



EXSYS: Sistema Especialista Para Avaliar Sistemas de Distribuição de Energia Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas

**André Nunes de Souza, Anderson Murilo Oltremari,
Paulo Sérgio Silva, Maria Goretti Zago**
**LSISPOTI – Laboratório de Sistemas de Potência e
Técnicas Inteligentes**
FEB-UNESP
andrejau@feb.unesp.br

**Rodolfo Belinato Biazon,
Amaury Haga**
**Companhia Luz e Força
Santa Cruz**

RESUMO

Tanto nas linhas de distribuição urbanas quanto rurais, as descargas atmosféricas se configuram como a principal causa de interrupção no fornecimento de energia. Esta situação motivou o desenvolvimento de novas ferramentas para minimização do problema, considerando os aspectos técnicos e econômicos do setor. Consequentemente, levando-se em consideração tais aspectos, pesquisadores procuram uma forma de aumentar os níveis de proteção das linhas de distribuição reduzindo os custos de operação através da identificação dos pontos vulneráveis às descargas atmosféricas em um sistema de distribuição. Portanto, o objetivo desse estudo está pautado em três vertentes: i) analisar as metodologias utilizadas para estudo de sobretensões induzidas em linhas de distribuição, ii) desenvolver uma ferramenta computacional alternativa para identificação dos sistemas vulneráveis às descargas atmosféricas e iii) utilizar as ferramentas desenvolvidas para análise de uma linha de distribuição, levando-se em conta os aspectos técnicos e econômicos para melhoria da proteção através da instalação de pára-raios.

PALAVRAS-CHAVE

ATP/EMTP, descargas atmosféricas, pára-raios, sistemas de distribuição de energia, sobretensões induzidas.

1. INTRODUÇÃO

A extensão territorial, a localização próxima ao Equador Geográfico e algumas outras peculiaridades físicas e climatológicas fazem do Brasil um dos países de maior incidência de descargas atmosféricas. Nos sistemas de distribuição de energia, as descargas atmosféricas se tornaram uma das principais causas de interrupção não planejada no fornecimento de energia.

Para aprimorar a capacidade de se interpretar com mais clareza as sobretensões em linhas de distribuição causadas por descargas atmosféricas, novos modelos matemáticos que descrevem o

comportamento do processo de descargas atmosféricas têm sido elaborados, e novas técnicas computacionais têm sido desenvolvidas, com o objetivo de minimizar os efeitos dessas descargas nas linhas de distribuição (ALMEIDA et al, 2004).

Sendo assim, o objetivo desse estudo é o desenvolvimento de um software capaz de analisar o efeito das tensões induzidas em sistemas de distribuição urbanos e rurais, levando-se em consideração as características da linha modelada e o perfil da descarga atmosférica simulada.

O desenvolvimento do projeto se constitui em três etapas principais:

- i) analisar os métodos utilizados para estudo de sobretensões induzidas em linhas de distribuição;
- ii) desenvolver uma ferramenta computacional capaz de analisar os efeitos das tensões induzidas em linhas de distribuição através do uso do software ATP (Alternative Transient Program); e
- iii) utilizar o software desenvolvido para analisar a instalação de pára-raios para proteção do sistema de distribuição, levando-se em conta os aspectos técnicos e econômicos.

2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA

Após o estudo das abordagens utilizadas na proteção dos sistemas de distribuição de energia e dos modelos relacionados aos surtos de tensão atmosférica, foi possível a escolha da metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do projeto (SOUZA & OLTREMARI, 2004).

Com base nessa metodologia, foram desenvolvidos módulos computacionais básicos utilizando-se a linguagem de programação Microsoft Visual Basic 6, permitindo-se dessa forma a verificação e adaptação da metodologia, fornecendo base científica para o desenvolvimento do Sistema Especialista completo, batizado com o nome de ExSys (Expert System).

A escolha dessa linguagem se deve ao fato dela permitir acesso fácil aos recursos gráficos do Microsoft Windows, a banco de dados e à comunicação com o software ATP.

