



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Software para Posicionamento Ótimo de Pára-Raios em Linhas de Transmissão e de Distribuição

]

| Vasconcelos, JA | Ragone, JC | Araújo, AE |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Universidade Federal de Minas Gerais | Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina | Universidade Federal de Minas Gerais |
| João@cpdee.ufmg.br | jragone@catleo.com.br | araujo@ufmg.br |

Palavras chaves

Descargas Atmosféricas, Linhas de Distribuição, Linhas de Transmissão, Pára-Raios, Otimização

Resumo

Este trabalho apresenta o software APManger desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para melhoria do desempenho de linhas de transmissão e de distribuição em parceria com a Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina (CFLCL), com a utilização de nova metodologia para o posicionamento ótimo de pára-raios. A garantia do fornecimento de energia elétrica aos consumidores, dentro de níveis de segurança suportáveis pelos equipamentos elétricos, minimizando os efeitos danosos causados pelas descargas atmosféricas e aumentando a proteção contra sobretensões é de fundamental importância. A utilização do software visa minimizar o número de desligamento quanto às sobretensões, além de permitir a seleção de esquemas de proteção apropriados para cada rede. Como consequência, os custos da proteção podem ser reduzidos e a continuidade do fornecimento de energia pode ser garantida, melhorando a qualidade do serviço prestado

1. Introdução

As redes modernas de energia elétrica devem garantir a continuidade da oferta da energia e manter a tensão nos barramentos dentro de uma faixa de variação bastante estreita. Assim, a eficácia da proteção do sistema contra sobretensões é fundamental para qualquer concessionária de energia elétrica que objetive fornecer ao cliente uma energia dentro dos padrões sugeridos pela ANEEL. Alguns estudos mostram que, em determinados casos, a mera utilização do cabo pára-raios para proteção contra a incidência de raios pode não ser suficiente para evitar curto-circuitos causados por *backflashovers*. Nos sistemas modernos, a utilização adicional de pára-raios de óxido de zinco tem sido uma solução encontrada para limitar as sobretensões, evitando a interrupção da operação.

A localização ótima de pára-raios para proteção das linhas é um problema importante para se garantir a eficácia da proteção contra sobretensões, assegurando a continuidade na oferta da energia elétrica. Este estudo é novo e o tema é, até o momento, muito pouco estudado. Ele envolve naturalmente o acoplamento de duas áreas de conhecimento: transitórios eletromagnéticos devido às descargas atmosféricas ou manobras no sistema, os quais podem ser analisados via software para cálculo de transitórios (EMTP); e otimização por meio de programação evolucionária.

2. Desenvolvimento do Trabalho

2.1. Estrutura do software

O software APManager para otimização de pára-raios está sendo desenvolvido pela UFMG em parceria com a CFLCL, através projeto ANEEL - P&D 0377 - 06/2005. A estrutura funcional do programa pode ser resumida pela ilustração da figura 1. Os blocos funcionais principais são o de otimização e o de transitórios, e serão detalhados nas subseções a seguir. O software também possui uma interface gráfica para interação com o usuário e um banco de dados contendo as informações relevantes das linhas de transmissão e de distribuição da empresa.

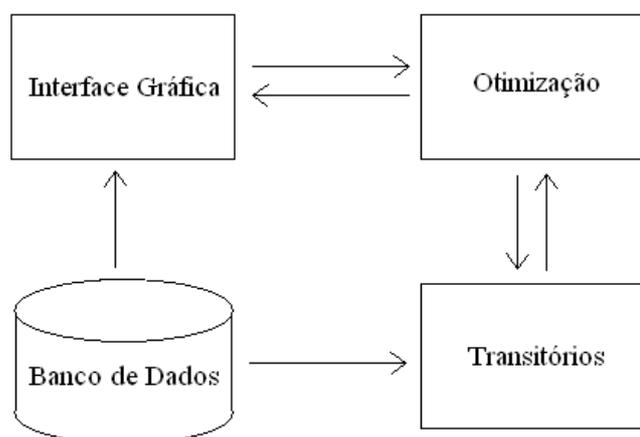


Figura 1: Estrutura funcional do software

2.2. Otimização

O processo de otimização no software APManager busca encontrar a melhor distribuição de pára-raios ao longo de uma Linha de transmissão (LT) ou distribuição (LD), com o intuito de minimizar o número de interrupções no fornecimento de energia.

