

Avaliação e Proposição de Novos Critérios para Melhoria do Desempenho e da Coordenação de Isolamento das Redes Classe 15 kV e 25 kV do Sistema de Distribuição da AES-Eletropaulo

H. Bueno, C. T. N. Mineta, A. J. Monteiro & J. M. Alves, AES-Eletropaulo, P. H. Mendonça, R. J. Bacheга & M. L. B. Martinez, Universidade Federal de Itajubá

Resumo— Este trabalho apresenta um método simplificado de engenharia para analisar o desempenho frente a impulsos atmosféricos de linhas de distribuição aéreas. O método consiste de duas partes: simulação estatística e induzida de impulsos atmosféricos.

Os resultados mostram onde é necessária a instalação de pára-raios. Neste artigo, será apresentada uma avaliação da melhora do desempenho utilizando-se esta técnica de quatro alimentadores da AES-Eletropaulo, sendo que ao longo do projeto implantamos e observamos os resultados desta filosofia em 18 alimentadores ao todo.

Palavras-chaves: Pára-raio, Coordenação, Isolamento, Desempenho e Software.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste de um modelo simplificado de engenharia para análise do desempenho de linhas aéreas de distribuição. O método foi aplicado em dezoito alimentadores pertencentes a AES-Eletropaulo. O método apresenta duas partes: a primeira consiste na simulação estatística para obter um histograma das piores solicitações por sobretensão. A segunda, supondo que todas as sobretensões induzidas apresentam aproximadamente a mesma amplitude e a mesma forma de onda, é um modelo monofásico para calcular as amplitudes e formas de onda das tensões induzidas ao longo da linha. A primeira parte é simulada utilizando-se o programa LIOV-EFEI [1], que é uma simplificação do código LIOV [2], que utiliza internamente uma equação similar a de Rusck [3] para cálculo da amplitude da tensão induzida, e a segunda parte é simulada no programa ATP.

Os resultados obtidos são secções do alimentador onde é recomendada a instalação de pára-raios e onde o efeito combinado da corrente subsequente do pára-raio de carbureto de silício pode resultar na operação incorreta dos fusíveis do alimentador.

Este artigo mostra os exemplos e resultados obtidos em quatro alimentadores da AES-Eletropaulo.

II. METODOLOGIA

Na primeira parte do estudo, isto é, o cálculo das máximas tensões induzidas pelo Modelo LIOV-EFEI [1], é considerado o modelo de linha monofásica, cujo comprimento é o comprimento total de todos os ramos do alimentador. Isto é, com toda certeza, uma grande simplificação. Entretanto, se faz possível a generalização do processo para todos os alimentadores. Se for necessária a obtenção de um resultado melhor, pode-se fazer uso de métodos mais refinados, como por exemplo, o código LIOV-EMTP [4].

É óbvio que há diferenças nestas duas aproximações. Entretanto qualquer discussão sobre este assunto é desnecessária, e, portanto deve ser evitada. A proximidade da aproximação apresentada em relação ao real é uma questão da geometria da linha e das estruturas altas. Isto pode resultar em uma espécie de comparações sem algum significado. O que é necessário levar em consideração é que o modelo LIOV-EFEI, que é uma simplificação de engenharia, de certa maneira, leva em consideração as posições de todas as estruturas altas próximas, pára-raios, chaves e fins de linha de distribuição.

O programa LIOV-EFEI gera aleatoriamente um conjunto de descargas atmosféricas por ano proporcional à densidade de descargas e também a uma área de 5 km de cada lado do modelo retilíneo de linha. Este estudo considera, geralmente, cem anos de atividade de descargas atmosféricas. Isto pode melhorar a falta de geometria em relação ao sistema real.

Para cada corrente gerada pelo Modelo LIOV-EFEI, os parâmetros obtidos são a forma de onda, corrente máxima, pico, posição ao longo da linha e distância a partir da linha.

Para cada estrutura alta levada em consideração, o programa calcula a distância de incidência de acordo com três modelos: Armstrong & Whitehead, Love e Distribuição e Transmissão [1]. Se a distância entre a posição original e qualquer descarga e qualquer estrutura é menor do que à distância de incidência, então a nova posição para aquela descarga será a posição da estrutura no modelo.

