corrente no cabo de blindagem ($\rho=100\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

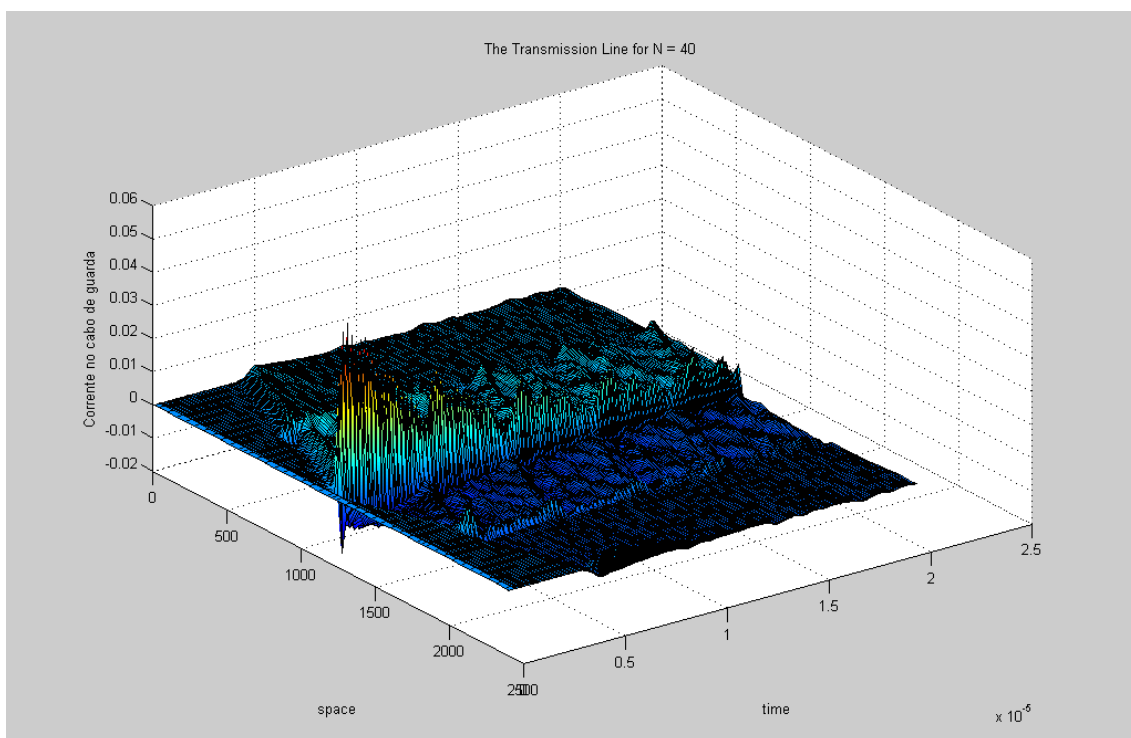


Figura 6b – Corrente no cabo de blindagem ($\rho=1000\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

Finalmente, na figura 7 que mostra a tensão entre o condutor de fase e o cabo de blindagem, pode ser visto que a tensão entre o condutor de fase e o cabo de blindagem, que é a quantidade medida com os divisores de tensão, ainda que tenha uma evolução temporal muito parecida com aquela do potencial escalar no condutor de fase, apresenta uma distribuição espacial bem diferente daquela do potencial

escalar no condutor de fase. No caso de solos de resistividades mais altas, a tensão é maior que o potencial escalar que seria induzido numa linha infinita, sem cabo de blindagem, sobre um solo perfeitamente condutor (Rusck). O maior pico de tensão é produzido nos postes aterrados, não necessariamente no poste mais próximo da descarga.