O procedimento utilizado é baseado nos algoritmos evolucionários, especificamente algoritmos genéticos (AGs) [1].

Esses algoritmos são inspirados no processo evolutivo proposto por Darwin e têm se mostrado robustos na solução de problemas em geral. Na terminologia dos algoritmos evolucionários, um indivíduo no âmbito deste trabalho é na verdade uma string de caracteres que contém a indicação dos pára-raios a serem instalados. A alocação de pára-raios para LTs pode ser feita de duas formas: por torre ou por fase. No caso de LDs, a alocação é feita somente por torre. Assim, a população de indivíduos, é na verdade uma matriz, onde cada linha i representa um indivíduo e cada coluna j uma torre ou fase, dependendo do tipo de alocação e tipo de linha. Uma célula (i,j) desta matriz preenchida com o valor 1 indica que o indivíduo i possui um pára-raios na posição j , a qual pode ser um indicativo da torre ou da fase. Os parâmetros necessários para a criação da população inicial de indivíduos são número de torres, número de fases, número de pára-raios disponíveis para alocação, posicionamento de equipamentos e pára-raios já existentes, resistência de pé-de-torre e altitude das torres. Estes parâmetros são utilizados no âmbito do software para criar parte dos indivíduos de forma determinística e parte de forma

aleatória. Este procedimento acelera o processo de busca pela melhor solução e permite ao usuário dispor logo a partir da primeira geração de soluções que já incorporam metodologias clássicas de posicionamento de pára-raios, como a alocação de pára-raios em: i) torres com alto valor de resistência de pé-de-torre, ii) torres adjacentes às subestações e iii) preferencialmente em torres de grande altitude relativa às demais.

Os AGs são direcionados para encontrar a melhor solução do problema baseados em uma equação matemática denominada função de mérito que no caso do software APMManager é construída visando a minimização das sobretensões máximas ao longo de um determinado número n de torres. A função de mérito é definida como

$$f_i^T = \begin{cases} C_{\max} - h_{m,i}^T & \text{se } C_{\max} - h_{m,i}^T > 0 \\ 0 & \text{se } C_{\max} - h_{m,i}^T \leq 0 \end{cases}$$

onde:

- f_i^T é a função de mérito para o indivíduo i e geração T ;
- C_{\max} é uma constante utilizada para transformar o problema de minimização das sobretensões máximas em um problema de maximização da função de mérito. No presente caso, C_{\max} é feito igual ao número de torres.
- $h_{m,i}^T$ é 1 se o valor da sobretensão máxima da torre m para o indivíduo i na geração T ultrapassa 1.5V_CFO, onde V_CFO é o NBI da estrutura.

O problema formulado desta forma, permite ao usuário em todo instante saber quantas torres estão protegidas e quantas torres não estão.

O critério de parada da execução adotado no APMManager se baseia no número máximo de gerações admitidas na execução ou quando durante um conjunto subsequente de T gerações não ocorre melhoria no mérito do melhor indivíduo. Ao término do processo, o melhor posicionamento de pára-raios é disponibilizado ao usuário.

A figura 2 a seguir ilustra os principais módulos do algoritmo de posicionamento ótimo de pára-raios utilizado.

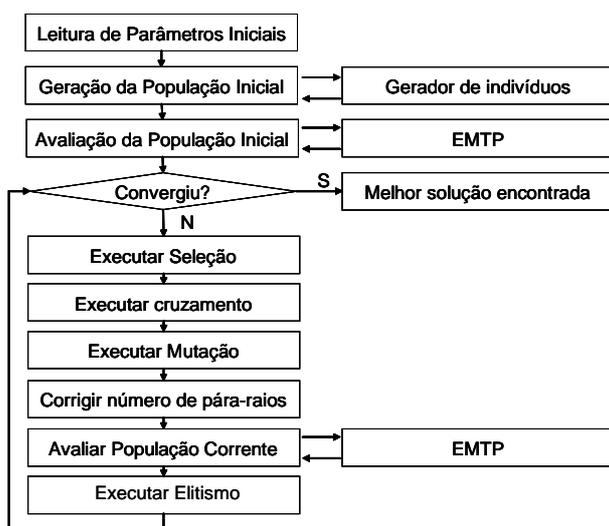


Figura 2: Fluxograma do algoritmo de posicionamento ótimo de pára-raios.

