
**DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES DE
CURTO-CIRCUITO E FENÔMENOS DE INDUÇÃO
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

GUSTAVO CHAVES PICARDI

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em ____ de _____ de 2012

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
1.1 – RELEVÂNCIA DO TEMA EM INVESTIGAÇÃO	7
1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO	8
1.3 – ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	8
DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	9
2.1 – INTRODUÇÃO	9
2.2 – METODOLOGIA	10
FENÔMENOS DE INDUÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
3.1 – INTRODUÇÃO	16
3.2 – ANÁLISE DO FENÔMENO	16
SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	19
4.1 – INTRODUÇÃO	19
4.2 – SOFTWARE DE MONOGRAFIA.....	19
4.3 – SIMULAÇÕES DOS FENÔMENOS DE INDUÇÃO EM LTS PELO ATP	27
CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

RESUMO

O cálculo da distribuição de correntes de curto-circuito em cabos pára-raios de linhas de transmissão (LTs) é fundamental para o dimensionamento adequado dos cabos pára-raios, das ferragens e isoladores que compõem os arranjos de cadeias das LTs. A ANEEL, nos leilões recentes de LTs da rede básica, tem definido níveis de curto-circuito nas subestações muito altos, da ordem de 50 kA, que impactam sobremaneira o dimensionamento dos componentes das LTs. O nível das correntes de curto-circuito não é o mesmo ao longo de toda a LT, sendo maiores nas proximidades das subestações e tendendo a estabilizar após alguns quilômetros. Assim, é muito importante conhecer a distribuição das correntes de curto para não sobredimensionar os componentes da LT e, assim, representar uma economia alta para a obra.

Conhecer a corrente de curto em cada torre da LT também é importante para o projeto de aterramentos das estruturas. Em determinados locais acessíveis a pessoas é necessário que as sobretensões estabelecidas no solo não ultrapassem os limites de segurança previstos por norma.

Ainda com relação ao bom dimensionamento dos componentes da LT, cabe ressaltar também os fenômenos de indução associados à natureza alternada das tensões do sistema. A ANEEL estabelece um limite de perdas nos cabos pára-raios das LTs (no máximo 5% das perdas dos cabos condutores). Assim, é importante avaliar as correntes induzidas nos cabos pára-raios. Será utilizado o software ATP (Alternative Transients Program) para essa avaliação, bem como para a verificação de outros problemas relacionados com indução em LTs.

Dentro deste aspecto, esse trabalho de conclusão do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência irá apresentar uma metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito distribuídas ao longo da LT, embasada em referências publicadas sobre o assunto no IEEE. Um dos objetivos deste trabalho consiste também na elaboração de um software para o cálculo dessas correntes. Além disso, avaliar alguns casos de problemas com tensões induzidas em circuitos próximos às LTs através do ATP.

ABSTRACT

The calculation of the distribution fault currents in ground wires of transmission lines (TLs) is essential for proper sizing of ground wires, insulators and fittings of composing arrangements of LTs. ANEEL, in recent auctions of TLs, has defined very high levels of fault currents in the substation, on the order of 50 kA, impacting greatly the design of the components of the TLs. The level of fault currents is not the same throughout the TL, being larger nearby substations and tending to stabilize after a few spans. Thus, it is very important to know the distribution of these currents in order not to overstate the components of TL and therefore represent a high economy for the project.

The knowledge of the fault current in each tower of TL is also important for the design of grounding systems. In certain locations accessible to people, it is necessary that the overvoltages established in the soil do not exceed the safety limits prescribed by standards.

Also regarding the proper sizing of the components of TL, it is also important to observe induction phenomena associated with alternating voltages of the system. ANEEL establishes a loss limit to the ground wires of TLs (maximum 5% loss of power conductors). Thus, it is important to evaluate the induced currents in ground wires. The software ATP (Alternative Transients Program) will be used for this assessment, as well as for the verification of other problems with induction in TLs.