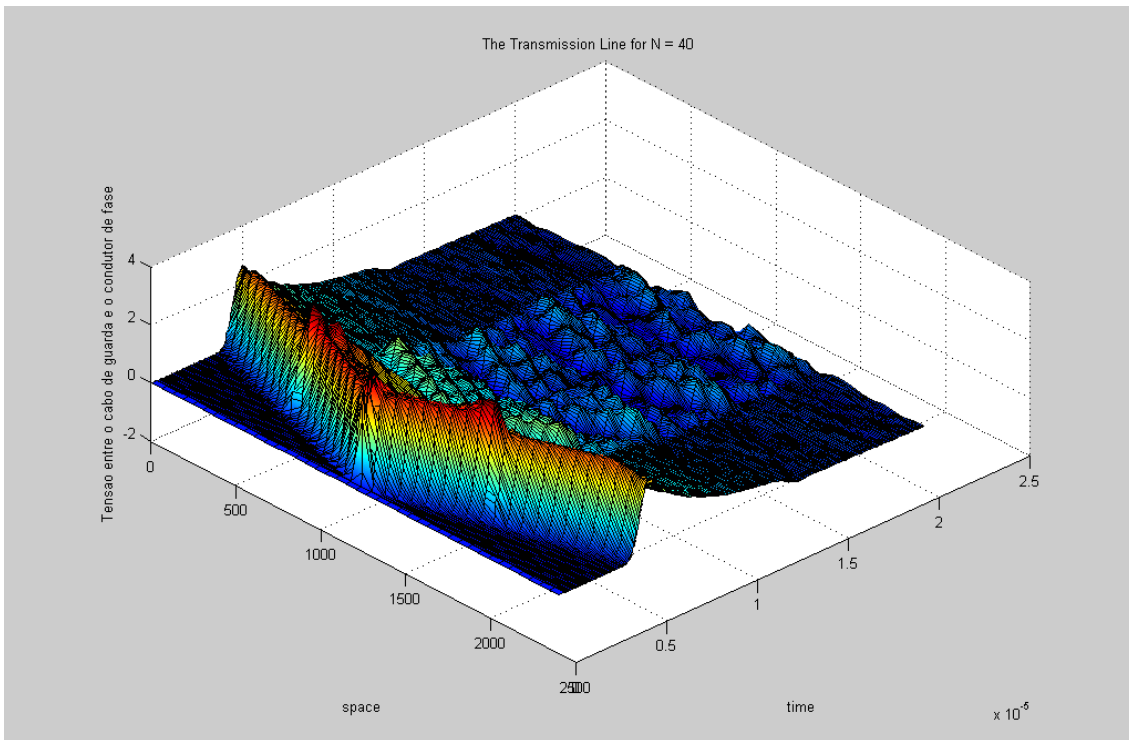


Figura 7a – Tensão entre o cabo de blindagem e o condutor de fase ($\rho=100\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