Nesse algoritmo é possível identificar o módulo que implementa o elitismo. Este módulo preserva a melhor solução encontrada da geração anterior na geração corrente, evitando a perda de boas soluções.

2.3. Transitórios

Para a determinação das máximas sobretensões que ocorrem nos circuitos analisados, é necessário lançar mão de uma rotina de cálculo de transitórios eletromagnéticos. Neste software foi implementado um programa tipo EMTP [2], contendo os elementos necessários para simulação. Devido às suas características peculiares, os circuitos de linhas de transmissão e de distribuição recebem tratamentos distintos quanto à modelagem dos fenômenos eletromagnéticos relevantes para cada situação.

As descargas atmosféricas são modeladas como fontes de corrente ideais, segundo a forma de onda tipo surto CIGRE 1,2/50 μ s. Os pára-raios são modelados por um elemento não-linear, dada sua curva $V \times I$, ou por uma chave controlada por tensão.

2.3.1. Linhas de Transmissão

Nas linhas de transmissão de energia elétrica, os desligamentos devidos à ruptura do isolamento serão causados por descargas que incidam diretamente na torre ou no meio do vão. As tensões induzidas por descargas indiretas não são capazes de provocar ruptura, pois são menores que o nível básico de isolamento da mesma.

Estudos realizados [3] em modelos de escala reduzida mostram que as torres podem ser representadas por elementos de parâmetros distribuídos com velocidade de propagação igual à velocidade da luz no vácuo e impedância característica baseada em sua geometria, como mostrado na figura 3.

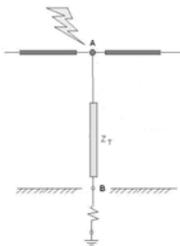


Figura 3: Modelagem da estrutura de LT

O ponto A é o mais alto da torre, sendo que neste incidem a maioria das descargas e onde estão ligados os cabos guarda para blindagem da linha de transmissão. O ponto B é o ponto de terra, onde se insere o modelo da impedância de aterramento, representada por uma resistência linear. Para linhas de transmissão, como a corrente que passa pela resistência de aterramento atinge valores muito elevados, o valor da resistência diminui em função da corrente, por causa da ionização do solo [3]. Essa resistência de aterramento é muito importante na ocorrência de descargas, pois ela determina o fator de reflexão nesta descontinuidade, onde a onda é refletida, depois de viajar pela estrutura.

Ao mesmo tempo, a onda de corrente viaja também pelo cabo-guarda, atingindo as outras estruturas da linha. Este cabo, por sua vez, é acoplado eletromagneticamente aos cabos das fases. Este acoplamento é tratado no cálculo dos parâmetros eletrogeométricos, que é feito antes da simulação. Pode-se, então, lançar mão de um quadripolo, representando as três fases além do cabo-guarda, como ilustrado na figura 4. Este acoplamento é tratado matricialmente no programa EMTP.

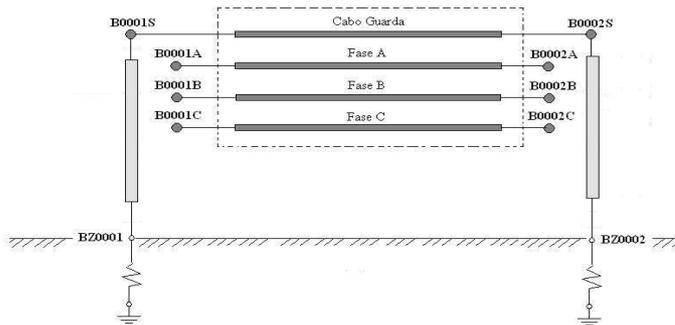


Figura 4: Circuito para LT

A ligação do pára-raios em cada torre é feita entre cabo condutor e torre. No entanto, a tensão no topo da torre em relação à terra (V_T) e a tensão no braço da torre em relação à terra (V_B), quando da incidência de uma descarga na torre, diferem muito pouco. É possível mostrar ([3], pág. 323), que V_T difere de V_B de apenas 1% de V_T , para a maioria das geometrias existentes de torres.