O modelo LIOV-EFEI calcula as máximas tensões induzidas para cada descarga a partir de (1), desenvolvida no Laboratório de Alta Tensão da EFEI, considerando a aplicação do código LIOV [1-2]. Esta equação foi

recentemente modificada e agora leva em consideração também o tempo até o pico da corrente de descarga. Considerando somente as tensões induzidas que podem causar falhas, um histograma de falhas de isolamento – falhas ao longo da linha é obtido. O mesmo histograma inclui as posições das estruturas próximas.

$$\frac{kV}{kA} = \frac{1}{k_1 + k_2 D_{LT} \ln(D_{LT})} \quad (1)$$

A média do número de descargas por intervalo do histograma é calculada. Assim, pode-se determinar os intervalos nos quais o número de descargas é maior do que a média e que contém estruturas altas nas proximidades. Estes intervalos denominam-se “Intervalos Críticos”.

Na segunda parte do estudo, o alimentador é modelado como sendo monofásico para ser analisado pelo programa ATP. A amplitude da tensão impulsiva que representa cada intervalo crítico é a média no intervalo. Esta tensão impulsiva será simulada no ATP e é aplicada ao poste mais próximo à estrutura de altura elevada localizada no intervalo correspondente.

III. INSTALAÇÕES DE PÁRA-RAIOS E AS MELHORIAS OBTIDAS

Os resultados obtidos da simulação no programa ATP determinam as partes específicas do alimentador onde é recomendada a instalação de pára-raios. É recomendada geralmente a instalação de pára-raios em todas as terminações de linhas e nas chaves, devido a sobretensões causadas por reflexões.

A sobretensão induzida de todas as estruturas e equipamentos foi obtida no Laboratório de Alta Tensão da EFEI, e o isolamento extra oferecido pelas partes de madeira não foram observadas principalmente nas condições úmidas. Entretanto, a suportabilidade da linha pode ser devida aos isoladores. Outro importante ponto a ser mencionado é que o fator 1.5 CFO, como recomendado pela Norma do IEEE 1410 [5], não foi observado durante as aplicações de impulsos com forma de onda 1.2 – 2.5 x 10 µs.

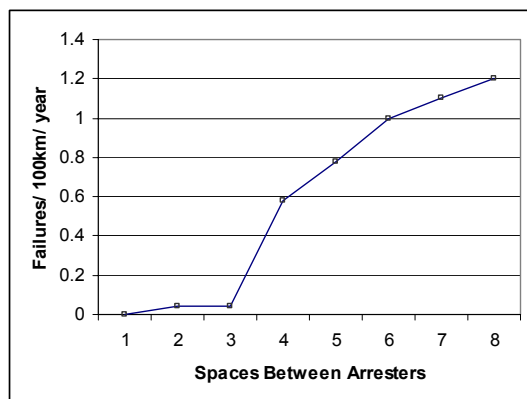


Figura 1. Falhas causadas por tensões induzidas em uma linha protegida por isoladores [5].

De acordo com a Figura 1 [5] e com os dados obtidos da primeira parte do estudo (posição e tensão induzida máxima de cada descarga), é considerado que todas as falhas que ocorreram em uma distância inferior que 35 m (distância entre postes considerada) de qualquer pára-raios, serão evitadas pelo pára-raios. A partir desta consideração, será estimada a melhoria do número de falhas/km/ano do alimentador. A melhoria obtida com a reposição dos antigos pára-raios de carbureto de silício, em ramos onde tem a possibilidade de ocorrer a operação da chave de maneira incorreta, não é levada em consideração.

IV. RESULTADOS

Serão apresentados quatro resultados de alimentadores da AES-ELETROPAULO utilizando o modelo LIOV-EFEI. O foco principal é relacionado às melhorias obtidas pelas recomendações geradas por estes resultados. A suportabilidade frente a sobretensão induzida para todos os casos obtida no Laboratório de Alta Tensão é de 120 kV.

A. ALIMENTADOR: IVI-102

A Tabela I mostra os dados principais do alimentador IVI-102.

TABELA I
PRINCIPAIS DADOS DO ALIMENTADOR.