In this respect, this work of completing the Specialization Course in Electrical Power Systems will present a methodology for calculating fault currents distributed along TLs, based on published references on this subject in the IEEE. One goal of this work is also a development of software for the calculation of these currents. Moreover, to evaluate some cases problems with induced voltages in circuits near the LTs by ATP.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Distribuição da Corrente de Curto-Circuito na Torre.....	10
FIGURA 2 – Circuito Equivalente do Curto-Circuito em uma LT Monofásica	10
FIGURA 3 – Circuito Equivalente do Curto-Circuito em uma LT Trifásica	13
FIGURA 4 – Circuito Trifásico Resultante no Local da Falta	14
FIGURA 5 – Saída do programa Desenvolvido no Matlab	20
FIGURA 6 – Corrente de Curto x Vão da LT em Curto.....	22
FIGURA 7 – Corrente de Curto x Vão da LT em Curto (Entre os vãos 10 a 190)	23
FIGURA 8 – Corrente no PR à Esquerda do Curto x Vão da LT em Curto	24
FIGURA 9 – Corrente no PR à Direita do Curto x Vão da LT em Curto	24
FIGURA 10 – Distribuição da Corrente de falta nos Cabos Pára-raios	25
FIGURA 11 – Fator P_k da Corrente I_g x Vão da LT (Curto em no vão 30)	26
FIGURA 12 – Fatores Q_k , R_k e S_k da Corrente I_g x Vão da LT (Curto em no vão 30)	26
FIGURA 13 – Silhueta das estruturas da LT 220 kV (esquerda) e LT 500 kV (direita)	27
FIGURA 14 – Circuito simulado no ATP	28
FIGURA 15 – Tensões induzidas nos cabos pára-raios da LT energizada.....	28
FIGURA 16 – Tensões induzidas na LT 220 kV com a	30
FIGURA 17 – Tensões induzidas no circuito 2 (desenergizado) da LT 500 kV	30
FIGURA 18 – Tensões induzidas na LT 200 kV com e sem transposição na LT 500 kV	31
FIGURA 19 – Tensões induzidas na LT 200 kV com carga desequilibrada na LT 500 kV	32
FIGURA 20 – Tensões induzidas no circuito 2 da LT 500 kV (a) e na LT 200 kV (b)	33
FIGURA 21 – Silhueta das estruturas da LT 60 kV (esquerda) e LT 220 kV (direita)	35
FIGURA 22 – Tensões induzidas na LT 60 kV estando a mesma energizada	35
FIGURA 23 – Tensões induzidas na LT 60 kV estando a mesma desenergizada.....	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparativo dos resultados entre a ref. [4] e o programa desenvolvido (A).....	21
TABELA 2 – Correntes nos cabos pára-raios nos vãos à esquerda do curto-circuito (A).....	21
TABELA 3 – Correntes nos cabos pára-raios nos vãos à direita do curto-circuito (A).....	21
TABELA 4 – Correntes induzidas nos Cabos Pára-raios e Perdas Associadas	29
TABELA 5 – Indução Eletrostática da LT 500 kV sobre a LT 220 kV.....	33

1 Introdução

1.1 – Relevância do Tema em Investigação

O correto dimensionamento de cabos pára-raios de linhas de transmissão (LTs) pode representar uma economia expressiva em um empreendimento de transmissão. Dentro deste contexto, conhecer a distribuição das correntes de curto-circuito ao longo das LTs é de suma importância. Durante décadas, especialistas e membros de grupos de pesquisa como o IEEE dedicaram esforços no desenvolvimento de algoritmos que modelassem da melhor maneira possível essa dispersão das correntes de curto ao longo das torres de transmissão e de seu sistema de aterramento. Na época em que tais modelos foram desenvolvidos, seus autores se deparavam com limitações computacionais e, diante disso, muitas vezes tinham que adotar aproximações que limitavam suas análises. Hoje em dia, com o desenvolvimento da eletrônica, há condição de extrapolar essas limitações e realizar análises mais sensíveis e que modelem os sistemas de potência de maneira mais adequada.