Assim, optou-se, no programa desenvolvido, por considerar o pára-raios ligado entre cabo condutor e cabo-guarda, conforme figura 5.

Note-se que é possível ligar pára-raios em cada fase isoladamente. Isso abre a possibilidade de arranjos de ligação diversos na linha como um todo.

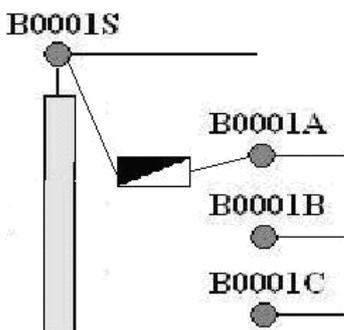


Figura 5: Ligação do pára-raios no modelo

2.3.2. Linhas de distribuição

Para as linhas de distribuição de energia elétrica não é feita a análise da ocorrência de descargas diretas, pois o seu efeito não é evitado pela colocação de pára-raios, a menos que estes sejam colocados em cada poste e tenham capacidade alta de condução de corrente de descarga. Desta forma, o estudo é limitado à determinação das tensões induzidas causadas por descargas indiretas, situação esta em que a colocação de pára-raios contribui para a melhoria do desempenho da linha.

2.4. Cálculo de Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas

O cálculo das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição é complexo. Há várias teorias que possibilitam esse cálculo. Elas variam, sobretudo, na modelagem da descarga e no cálculo do acoplamento eletromagnético descarga-linha.

A teoria implementada neste projeto foi desenvolvida por Sune Rusck na década de 1950 [4]. Ela oferece expressões analíticas para cálculos de sobretensões em linhas infinitas, expressões estas que podem ser modificadas para o tratamento de linhas finitas.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos nas últimas duas décadas por pesquisadores da UFMG sobre a implementação da teoria de Rusck em programas de transitórios. Esses trabalhos serviram de base para o desenvolvimento deste projeto.

2.5. Pára Raios

Como o pára-raios, elemento básico deste projeto, é um elemento não-linear, fez-se necessário a implementação deste tipo de elemento, no programa de cálculo de transitórios. O programa desenvolvido incorpora dois modelos para os pára-raios. Um modelo completo e um modelo simplificado.

2.5.1 - Modelo Completo

Este modelo considera a característica não-linear do pára-raios e dá a ela um tratamento matemático adequado e considera o Método de Compensação (procedimento iterativo).

O método da compensação consiste em simular os elementos não-lineares por fontes de corrente que são injetadas na parte linear da rede elétrica, conforme ilustra a figura 6.

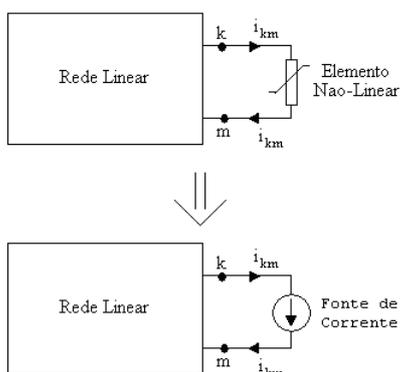


Figura 6: Modelo elementos não-lineares

2.5.2. Modelo Simplificado

Neste modelo o pára-raios tem dois estados de funcionamento: aberto e fechado, conforme Figura 7. Os estados são controlados pela tensão nos terminais do pára-raios.

Se a tensão for menor que o nível de proteção (V_0), o pára-raios estará em estado aberto. Do contrário, ele estará fechado. Neste estado ele é representado por uma fonte de tensão de valor V_0 .

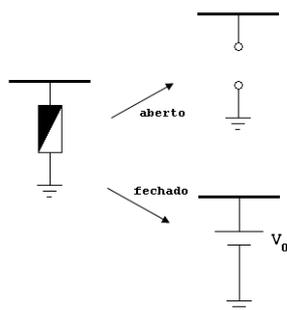


Figura 7: Modelo simplificado do pára-raios

2.6. Resultados

Demonstra-se a eficiência e versatilidade do software pelos resultados da simulação de duas linhas de transmissão, a saber:

- 1) Linha A: Constituída de 12 torres, tensão nominal de 138kV, com resistência de aterramento das torres constante e igual a 45 Ω . O comprimento dos vãos entre torres da linha bem como os valores médios dos espaçamentos entre condutores, alturas e tipo de condutores

nas estruturas são esquematicamente mostrados nas Tabelas 1 e 2.