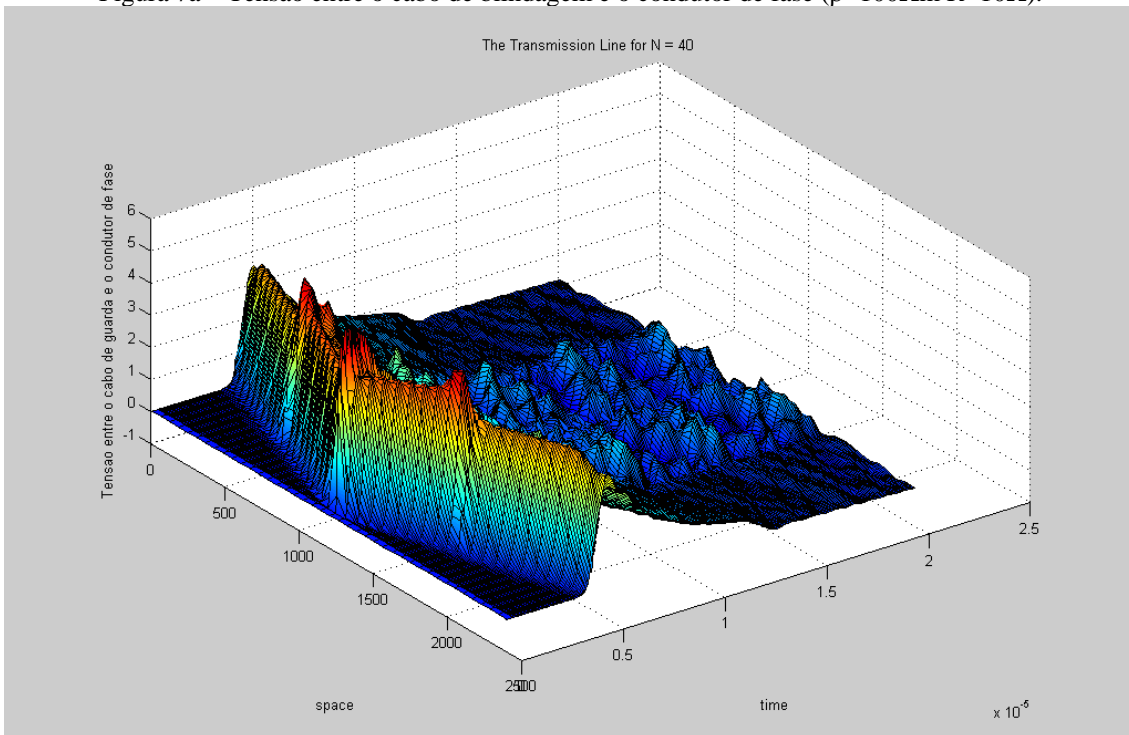


Figura 7b – Tensão entre o cabo de blindagem e o condutor de fase ($\rho=1000\Omega\text{m}$ $R=10\Omega$).

B. Sobretensões devidas a descargas diretas

No caso das descargas atmosféricas diretas a corrente da descarga é levada para terra através dos condutores de aterramento dos postes. O IEEE Std 1410 [5] diz que para ser efetivo o cabo pára-raios deve ser aterrado em todos os postes. Como a eficácia do cabo pára-raios é altamente dependente do aterramento, para que o cabo pára-raios seja efetivo a resistência de aterramento dos postes deve ser

menor que $10\ \Omega$ se a tensão suportável for menor que 200 kV.

No caso de uma linha de distribuição a forma como se distribui a corrente de descarga é calculada usando um modelo similar ao modelo utilizado para linhas de transmissão [25],[26],[27], porém, no caso de linhas de distribuição como os postes são baixos (da ordem de 10 metros) os efeitos de propagação no poste são desprezados, em compensação, como os vãos de distribuição são mais curtos que os de transmissão, os efeitos das reflexões nos

postes vizinhos são muito importantes. O modelo simplificado utilizado pode ser visto na figura abaixo:

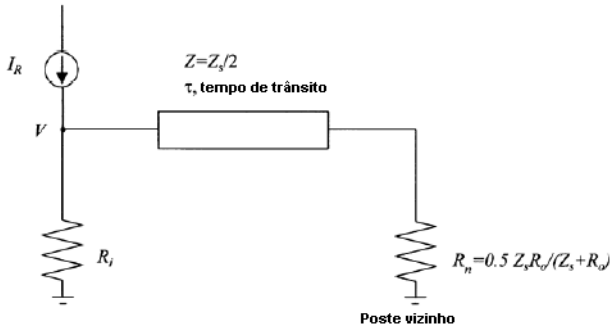


Figura 8 – Modelo simplificado para descargas diretas sobre um cabo pára-raios para linhas de distribuição.

O IEEE Std 1410 mostra como exemplo mostra a figura abaixo que pode ser utilizada para estimar o número de descargas disruptivas no caso da utilização de cabo pára-raios.

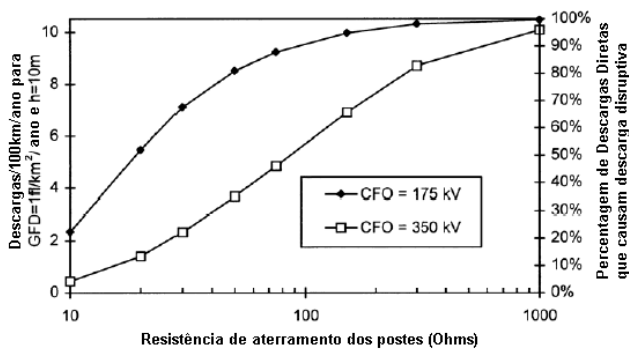


Figura 9 – Efeito da resistência de aterramento no desempenho do cabo pára-raios para descargas diretas (vão de 75 metros).

No caso da FORCEL como o cabo suplementar é aterrado a intervalos cuja média é aproximadamente 600 metros, o efeito das reflexões nos postes vizinhos aparece somente após quatro micro-segundos, portanto, elas não contribuem para reduzir o pico de tensão na isolação. Logo o cabo de aterramento suplementar praticamente não contribui para diminuir o número de faltas devidas a descargas diretas.