O conhecimento da distribuição das correntes de curto-circuito ao longo de LTs, além da importância econômica que pode representar, é também essencial para projetos de sistemas de aterramentos confiáveis e seguros. Muito comum é o fato de se encontrar torres de transmissão situadas em áreas urbanas, com grande circulação de pessoas. Neste âmbito o aterramento das estruturas vai além do foco principal dos aterramentos das torres, que é visa o desempenho frente a descargas atmosféricas. É necessário conhecer a corrente exata que fluirá pela estrutura e pelo aterramento durante um curto para se dimensionar adequadamente o sistema de aterramento.

Ainda dentro da perspectiva econômica do projeto de LTs é necessário conhecer as perdas que os cabos pára-raios podem impor ao sistema de transmissão. Essas perdas estão associadas à indução de *loops* correntes que circulam pelos cabos pára-raios e o sistema de aterramento. Conforme limites estabelecidos pela ANEEL, as perdas nos cabos pára-raios não

podem exceder a 5% das perdas nos cabos condutores e, portanto, a resistência máxima do cabo guarda (cabo pára-raios) deve ser estudada, já que está diretamente relacionada com as perdas.

1.2 – Objetivos do Trabalho

O objetivo principal desse trabalho é apresentar uma metodologia de cálculo fisicamente consistente para a distribuição da corrente de curto-circuito em cada torre de uma linha de transmissão e o desenvolvimento de um programa computacional a partir desta metodologia, com o foco no dimensionamento dos cabos pára-raios. Serão dados de entrada para o programa os parâmetros elétricos da LT, a corrente máxima de curto-circuito esperada para o sistema de transmissão e as resistências médias de aterramento das estruturas.

Importância será dada também à análise de fenômenos de indução em LTs. Tais fenômenos são fundamentais para avaliar as perdas de energia nos cabos pára-raios e para a verificação da influência eletromagnética pelo acoplamento em circuitos vizinhos, como por exemplo, distúrbios ocorridos em uma LT causadas por outra LT em paralelo. Serão apresentadas análises de casos práticos observados e análises de sensibilidade. Por fim, é mostrada a conclusão dos estudos envolvidos com o tema desta monografia.

1.3 – Organização do Texto

Este trabalho de monografia está dividido em capítulos que tratam de forma independente os dois âmbitos de análise em questão, ou seja, primeiramente no capítulo 2 é apresentada a metodologia de cálculo da distribuição das correntes de curto-circuito fase-terra ao longo das LTs e no capítulo 3 é tratado o fenômeno de indução no sistema de transmissão. Simulações computacionais de ambos os assuntos deste trabalho são apresentados no capítulo 4. Cabe ressaltar que os assuntos objetos de estudo deste trabalho, apesar de serem independentes em termos físicos, visam o melhor dimensionamento dos cabos pára-raios de LTs. Ao final são feitas as considerações e ponderações mais relevantes de forma a sintetizar o trabalho e a reafirmar a importância de se considerar os cabos pára-raios como um importante componente do sistema de transmissão.

2 Distribuição da Corrente de Curto-Circuito em Linhas de Transmissão

2.1 – Introdução

Durante a ocorrência de uma falta a terra, os cabos pára-raios das LTs, as estruturas metálicas e o seu sistema de aterramento são percorridos por altas correntes. Conhecer a magnitude dessas correntes é fundamental para o projeto do sistema elétrico de potência, tendo vista a segurança, operacionalidade e dimensionamento dos equipamentos.

Neste capítulo será apresentada a metodologia que serviu como base para o desenvolvimento do programa computacional elaborado neste trabalho.

Existem diversos trabalhos na literatura para [4,7,8,10] sobre este assunto. Para este trabalho foi escolhida a metodologia desenvolvida por Gooi e Sebo [4] pela versatilidade do algoritmo apresentado pelos autores. Esse algoritmo permite calcular o valor da corrente de curto-circuito fase-terra, seja envolvendo uma, duas ou três fases em qualquer ponto da LT. É possível modelar também a LT de forma bem consistente, representando todos os vãos entre as estruturas e as resistências de aterramento de cada torre. Assim, a aplicação prática deste tema abrange diversos aspectos de projeto do SEP, tais como: (i) determinar a corrente dos cabos pára-raios em diferentes pontos da LT; (ii) dimensionar adequadamente o diâmetro dos cabos pára-raios de forma que esses suportem as altas correntes de curto-circuito; (iii) calcular os potenciais nos sistemas de aterramento de SEs e LTs; (iv) calcular a performance e a confiabilidade de sistemas de aterramento; (v) calcular a interferência eletromagnética entre LTs e circuitos vizinhos (linhas de telecomunicações, gasodutos e ferrovias).