Após a definição da diretriz metodológica que foi empregada no projeto e o desenvolvimento dos módulos computacionais básicos ao funcionamento do software, foi desenvolvido o Sistema Especialista, integrando todos os conceitos estudados. Assim, foi criado um software onde o usuário é capaz de modelar as linhas de distribuição, inserir os pára-raios da linha, configurar as características da descarga atmosférica e verificar os efeitos da tensão induzida nas linhas através da simulação do sistema de distribuição, utilizando o software ATP.

Abaixo são mostrados os principais aspectos do software desenvolvido:

2.1. Configuração da Descarga Atmosférica

Para o cálculo das tensões induzidas nas linhas modeladas são necessários que sejam configuradas as características da corrente da descarga atmosférica. Para essa configuração, uma janela foi desenvolvida para permitir ao usuário o acesso às configurações da amplitude da corrente, tempo de pico, tempo de cauda e velocidade da descarga atmosférica. Também é possível escolher entre utilizar um modelo simplificado para a corrente em forma de triângulo ou utilizar o modelo de Heidler (PRIKLER & HÖIDALEN, 2002).

A janela permite uma pré-visualização da forma de onda da corrente da descarga atmosférica em um gráfico, permitindo-se que ajustes sejam efetuados no momento da configuração dos parâmetros. A Figura 01 exibe a janela dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica.

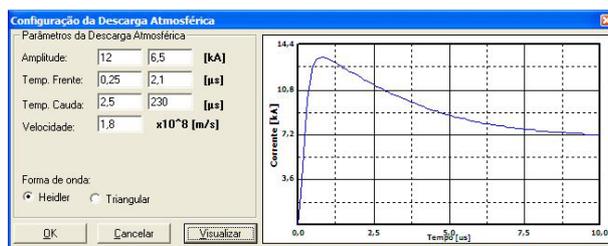


Figura 01. Configuração dos parâmetros da Descarga Atmosférica

2.2. Modelagem das Linhas de Distribuição

A modelagem das linhas de distribuição no Sistema Especialista é efetuada através de uma janela que permite ao usuário incluir os trechos principais da linha de distribuição, especificando-se o valor de resistência do condutor, altura da torre, altura da catenária, diâmetro do condutor e localização espacial de cada condutor no poste. Também devem ser configurados o comprimento da linha, a resistência do aterramento e os nós de entrada e de saída do trecho da linha, especificados pelo usuário.

Uma característica importante que foi adicionada ao software é a capacidade de especificação de casamento de impedância para os terminais de cada trecho modelado. Com isso, procura-se permitir uma maior flexibilidade na modelagem, levando-se em consideração as características das linhas modeladas. A Figura 02 exibe a janela de inclusão dos trechos principais da linha de distribuição.

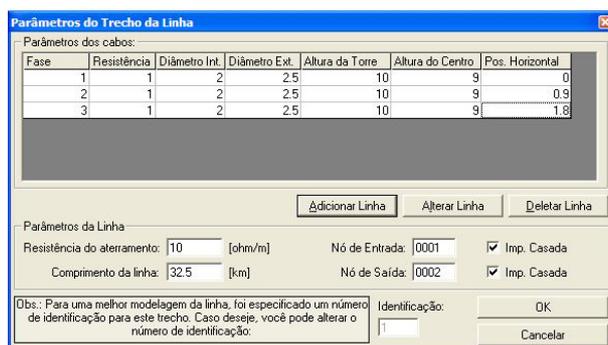


Figura 02. Inclusão dos trechos principais da linha de distribuição modelada no Sistema Especialista

2.3. Configuração dos pára-raios nas linhas de distribuição

Após a análise inicial das características dos pára-raios e sua forma de modelagem no software ATP foi possível desenvolver o módulo responsável pelo tratamento e inclusão dos pára-raios nas linhas de distribuição.

Através desse módulo é possível especificar a tensão de referência de cada pára-raio instalado na linha e incluir seus efeitos na simulação através do ATP.

De forma a possibilitar o acesso do usuário aos recursos da modelagem de linhas com pára-raios, foi criada uma interface gráfica que possibilita a inclusão de pára-raios ao longo da linha, através da especificação da localização do pára-raio, da sua tensão de referência e do condutor onde será instalado o pára-raio.