Tensão do Alimentador	13,2 (kV)
1) <i>Densidade de Descargas</i>	8 [descargas/km2/ano]
2) <i>CFO</i>	120 (kV)
Comprimento do Modelo	61325 (m)

A Figura 2 mostra o histograma obtido para o alimentador IVI-102.

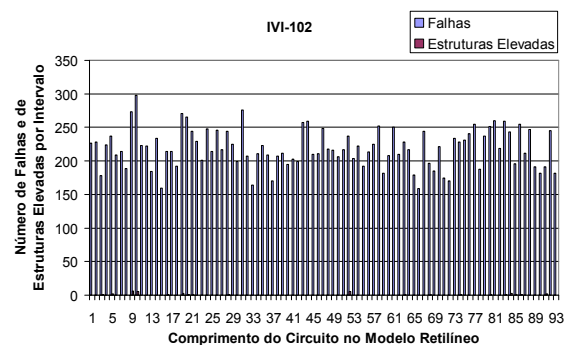


Figura 2. Histograma: Falhas e estruturas elevadas do alimentador.

A Tabela II mostra o número de intervalos, intervalos críticos e falhas esperadas para o alimentador IVI-102.

TABELA II
DADOS DO HISTOGRAMA

Num. de intervalos	93
Comprimento dos intervalos	659 [m]
Num. de intervalos críticos	14
Média por intervalo	219 [falhas]

Um dos intervalos críticos obtidos neste estudo é mostrado na Tabela III.

TABELA III
INTERVALO CRÍTICO

Número do Intervalo	52
Número de Falhas	237
Desvio-Padrão acima a Média	0,37
Altura da Estrutura Elevada	15 [m]

A Figura 3 mostra a tensão induzida no poste mais próximo à estrutura elevada deste intervalo crítico.

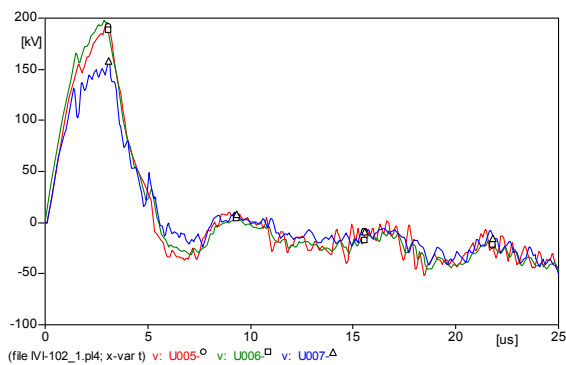


Figura 3. Tensão no poste onde a tensão foi aplicada (U006), no poste posterior (U007) e no anterior (U005).

Foi recomendada a instalação de pára-raios neste poste. A Figura 4 mostra a tensão induzida simulada com os pára-raios instalados. Como pode ser observado, não há ocorrência de falhas neste caso. A Tabela IV mostra a melhoria obtida com a aplicação deste procedimento, e considerações.

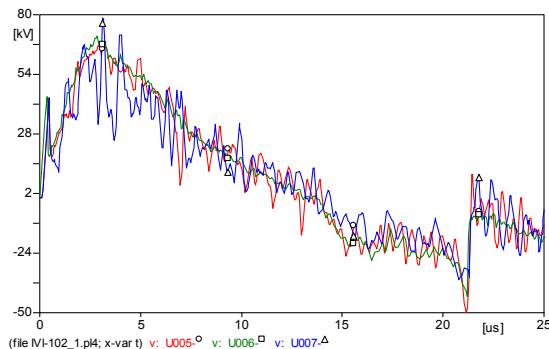


Figura 4. Tensão no poste onde foi colocado o pára-raios (U006), no poste a frente (U007) e no anterior (U005).

TABELA IV
MELHORIAS OBTIDAS COM O MÉTODO

	[Falhas/km/ano]
Número de Falhas Hoje	1,872
Número de Falhas Esperadas	1,624
Melhoria	13,49 [%]

B. ALIMENTADOR: MAZ-104

A Tabela V mostra os dados principais do alimentador MAZ-104.

TABELA V
PRINCIPAIS DADOS DO ALIMENTADOR

Tensão	13,2 (kV)
Densidade de Descarga	8 (descargas/km ² /ano)
CFO	120 (kV)
Comprimento do Modelo	13665 (m)

A Figura 5 mostra o histograma obtido para o alimentador MAZ-104.