2) Linha B: Constituída de 19 torres, tensão nominal de 138kV, com resistência de aterramento das torres constante e igual a 45 Ω . O comprimento dos vãos entre torres da linha bem como os valores médios dos espaçamentos entre condutores, alturas e tipo de condutores nas estruturas são esquematicamente mostrados nas Tabelas 3 e 4.

TABELA 1 – LINHA A: DADOS DA TORRE E NBI

| Cabo | Tipo de Cabo | Altura (m) | Espaçamento (m) | NBI (kV) |
|--------|--------------|------------|-----------------|----------|
| A | LINNET 336,4 | 18,79 | 0 | 650 |
| B | LINNET 336,4 | 16,44 | 5,1 | 650 |
| C | LINNET 336,4 | 14,13 | 0 | 650 |
| Guarda | 3/8'' | 22,68 | 2,05 | - |

O espaçamento horizontal entre fases é dado em relação à fase C.

TABELA 2 – LINHA A: ESPAÇAMENTO ENTRE TORRES

| Vão | Espaçamento (m) | Resistividade ($\Omega \cdot m$) | Resistência (Ω) |
|-----|-----------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 392,1 | 1000 | 45 |
| 2 | 63,4 | 1000 | 45 |
| 3 | 128,1 | 1000 | 45 |
| 4 | 284,5 | 1000 | 45 |
| 5 | 362,1 | 1000 | 45 |
| 6 | 372,2 | 1000 | 45 |
| 7 | 179,7 | 1000 | 45 |
| 8 | 715,1 | 1000 | 45 |
| 9 | 190,1 | 1000 | 45 |
| 10 | 156,6 | 1000 | 45 |
| 11 | 240 | 1000 | 45 |

TABELA 3 – LINHA B: DADOS DA TORRE E NBI

| Cabo | Tipo de Cabo | Altura (m) | Espaçamento (m) | NBI (kV) |
|--------|--------------|------------|-----------------|----------|
| A | LINNET 336,4 | 20,36 | 0 | 650 |
| B | LINNET 336,4 | 18,47 | 4 | 650 |
| C | LINNET 336,4 | 16,24 | 0 | 650 |
| Guarda | 3/8'' | 23,58 | 2,15 | - |

O espaçamento horizontal entre fases é dado em relação à fase C.

TABELA 4 – LINHA B: ESPAÇAMENTO ENTRE TORRES

| Vão | Espaçamento (m) | Resistividade ($\Omega \cdot m$) | Resistência (Ω) |
|-----|-----------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 240 | 1000 | 45 |
| 2 | 760 | 1000 | 45 |
| 3 | 195 | 1000 | 45 |
| 4 | 316 | 1000 | 45 |

| | | | |
|----|-------|------|----|
| 5 | 818 | 1000 | 45 |
| 6 | 177 | 1000 | 45 |
| 7 | 862 | 1000 | 45 |
| 8 | 484 | 1000 | 45 |
| 9 | 115 | 1000 | 45 |
| 10 | 577 | 1000 | 45 |
| 11 | 366 | 1000 | 45 |
| 12 | 449 | 1000 | 45 |
| 13 | 277 | 1000 | 45 |
| 14 | 188 | 1000 | 45 |
| 15 | 396 | 1000 | 45 |
| 16 | 47 | 1000 | 45 |
| 17 | 377,6 | 1000 | 45 |
| 18 | 227,7 | 1000 | 45 |