A interface desenvolvida trabalha com base nos trechos principais da linha modelados previamente e possibilita uma visualização da localização dos pára-raios na linha modelada e de suas principais características.

Nessa mesma interface foram inseridos os recursos para especificação da localização do ponto de queda da descarga atmosférica em relação ao trecho escolhido. Assim é possível ao software calcular a tensão induzida para cada trecho modelado, possibilitando a inclusão das fontes de tensão induzida na linha através dos módulos referentes ao cálculo da tensão induzida.

A Figura 03 exibe a janela de configuração dos pára-raios e da localização da descarga atmosférica.

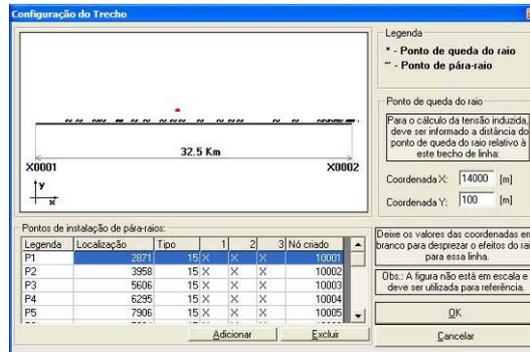


Figura 03. Especificação das características dos pára-raios para cada trecho e da localização do ponto de queda da descarga atmosférica

2.4. Cálculo das Tensões Induzidas para cada trecho modelado

Através da configuração das características da descarga atmosférica e do ponto de queda da descarga atmosférica em relação a cada trecho de linha de distribuição modelado no software é possível efetuar os cálculos das tensões induzidas para cada trecho através do modelo de Rusck (RUSCK, 1957).

Originalmente, Rusck propôs a forma de onda da corrente da descarga atmosférica como sendo uma função unitária com amplitude I . A tensão induzida na linha de distribuição pode ser calculada por:

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) \quad (1)$$

onde:

$$U(x,t) = 30 \cdot I \cdot h \cdot \beta \cdot \frac{(c \cdot t - x)}{[y^2 + \beta^2 (c \cdot t - x)^2]} \dots \dots [1 + \frac{x + \beta^2 (c \cdot t - x)}{\sqrt{(\beta \cdot c \cdot t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2)}}] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \approx \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{5 \cdot 10^5}{I}}} \quad (3)$$

Para as equações (1-3), $V(x,t)$ é a tensão induzida no ponto x ao longo da linha (m); t é o tempo (s); c é a velocidade da luz no espaço livre (m/s); I é a amplitude da corrente de passo unitário (A); h é a altura média da linha de distribuição (m) e y é a distância da descarga até o ponto mais próximo da linha (m).

Modificações foram efetuadas no modelo de forma que ele fosse capaz de calcular as tensões induzidas para qualquer forma de onda. Para isso, a forma de onda da corrente foi discretizada em passos unitários, com um atraso entre eles, sendo possível assim, o cálculo das tensões induzidas. Após calculada a tensão induzida, o software se encarrega de criar um novo nó para inserção das fontes de tensão induzida, permitindo-se assim, a simulação e análise dos efeitos da tensão induzida para cada trecho, levando-se em consideração suas particularidades e a disposição dos pára-raios instalados.

2.5. Simulação através do ATP

Depois de especificados todos os parâmetros referentes à descarga atmosférica e à característica da linha modelada, o software é capaz de criar todos os ‘arquivos de caso’ do ATP e executar rotinas para compilação dos trechos de linha modelados e simulação do sistema de distribuição inserido no software, incluindo as fontes de tensão induzidas, as resistências de aterramento, as resistências para casamento de impedância e os pára-raios adicionados.

O software é capaz de trabalhar com estágios de simulação previamente configurados, sendo possível assim, uma análise entre várias topologias de linhas, permitindo-se a escolha da melhor topologia para a rede, levando-se em conta características técnicas e econômicas.

A Figura 04 mostra a janela de simulações para uma linha modelada com 4 configurações diferentes.