Todavia, como no caso da FORCEL, o problema das descargas diretas parece ser um problema localizado, a estratégia de utilizar hastes nas estruturas mais problemáticas se apresenta como muito razoável.

As hastes colocadas em certos postes propiciam uma blindagem contra as descargas diretas nesse poste, sendo utilizadas para interceptar raios que de outra maneira atingiriam diretamente os condutores de fase ou o equipamento localizado no poste. O cabo de aterramento suplementar, ligado ao condutor de aterramento do poste e da haste colocada no mesmo, representa caminhos alternativos para a corrente de retorno, aliviando deste modo a labor dos pára-raios que atuam para evitar a “descarga de retorno” (return stroke).

IV. CONCLUSÕES

O objetivo deste projeto ANEEL de P&D que era explicar as razões do sucesso de uma prática nacional e internacionalmente controversa, a saber, a aplicação de cabos de blindagem para melhorar o desempenho de uma linha de distribuição frente às descargas atmosféricas, obrigou a pesquisar as razões da controvérsia, que em último termo se reduzem a um desconhecimento, ou a um conhecimento limitado, da real explicação do princípio de funcionamento dos cabos pára-raios e de blindagem. A remoção das limitações encontradas, as quais vão desde os modelos da descarga atmosférica, a forma de calcular o campo eletromagnético por ela produzido, os mecanismos de acoplamento com uma linha com múltiplos condutores e seus acessórios, o efeito das discontinuidades e não-linearidades, o efeito do solo, etc., foram objeto deste trabalho e continuam a ser pesquisadas.

Os cálculos efetuados dentro deste projeto com ferramentas estimadas como razoáveis, algumas das quais precisaram ser desenvolvidas durante o projeto como os programas para calcular sobretensões induzidas, permitiram chegar à principal conclusão deste trabalho que é: a estratégia da FORCEL de utilizar um cabo suplementar como cabo de blindagem para lidar com os efeitos das descargas indiretas e hastes, nas estruturas mais problemáticas, para lidar localmente com as descargas diretas representa uma prática de muito boa engenharia a qual continuará a ser aplicada na FORCEL e pode ser recomendada para outras concessionárias que experimentem problemas similares.

Deve ser enfatizado que a FORCEL tem um sistema de distribuição com um baixo nível de suportabilidade a impulso (110 kV), muito comum no Brasil, e o principal problema são as faltas devidas às tensões induzidas provocadas por descargas indiretas. O problema das descargas diretas parece ser um problema localizado.

Os cálculos efetuados neste trabalho mostram que a utilização do cabo de aterramento suplementar como cabo de blindagem de fato contribui para a redução da tensão entre os cabos de fase e a terra de referência local da isolação, no caso das sobretensões induzidas pelas descargas indiretas, devido ao acoplamento tanto indutivo quanto capacitivo entre o cabo de blindagem e os cabos de fase.

Pelo fato de ser utilizado como cabo de blindagem, colocado embaixo dos condutores de fase e não como cabo pára-raios, ele não praticamente contribui para a diminuição das faltas devidas a descargas diretas nos condutores de fase.