Os parâmetros de otimização utilizados são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – LINHA A: DADOS DA TORRE E NBI

| Caso | LT (Conf.) | Idesc (%) | NVar | Código |
|------|------------|-----------|------|--------------------|
| A | A (Torre) | 50 | 12 | S12I50_20X20_TORRE |
| B | A (Fase) | 50 | 36 | S12I50_20X20_FASE |
| C | B (Torre) | 50 | 19 | S19I50_20X20_TORRE |
| D | B (Fase) | 50 | 57 | S19I50_20X20_FASE |
| A1 | A (Torre) | 90 | 12 | S12I90_20X20_TORRE |
| B1 | A (Fase) | 90 | 36 | S12I90_20X20_FASE |
| C1 | B (Torre) | 90 | 19 | S19I90_20X20_TORRE |
| D1 | B (Fase) | 90 | 57 | S19I90_20X20_FASE |
| C2 | B (Torre) | 90 | 19 | S19I90_40X20_TORRE |
| D2 | B (Fase) | 90 | 57 | S19I90_40X20_FASE |

Para facilitar a identificação dos resultados foi adotado o seguinte código para identificação das figuras:

SxxIyy_PopxGer_Conf, onde: Sxx indica o número xx de torres, Iyy indica o valor da corrente de descarga atmosférica que incide na torre em termos do valor percentual assumindo uma distribuição lognormal. Pop indica o tamanho da população utilizada para o GA, Ger designa o número de gerações e Conf indica se a alocação é por torre ou por fase.

Assim, S12I50_20X20_TORRE significa que o sistema é de 12 torres, a corrente é a correspondente a 50% de probabilidade de ocorrência (31 kA), que na simulação foi adotada uma população com 20 indivíduos e 20 gerações e que a alocação dos para-raios foi por torre.

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 8 a 17.

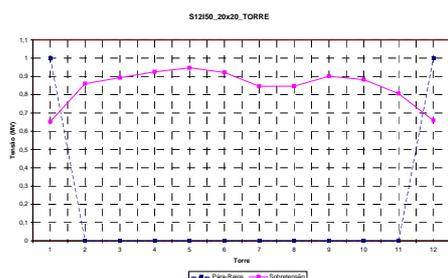


Figura 8: Caso A: Sobretensão máxima na torre para uma corrente de descarga de 31 kA (50%) e posicionamento dos pára-raios por torre, isto é três unidades por torre, um em cada fase.

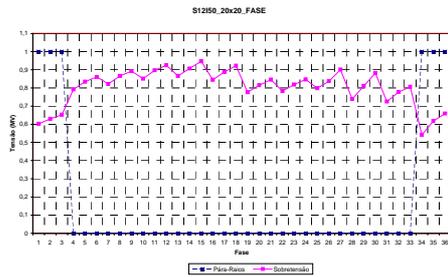


Figura 9: Caso B: Sobretensão máxima na fase para uma corrente de descarga de 31 kA (50%) e posicionamento dos pára-raios por fase (as fases 1, 2 e 3 correspondem à torre número 1; 4, 5 e 6 à torre número 2, e assim por diante).

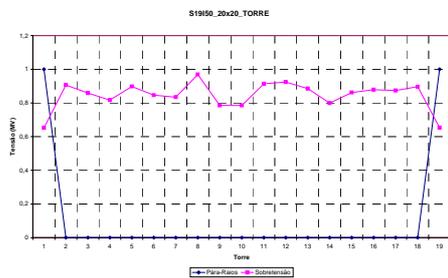


Figura 10: Caso C: Sobretensão máxima na torre para uma corrente de descarga de 31 kA (50%) e posicionamento dos pára-raios por torre, isto é três unidades por torre, um em cada fase.

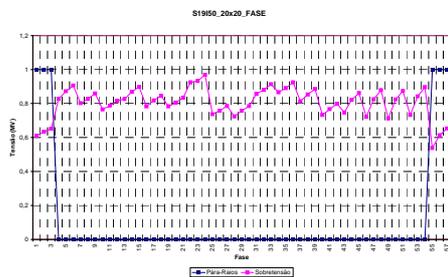


Figura 11: Caso D: Sobretensão máxima na fase para uma corrente de descarga de 31 kA (50%) e posicionamento dos pára-raios por fase (as fases 1,2 e 3 correspondem à torre número 1; 4, 5 e 6 à torre número 2, e assim por diante).