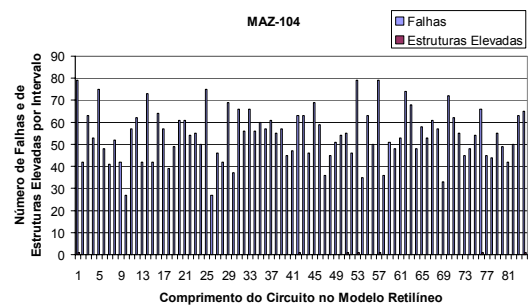


Figura 5. Histograma: Falhas e Estruturas Elevadas do Alimentador.

A Tabela VI mostra o número de intervalos, intervalos críticos e falhas esperadas do alimentador MAZ-104.

TABELA VI
DADOS DO HISTOGRAMA

Num. de intervalos	84
Comprimento dos intervalos	163 (m)
Num. de intervalos críticos	7
Média por intervalo	54 (falhas)

Um dos intervalos críticos obtidos é mostrado na Tabela VII.

TABELA VII
INTERVALO CRÍTICO

Número do Intervalo	57
Número de Falhas	79
Desvio-Padrão acima da média	1,23
Altura da Estrutura Elevada	30 (m)

A Figura 6 mostra a corrente de três grupos de pára-raios que pertence ao mesmo ramo onde está localizada a estrutura elevada escolhida no intervalo crítico. O surto simulado é aplicado ao poste mais próximo à estrutura.

A Figura 7 mostra a corrente em outros dois grupos de pára-raios no mesmo ramo.

Devido ao efeito combinado da corrente subsequente destes pára-raios de carbureto de silício, é recomendada a substituição destes por pára-raios de óxido metálico.

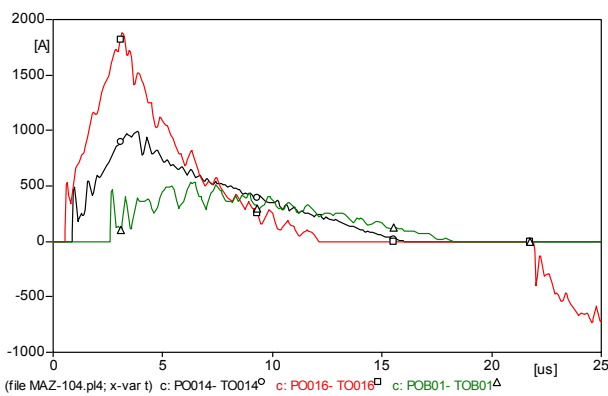


Figura 6. Correntes nos pára-raios localizado no ramo onde o surto foi aplicado.

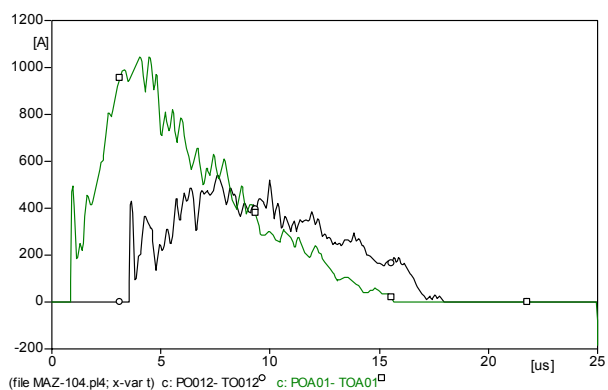


Figura 7. Correntes nos pára-raios localizado no ramo onde o surto foi aplicado.

A Tabela VIII mostra a melhoria obtida com a aplicação deste procedimento e as considerações.

TABELA VIII
MELHORIA OBTIDA COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO

	Faltas/km/ano
Número de Faltas Hoje	1,407
Número Esperado de Faltas	1,225
Melhoria	13,00 (%)

C. ALIMENTADOR: NAC-102

A Tabela IX mostra os dados do alimentador NAC-102.

TABELA IX
DADOS PRINCIPAIS DO ALIMENTADOR

Tensão	13,2 (kV)
Densidade de Descargas	8 (descargas/km ² /ano)
CFO	120 (kV)
Comprimento do Modelo	19515

Figura 8. mostra o histograma obtido do alimentador NAC-102.