As hastes colocadas em certos postes propiciam uma blindagem contra as descargas diretas para os equipamentos colocados nesse poste. O cabo de aterramento suplementar, ligado ao condutor de aterramento do poste e da haste colocada no mesmo, representa caminhos alternativos para a corrente de retorno, desta maneira diminuindo a corrente injetada nos equipamentos e a conseguinte sobrecarga que provocaria a danificação dos mesmos.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao pessoal da FORCEL, assim como ao pessoal do COPEL-DIS, pelo acesso às informações sobre desligamentos de alimentadores e sobre ocorrência de descargas atmosféricas no Estado do Paraná.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.E.F. Creighton - "Questions on the economic value of the ground wire", *Trans. Am. Inst. Eect. ngrs.*, **41**, pp.127-138, 1922.
- [2] C.L Fortescue - "Direct strokes- not induced surges- chief cause of high voltage line flashovers", *Electr. J.*, **27**, pp.459-462, 1930.
- [3] M.L. Hurstell & M.G. West, "Shielding 13,8 kV Distribution Circuits", *AIEE Transactions* No.78, pp. 1056-64, 1959
- [4] CIGRE JWG C4.4.02 – "Protection of MV and LV Networks against Lightning - Part 1: Common Topics", *CIGRE Brochure* No.287, Dec. 2005.
- [5] IEEE Std. 1410, "IEEE Design Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", 2004.
- [6] Shigeru Yokoyama - "Lightning Protection of MV Overhead Distribution Lines", *Proceedings of the VII SIPDA*, pp. 485-507, November 2003.
- [7] S.Rusck, "Protection of distribution lines", *Lightning*, Vol.2, cap. 23, pp.747-771, Ed. R.H. Golde, 1977.
- [8] R.H.Golde, "Lightning surges on overhead distribution lines caused by indirect and direct lightning strokes", *AIEE Transactions-Pt.III*, Vol.73, pp.437-447, 1954
- [9] R.Lundholm, "Induced overvoltages on transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks", *Trans. of the Chalmers University of Technology*, Gothenburg, No.188, 1955
- [10] S.Rusck, "Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks", *Trans. of the Royal Inst.of Technology*, Stockholm, No.120, 1958
- [11] S.Rusck, "Lightning over-voltages and over-voltage protection in low-voltage networks", *ASEA Journal*, Vol.31, pp.75-81, 1958
- [12] P.Chowdhuri & E.T.B.Gross, "Voltages surges induced on overhead lines by lightning strokes", *Proc.IEE*, Vol.114, No.12, pp. 1899-1907, 1967
- [13] G.C.Cornfield and M.F.Stringfellow, "Calculation and measurement of Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines", "Lightning and the Distribution System" - IEE Conference Publication, No.108, pp.41-50, 1974
- [14] A.K.Agrawal, H.J.Price & S.H.Gurbaxani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol.22, No.2, pp.119-129, May 1980
- [15] A. J. Eriksson, M.F.Stringfellow & D.V.Meal, "Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines", *IEEE Trans.on PAS*, Vol.101, No.4, pp. 960-968, Apr. 1982
- [16] M.J.Master & M.A Uman, "Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory", *IEEE Trans.on PAS*, Vol.103, No.9, pp. 2502-2518, Sept. 1984
- [17] A C.Liew & S.C.Mar, "Extension of the Chowdhuri-Gross Model for Lightning -Induced Voltage on Overhead Lines", *IEEE Trans.on PD*, Vol.1, No.2, pp.240-247, Apr. 1986
- [18] M.K. Haldar & A C.Liew, "Alternative solution for the Chowdhuri-Gross Model of Lightning -Induced Voltages on Power Lines", *Proc. IEE*, Vol.135, Part C, No.4, pp.324-329, Jul. 1988
- [19] P.Chowdhuri, "Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines", *IEEE Trans.on PD*, Vol.4, No.1, pp. 479-492, Jan. 1989
- [20] C. A. Nucci, F.Rachidi, M.Ianoz & C.Mazzetti, "Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Lines", *IEEE Trans. on EMC*, Vol.35, No.1, pp 75-86, Feb. 1993
- [21] J.G.Anderson & T.S.Short, "Algorithms for the Calculation of Lightning-Induced Voltages on distribution Lines", *IEEE Trans.on PD*, Vol.8, No.3, pp.1217-1225, Jul. 1993
- [22] C. A. Nucci (CIGRE TF 33.01.01), "Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part II: Coupling models for the evaluation of the induced voltages", *Electra*, vol. 162, pp.121-145, Oct. 1995
- [23] P. Chowdhuri, S. Li and P. Yan, "Review of research on lightning-induced voltages on an overhead line", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol.148, No. 1, pp. 91-95, Jan. 2001.
- [24] P. Muñoz Rojas & C.L. da S. Pinto, "Analysis of Lightning-Induced Voltages on an Overhead Line", *Proceedings of VIII SIPDA*, Paper I.10, Nov. 2005.
- [25] IEEE Std. 1243 - "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", 1997.
- [26] CIGRE WG33-01 – "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", *CIGRE Brochure* No.63, 1991.
- [27] Working group report: «Calculating the lightning performance of distribution lines» *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No 3, pp.1408-1417, July 1990.