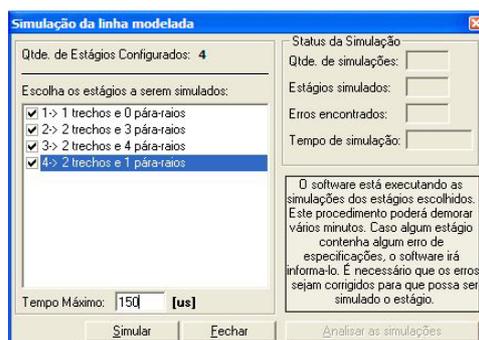


Figura 04. Janela das simulações em andamento

Como resultado, obtém-se um arquivo de saída do ATP onde pode ser encontrado o valor para tensão induzida nos nós especificados e que através de recursos gráficos podem ser analisados visualmente, obtendo-se valores de pico de tensão, o tempo de pico, o efeito da onda viajante, etc.

2.6. Ambiente gráfico para visualização dos resultados

Após efetuados todas as simulações configuradas, o software disponibiliza um ambiente gráfico para que as análises referentes aos efeitos das tensões induzidas nas linhas de distribuição sejam efetuadas. O software exibe uma lista com os nós onde a tensão da linha foi medida, permitindo a escolha do ponto a ser analisado.

A janela de saída gráfica também possui a capacidade de exportar o gráfico em formato BMP (Bitmap do Windows) ou JPEG (Joint Photographic Experts Group). Para efetuar análises dos resultados através de outros softwares como o Matlab, foi incluída uma rotina para exportação dos dados em formato ASCII, permitindo uma maior flexibilidade na análise dos resultados.

3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para avaliar a metodologia empregada e os recursos disponíveis no software desenvolvido, uma linha de distribuição foi modelada e quatro casos diferentes de instalação dos pára-raios foram simulados, verificando-se assim, os efeitos das tensões induzidas nas topologias empregadas.

A linha de distribuição foi modelada através de dois trechos principais, sendo que o primeiro trecho situado entre o nó 1 e o nó 2 possui 3 Km de comprimento e o segundo trecho situado entre o nó 2 e o nó 3 possui 2 Km de comprimento, ambos com 10 m de altura da torre, 10 m de altura da catenária e 20 Ω de resistência de aterramento. A linha de distribuição possui três fases com condutores de 1,356 Ω /m de resistência e 0,636 cm de diâmetro. Os nós 1 e 3 foram configurados com casamento de impedância como forma de diminuir os efeitos indesejáveis de reflexões de onda.

A descarga atmosférica foi simulada através do Modelo de Heidler com composição de duas ondas com amplitude de corrente de 40 kA e 5 kA, tempo de frente de 0,25 μ s e 2,1 μ s, tempo de meia onda de 2,5 μ s e 230 μ s e velocidade de descarga de $1,8 \times 10^8$ m/s. Foi suposto que o ponto de descarga estava distante 150 m do centro do trecho 1.

Os pára-raios que foram modelados são do tipo ZnO com tensão de referência de 15 kV. A Figura 05 mostra a topologia utilizada na simulação e o ponto de queda da descarga atmosférica.

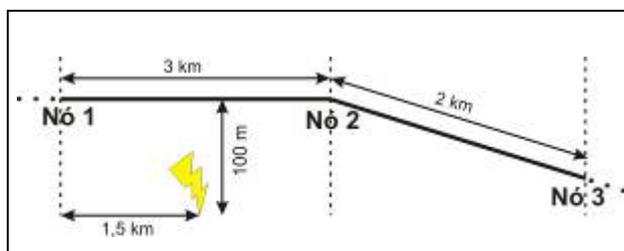


Figura 05. Linha de distribuição modelada no Sistema Especialista

3.1. Primeira Simulação: ausência de pára-raios na linha

Para a primeira simulação, a linha modelada foi sujeita aos efeitos da tensão induzida sem a proteção de pára-raios ao longo de sua extensão. A Figuras 06 mostra os gráficos da tensão induzida nos nós 1, 2 e 3.