Tabela X mostra o número de intervalos, intervalos críticos e as faltas esperadas para o alimentador MAZ-104.

TABELA X
DADOS DO HISTOGRAMA

Número de Intervalos	84
Comprimento dos Intervalos	232 (m)
Número de Intervalos Críticos	19
Média por Intervalo	82 (faltas)

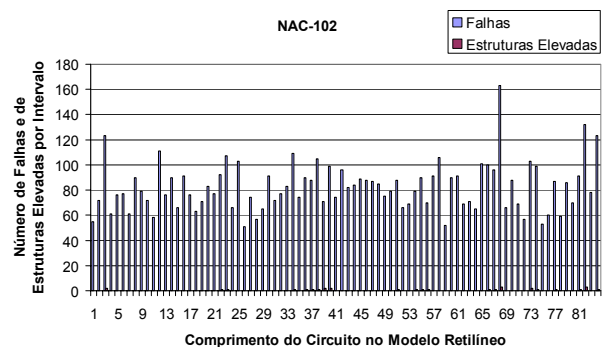


Figura 8. Histograma: Faltas e estruturas elevadas ao longo do alimentador.

Um dos intervalos críticos obtidos é mostrado na Tabela XI.

TABELA XI
INTERVALOS CRÍTICOS

Número de Intervalos	36
Número de Faltas	90
Desvio Padrão Acima da Média	0,23
Altura da Estrutura Elevada	15 (m)

A Figura 9 mostra a tensão induzida simulada no poste localizado próximo a uma das estruturas elevadas dentro do intervalo crítico.

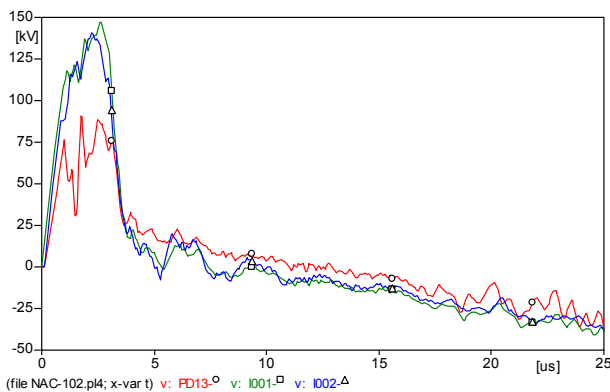


Figura 9. Tensão no poste onde a descarga foi aplicada (I001), um poste à frente (I002) e outro atrás (PD13).

Como observado é recomendada a instalação de um pára-raio neste poste.

A Figura 10 mostra a tensão induzida obtida após a instalação do pára-raio. Como pode ser observado, nenhuma falta ocorre neste caso. A Tabela XII mostra a melhoria obtida com a aplicação deste procedimento e considerações.

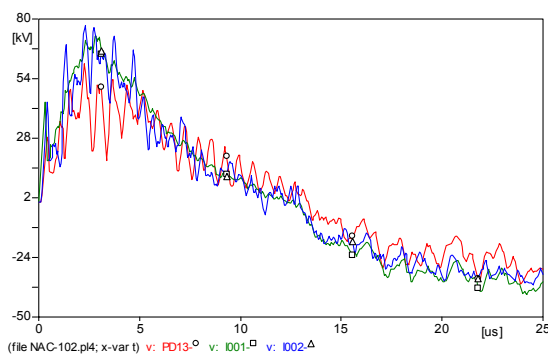


Figura 10. Tensão no poste onde a descarga foi aplicada (I001), um poste à frente (I002) e um atrás (PD13).

TABELA XII
MELHORIA OBTIDA COM O MÉTODO

	(faltas/km/ano)
Número de Faltas Hoje	1,912
Número de Faltas Esperadas	1,644
Melhoria	14.04 (%)

D. ALIMENTADOR: GNA-111

A Tabela XIII mostra as principais características do alimentador GNA-111.

TABELA XIII
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ALIMENTADOR

Tensão	13,2 (kV)
Densidade de Descargas	8 (descargas/km²/ano)
CFO	120 (kV)
Comprimento do Modelo	29625

A Figura 11. mostra o histograma obtido do alimentador GNA-111.