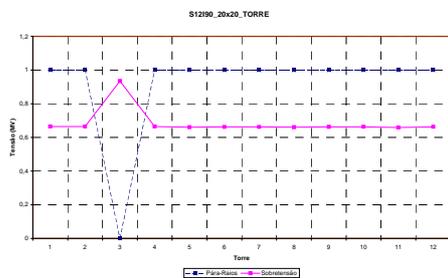


Figura 12: Caso A1: Sobretensão máxima na torre para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por torre, isto é três unidades por torre, um em cada fase.

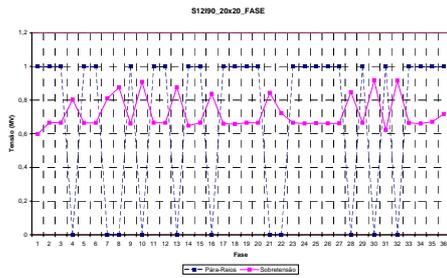


Figura 13: Caso B1: Sobretensão máxima na fase para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por fase (as fases 1,2 e 3 correspondem à torre número 1; 4, 5 e 6 à torre número 2, e assim por diante).

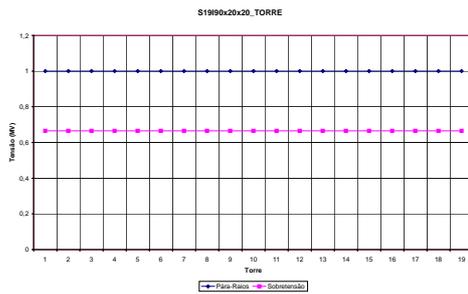


Figura 14: Caso C1: Sobretensão máxima na torre para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por torre, isto é três unidades por torre, um em cada fase.

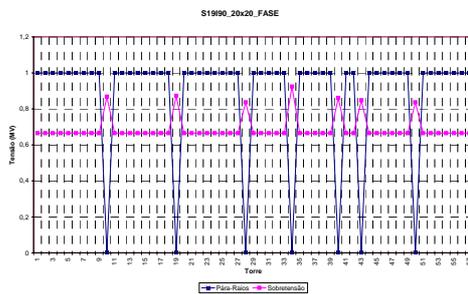


Figura 15: Caso D1: Sobretensão máxima na fase para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por fase (as fases 1, 2 e 3 correspondem à torre número 1; 4, 5 e 6 à torre número 2, e assim por diante).

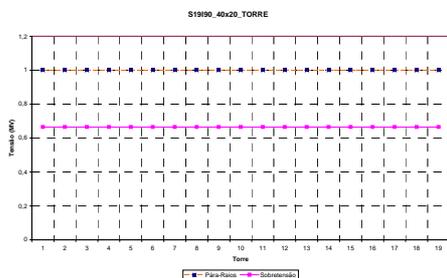


Figura 16: Caso C2: Sobretensão máxima na torre para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por torre, isto é três unidades por torre, um em cada fase. Este resultado foi obtido com uma população de 40 indivíduos.

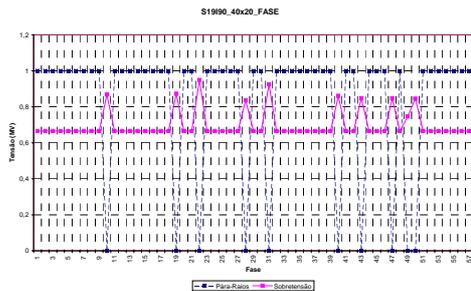


Figura 17: Caso D2: Sobretensão máxima na fase para uma corrente de descarga de 72,2 kA (90%) e posicionamento dos pára-raios por fase (as fases 1, 2 e 3 correspondem à torre número 1; 4, 5 e 6 à torre número 2, e assim por diante).

2.7. Análise dos resultados Caso a Caso

Casos A e B: Os resultados mostram que, para uma corrente de descarga de 31kA, forma padrão 1.2/50 μ s, a linha com 12 torres requer apenas pára-raios posicionados nas torres extremas, torres 1 e 12. Toda a linha fica assim protegida contra desligamentos. Deve ser salientado que o posicionamento de pára-raios nas torres adjacentes às subestações é uma condição assumida pelo APManger. O valor de 31kA para a corrente de descarga, assumindo uma distribuição lognormal, corresponde a uma probabilidade de 50%. Isto significa dizer que de todas as descargas atmosféricas, 50% terão valor de pico inferior a 31kA.