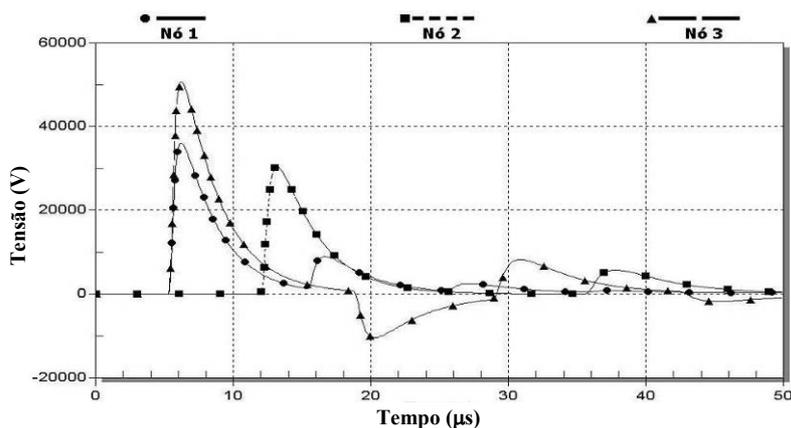


Figura 06. Simulação da linha modelada sem pára-raios

3.2. Segunda Simulação: pára-raios instalados nos nós 1 e 3

Para a segunda simulação, a linha modelada foi sujeita aos efeitos da tensão induzida com a proteção de pára-raios instalados sobre os terminais 1 e 3. A Figura 07 mostra os gráficos da tensão induzida nos nós 1, 2 e 3.

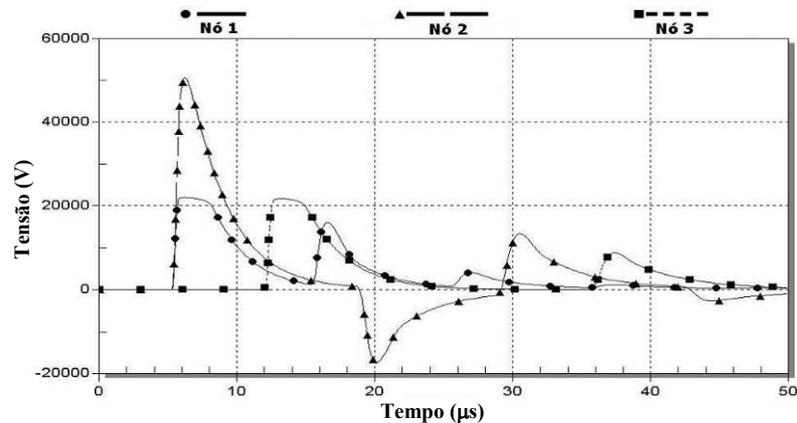


Figura 07. Simulação da linha modelada com pára-raios nos nós 1 e 3

3.3. Terceira Simulação: pára-raios instalados nos nós 1, 2 e 3

Para a terceira simulação, a linha modelada foi sujeita aos efeitos da tensão induzida com a proteção de pára-raios instalados nos nós 1, 2 e 3. A Figura 08 mostra os gráficos da tensão induzida nos nós 1, 2 e 3.

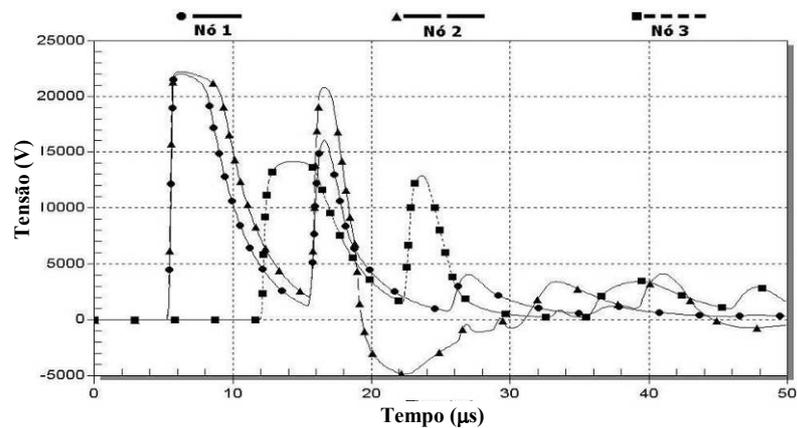


Figura 08. Simulação da linha modelada com pára-raios nos nós 1, 2 e 3

3.4. Quarta Simulação: pára-raios instalados a cada 500 m

Para a quarta simulação, a linha modelada foi sujeita aos efeitos da tensão induzida com a proteção de pára-raios instalados a cada 500 m. A Figura 09 mostra os gráficos da tensão induzida nos nós 1, 2 e 3.