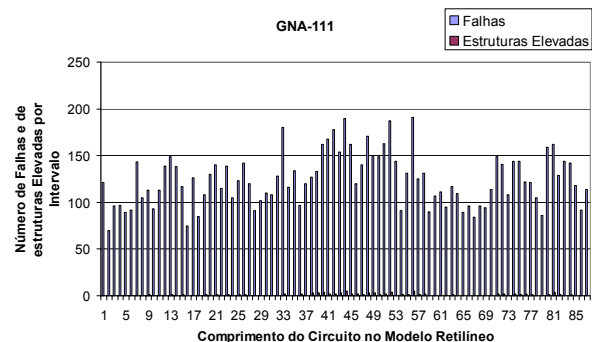


Figura 11. Histograma: falhas e estruturas elevadas ao longo do alimentador.

A Tabela XIV mostra o número de intervalos, intervalos críticos e faltas esperadas para o alimentador GNA-111.

TABELA XIV
DADOS DO HISTOGRAMA

Número de Intervalos	87
Comprimento dos Intervalos	340 (m)
Número de Intervalos Críticos	31
Média por Intervalo	124 (faltas)

Nenhum ponto próximo a estruturas elevadas apresentou problemas na simulação de tensão induzida para este alimentador. Neste caso, somente é recomendada a instalação de pára-raios no final das linhas e chaves, devido as sobretensões causadas pelo efeito de reflexão de onda.

A Tabela XV mostra a melhoria obtida com a aplicação

deste procedimento e considerações.

TABELA XV
MELHORIA OBTIDA COM O PROCEDIMENTO

	(Faltas/km/ano)
Número de Faltas Hoje	2,002
Número Esperado de Faltas	1,784
Melhoria	11.16 (%)

A Tabela XVI apresenta um resumo dos resultados gerais esperados com a aplicação do método proposto, mesmo considerando as simplificações assumidas. Como pode ser observado o resultado prático é uma melhoria global no desempenho dos alimentadores estudados. Resultados similares foram obtidos para todos os outros doze alimentadores restantes. Em geral os resultados podem ser classificados de acordo com estes quatro casos apresentados.

TABELA XVI
MELHORIA OBTIDA PARA TODOS OS ALIMENTADORES

Alimentador	Esperadas Faltas (/km/ano)	Melhoria (%)
IVI-102	1,624	13,49
MAZ-104	1,225	13,00
NAC-102	1,644	14,04
GNA-111	1,784	11,16

A fim de comprovar os resultados em campo neste projeto, implementamos esta filosofia juntamente com alguns tópicos novos sobre coordenação de isolamentos oriundos de normas e padrões nacionais e internacionais nos dezoito circuitos mais críticos da AES-Eletropaulo em relação á falhas de isolamentos e descargas atmosféricas, onde se necessitou da instalação de aproximadamente 1600 pára-raios nos pontos indicados por estes estudos.

Após as instalações destes pára-raios, com o objetivo de medir os resultados, apuramos os indicadores de continuidade comparando com os mesmos períodos de anos anteriores “época de verão”, e realizamos inspeções visuais para observar se houveram atuações dos pára-raios e outras avarias na rede, relacionadas a falhas de isolamento e descargas atmosféricas, deste modo comprovando os resultados em campo com o estudo teórico em oitenta por cento dos alimentadores implementados. Os vinte por cento os quais não obtivemos os resultados esperados se devem que até a data da apuração dos indicadores para o fechamento do projeto, ainda não haviam concluído as instalações de todos os pára-raios previstos em alguns alimentadores. Cabe ressaltar que para se ter um resultado mais preciso, é recomendado analisar os indicadores técnicos bem como o desempenho dos pára-raios ao longo dos próximos anos.

Os resultados observados até o final deste projeto estão expressos na tabela XVII.