Casos C e D: A análise dos resultados para os casos C e D, obtidos através da simulação da linha com 19 torres, é similar aos casos A e B.

Casos A1 e B1: Estes resultados mostram que para uma corrente de descarga de 90%, supondo uma distribuição lognormal, as diferenças no posicionamento de pára-raios por torre ou por fase são significativas. Primeiramente, pode-se observar que no caso C (posicionamento por torre) são necessários 11 conjuntos de 3 pára-raios para proteger todo o sistema. No caso D (posicionamento por fase) este número é reduzido a 25 pára-raios, havendo, portanto, um ganho de 8 unidades de pára-raios.

Casos C1 e D1: A análise dos gráficos para estes dois casos mostra que na alocação por torre (Caso C1) foram necessários 19 conjuntos de 3 de pára-raios. Na alocação por fase são necessárias 50 unidades. Similarmente ao caso anterior, observa-se também que a alocação por fase proporciona uma economia de 7 unidades em relação à alocação por torre.

Casos C2 e D2: Os mesmos casos C1 e D1 foram novamente simulados, aumentando-se o tamanho da população de 20 para 40 indivíduos. Observa-se que não houve alteração nos resultados da alocação por torre (C1 e C2). Entretanto, observa-se um ganho no número de unidades de pára-raios do resultado de D2 se comparado com D1. Em D1 foram necessários 50 pára-raios e 47 em D2.

Finalmente, deve-se salientar que estes resultados foram obtidos considerando uma resistência de pé de torre de 45 Ω . Este valor de resistência já é suficiente para proporcionar sobretensões acima de 1.5xCFO, o que provocaria, em tese, a disrupção da isolação para sistemas de 138kV. As linhas A e B são reais, porém o valor da resistência de aterramento das torres é hipotético.

3. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado de forma didática a modelagem do problema de transitório eletromagnético de linhas de transmissão e distribuição e o algoritmo desenvolvido para se

efetuar a alocação otimizada de pára-raios. Os resultados mostram a flexibilidade do APManger, uma vez que é possível para as linhas de transmissão se fazer a alocação de pára-raios por torre ou por fase. Nas simulações apresentadas é possível verificar que há um ganho considerável quando se usa a alocação por fase, sendo que a Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina já fez uma primeira instalação utilizando este sistema e acompanha os resultados na estação de chuvas (novembro à março).

4. Referências bibliográficas

- [1] Vasconcelos, J. A., Ramirez, Jaime Arturo, Saldanha, Rodney Rezende, Takahashi, Ricardo Hiroshi Caldeira. Improvements in Genetic Algorithms. IEEE Transactions on Magnetics. USA: , v.37, n.5, p.3414 - 3417, 2001.
- [2] HW Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969.
- [3] R. Hileman. "Insulation Coordination for Power Systems". Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.
- [4] Rusck, Sune. "Induced Lightning Over-Voltages on Power-Transmission Lines with Special Reference to The Over-Voltage Protection of Low-Voltage Networks". Tese de Doutorado, Göteborg, 1957.
- [5] Paulino, J.O.S. "Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes Elétricas: Implementação da teoria de Rusck no EMTP; Estudo da influência das perdas na linha.", Exame de classificação para carga de professor da UFMG, Belo Horizonte, 1994.
- [6] Paulino, J.O.S., Araújo, A.E.A., Miranda, G.C. "Lightning Induced Voltage Calculation in Lossy Transmission Lines", IEEE Transactions on Magnetics, Vol 34, No. 5, Setembro de 1998.
- [7] Araújo, A.E.A, Paulino, J.O.S., Silva, J.P. , Dommel, H.W. "Calculation of lightning-induced voltage with RUSCK's method in EMTP. Part I: Comparison with measurements and Agrawal's coupling model". Electric Power Systems Research. Vol. 60, Setembro de 2001.
- [8] Silva, J.P., Araújo, A.E.A, Paulino, J.O.S. "Calculation of lightning-induced voltage with RUSCK's method in EMTP. Part II: effects of lightning parameter variations". Electric Power Systems Research. Vol. 61, Dezembro de 2001.
- [9] Araújo, A.E.A., Alves, W.L.A. "Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia". Belo Horizonte, Editora UFMG, 2005.