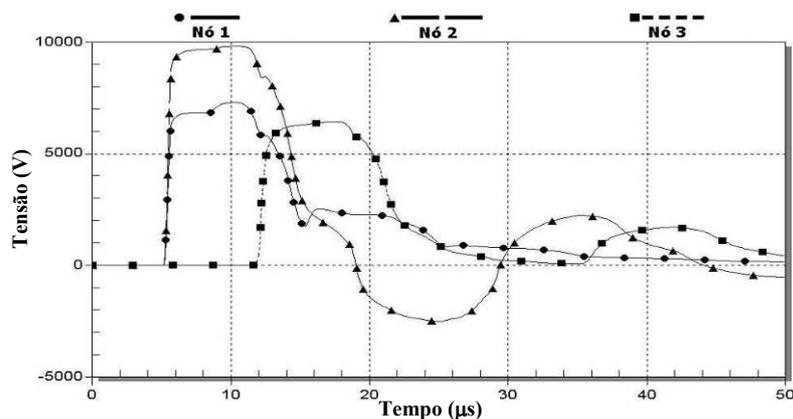


Figura 09. Simulação da linha modelada com pára-raios à cada 500 m ao longo da linha

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observando as Figuras 06-09 é possível analisar os efeitos das tensões induzidas nos nós 1, 2 e 3 para diversas configurações de linhas, permitindo-se assim, analisar as características da forma de onda, como a amplitude e o tempo de onda viajante entre os nós analisados.

Como resultado principal, pode-se verificar que a amplitude da tensão induzida diminui com a instalação de pára-raios ao longo da linha. O Quadro 01 exibe os valores para amplitude da forma de onda das simulações efetuadas.

Quadro 01. Valores de tensão induzida para os nós 1, 2 e 3 nas simulações efetuadas

	Tensões induzidas em kV			
	1ª simulação	2ª simulação	3ª simulação	4ª simulação
Nó 1	76,19	17,10	17,10	12,10
Nó 2	107,36	107,36	17,14	14,87
Nó 3	65,15	17,01	12,98	9,82

Para a primeira simulação, temos os maiores valores de amplitude, devido ao fato dos trechos modelados não possuírem pára-raios para sua proteção. Verifica-se também que a presença de terminais casados (nó 1 e 2), contribui para a diminuição dos efeitos de ondas refletidas, sendo assim, a tensão induzida apresenta valores menores nesses pontos.

Para a segunda simulação, a amplitude da tensão induzida no nó 2 se mantém alta devido ao fato da linha de distribuição possuir apenas dois pára-raios instalados com distância relativamente alta. Dessa forma, a atuação dos dois pára-raios só pode ser considerada nas proximidades dos nós onde estão instalados, não contribuindo para uma efetiva proteção de toda a linha.

Os valores de amplitude obtidos na terceira simulação podem ser aceitáveis dependendo do valor do NBI (Nível Básico de Impulso) dos equipamentos instalados nesses pontos. O nó 3 apresenta uma maior queda na amplitude da tensão induzida devido à atuação dos pára-raios instalados nos nós 2 e 3. Para a quarta simulação, obtém-se os menores valores para a amplitude da tensão induzida devido à instalação de um maior número de pára-raios ao longo da linha.

Por meio de uma simples análise é possível verificar que a melhor opção de topologia a ser adotada em um projeto de linha de distribuição seria a quarta simulação, porém a grande quantidade de pára-raios pode tornar a instalação inviável, sendo necessário efetuar melhores análises da distribuição dos pára-raios ao longo da linha, de forma a permitir uma avaliação mais segura da melhor topologia a ser adotada, levando-se em consideração os aspectos técnicos e econômicos.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desse estudo teve como meta avaliar as metodologias associadas à proteção dos sistemas de distribuição de energia frente aos problemas provenientes de descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição e desenvolver uma ferramenta computacional que permita a avaliação qualitativa dos valores das descargas atmosféricas induzidas em linhas de distribuição, levando-se em consideração o relacionamento da amplitude, da forma de onda, do aterramento e da frequência do fenômeno.