TABELA XVII
RESULTADOS OBSERVADOS EM CAMPO

Circuito	Média de falhas (Antes) Primárias 2000 – 2004	Falhas primárias (Depois) Anotadas 2004 – 2005
COT-106	7.00	4.00 Falhas
PAR-106	6.50	1.00 Falha
AUT-114	2.00	Nenhuma Falha
VGR-2302	2.25	2 Falhas
BSI-110	2.75	Nenhuma Falha
PSD-106	4.25	4.00 Falhas
MAT-104	0.75	Nenhuma falha
CAT-107	2.22	1.00 Falha
GNA-111	3.25	3.00 Falhas
COT-111	3.00	2.00 Falhas
JOR-102	9.75	9.00 Falhas
NAC-102	3.25	1.00 Falha
CUP-105	2.50	Nenhuma Falha
VGR-2301	21.50	34.00 Falhas
IVI-102	7.50	10.00 Falhas
JUQ-106	12.30	17.00 Falhas
PAR-104	10.25	10.00 Falhas
PAR-105	2.50	1.00 Falhas

V . CONCLUSÕES

É necessário reconhecer que o presente estudo é bastante simplificado, comparado aos métodos conhecidos atualmente. A aproximação apresentada considera um solo perfeitamente condutivo e um modelo em linha reta para o alimentador, uma forte simplificação que, entretanto pode ser assumida como uma primeira aproximação geral.

No entanto, o método estimado estipula que o número de sobretensões induzidas que podem resultar em uma abertura de arco está na faixa de 1% a 3% de todas as descargas, dentro de uma região onde a densidade de descargas se situa numa faixa entre 5 a 8 [descargas/km².Ano].

A melhoria esperada com a instalação de pára-raios em pontos específicos do alimentador, somente considerando as sobretensões induzidas, está na faixa de 10% a 15% no caso desses quatro alimentadores. Na prática a instalação de pára-raios ao longo da linha, de acordo com as primeiras avaliações, resulta na colocação dos pára-raios no máximo a cada 200 metros. Além desta distância não é esperado nenhum

efeito significativo. Isto pode resolver todos os problemas relacionados a sobretensões induzidas, entretanto não resolve os problemas relacionados a descargas diretas. Todos estes fatos devem ser balanceados em termos econômicos com respeito às penalidades devidas à interrupção de energia, manutenção e devido aos danos a equipamentos elétricos instalados nos consumidores.

Portanto, é necessário que se faça uma análise econômica posterior para balancear a melhoria obtida de maneira a estimar os efeitos econômicos aproximados do método. A melhoria obtida pela prevenção da operação incorreta de chaves causada pela corrente que se segue a operação do pára-raio de carboneto de silício também pode ser levada em consideração. Isto normalmente cobre para todos os tipos de pára-raios, mau desempenho de disjuntores, principalmente os envelhecidos, e também o efeito combinado da potência da corrente que se segue à operação de pára-raios de carboneto de silício envelhecidos. Isto normalmente cobre todos os tipos de pára-raios, desempenho ruim das chaves, principalmente as mais antigas, e também o efeito combinado da corrente subsequente dos pára-raios de carbureto de silício, que em uma pesquisa recente feita no Laboratório de Alta Tensão da EFEI apresentou uma alta expectativa de vida útil por volta de 70 % após vinte anos de instalação.

Os resultados observados em campo até o final deste projeto nos dezoito alimentadores mais críticos sob o ponto de vista de falha de isolamentos e descargas atmosféricas da AES-Eletropaulo, confirmam as simulações realizadas no estudo.

As normas internas de alocações de pára-raios bem como tópicos relacionados à coordenação de isolamento em redes de distribuição da AES-Eletropaulo foram revistas e modificadas de acordo com os estudos feitos neste projeto.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] [1] Martinez M.L.B., de Salles C., et alli, "Insulation Coordination for a 23 kV Medium Voltage Distribution", Proc. 2003 Bologna Power Tech, Bologna 23 –26 June 2003.
- [2] [2] C.A. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz, C. Mazzetti, "Lightning-induced overvoltages on overhead lines", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 35, No. 1, pp. 75-86, February 1993.
- [3] [3] IEEE Working Group on Estimation Lightning Performance of Transmission Lines, "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Vol. 104 No.4, pp 919-932, April 1985.
- [4] [4] C.A. Nucci, V. Bardazzi, R. Iorio, A. Mansoldo, A. Porrino, "A code for the calculation of lightning-induced overvoltages and its interface with the Electromagnetic Transient program", Proc. 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, 19-23 September, 1994.
- [5] [5] IEEE Working Group on the lightning performance of distribution lines, "Guide for Improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines", IEEE STD 1410, 1997.