Devido à sua importância, a análise de modelos matemáticos que descrevem o comportamento de linhas de distribuição submetidas às tensões induzidas tornou-se a base da investigação científica deste estudo. Foi proposta então a realização de um estudo sobre o desenvolvimento de sistemas de distribuição, ajustando-se o isolamento da linha com os equipamentos necessários para sua proteção através do desenvolvimento de um Sistema Especialista.

Para esse estudo, optou-se por realizar a avaliação da metodologia a ser adotada através do desenvolvimento de módulos computacionais básicos programados em Microsoft Visual Basic, o qual possibilitou a investigação dos detalhes de modelagem, simulação, acesso à memória e tratamento de arquivos no ATP, o qual tem grande aceitação no meio científico.

O desenvolvimento dos módulos responsáveis pelas funções básicas do Sistema Especialista, tais como, os cálculos das tensões induzidas em linhas de distribuição com características próprias, levando-se em consideração a forma de onda da descarga atmosférica, a inserção das tensões calculadas nos arquivos de entrada do ATP, a modelagem das linhas de distribuição levando-se em conta seus aspectos reais, a possibilidade de configuração de vários estágios diferentes de simulação para uma mesma linha de distribuição, os recursos de simulação automáticos dos estágios selecionados e a exibição dos dados simulados através de meios gráficos permitindo o uso dos dados em outros softwares, possibilitaram o desenvolvimento da versão completa do Sistema Especialista.

Através de um estudo de caso, uma análise simplificada foi efetuada, de forma a oferecer uma visão geral do funcionamento do software, permitindo-se que o mesmo possa ser empregado em diversas análises de sobretensões induzidas, contribuindo para a redução de custos e melhoria da proteção dos sistemas de distribuição. Dessa forma, a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada pelas Concessionárias de Energia, contribuindo para uma distribuição de energia de maior qualidade, redução nas faltas de energia e danos aos equipamentos.

A pesquisa segue no sentido de um refinamento dos resultados obtidos, bem como no estabelecimento de novas diretrizes de proteção, com a adição dos transformadores no sistema.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Companhia de Luz e Força Santa Cruz pelo apoio financeiro, processo P&D 3-04/04, ciclo 2004/2005.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA F. S., et al. *Estimation of Protecting Distance Provided by Surge Arresters Installed Along the Medium Voltage Distribution Lines, Ground'2004*, pp. 204-208, Belo Horizonte - Brasil, Novembro, 2004.

LEUVEN EMTP CENTER *Alternative Transients Program – Rule Book*, Julho, 1987.

PRIKLER, L., HÖIDALEN, H. K. *ATDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP – User's manual*, Agosto, 2002.

RUSCK, S. *Induced lightning over-voltage on power transmission lines with special reference to over-voltage protection of low voltage networks*. Stockholm, Royal Institute of Technology, Ph.D. Thesis, vol. 1, 1957.

SOUZA, A. N., OLTREMARI, A. M. *Implementation of computational tools to improve the performance of rural lines related to lightning*. Ground'2004, pp. 262-265, Belo Horizonte - Brasil, Novembro, 2004.

SOUZA, A. N., OLTREMARI, A. M. *Expert System Software to Study the Behavior of Induced Voltages in Rural Lines*. SIPDA 2005 – International Symposium on Lightning Protection, pp. 63-67, São Paulo, 2005.

SOUZA, A. N., OLTREMARI, A. M. *Developments of Experts Systems to Study the Behavior of Induced Voltages in Rural Lines*. ISEMC2005 – The 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Petrópolis-RJ, 2005.

SOUZA, A. N., OLTREMARI, A. M. *A Computational Tool to Study the Induced Voltages on a Rural Line Due to Nearby Lightning*. ICLP-2006, Japão, 2006. (Artigo completo enviado para publicação).