2.2 – Metodologia

Durante a ocorrência de um curto-circuito para a terra, as correntes que circulam na LT podem ser representadas pela Figura 1. Ambas as subestações (SEs) nos terminais da LT contribuem para a corrente total de falta. Geralmente o curto-circuito ocorre por um rompimento do isolamento como mostrado na Figura 1. As correntes fluem então a partir das fases e são distribuídas entre os cabos pára-raios, estrutura metálica e o sistema de aterramento.

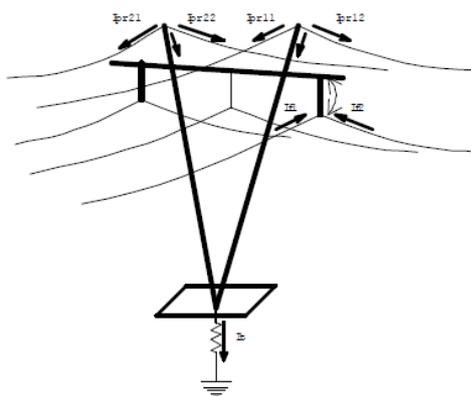


FIGURA 1 – Distribuição da Corrente de Curto-Circuito na Torre Retirado da Referência [6]

Com intuito de simplificar as análises, primeiramente será abordado o caso monofásico. A Figura 2 representa o circuito equivalente considerando uma fase e um cabo pára-raios. O curto-circuito é representado pela fonte no ponto V_{g1} , ou seja, o curto acontece no vão 1. Na outra extremidade é representada a impedância Z_{sp} da fonte da SE e a resistência R_{fp} da malha da SE. O condutor fase é representado pelo índice “p” e o cabo pára-raios pelo índice “g”. As resistências R_n correspondem às resistências do sistema de aterramento.

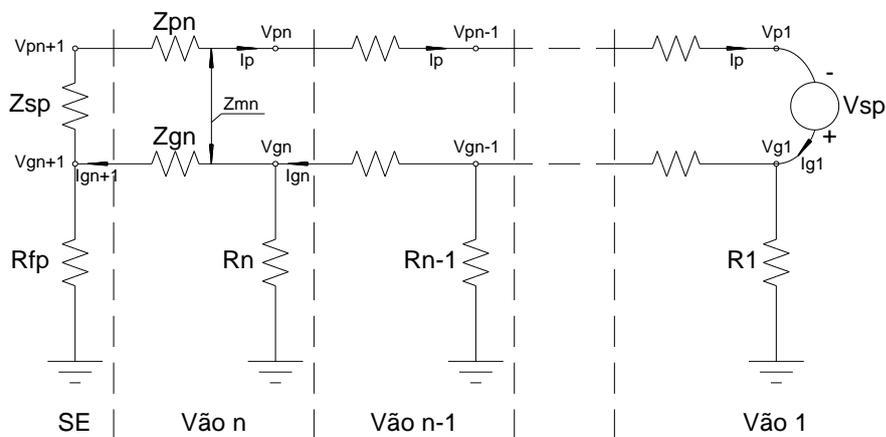


FIGURA 2 – Circuito Equivalente do Curto-Circuito em uma LT Monofásica Adaptado da Referência [4]

A polaridade da fonte V_{sp} é definida de forma que a corrente flua no sentido correto, ou seja, dos cabos fase para os cabos pára-raios.

Partindo da SE, no vão “n+1” da LT, a equação que relaciona as tensões e correntes é expressa pela matriz abaixo [4]:

$$\begin{bmatrix} V_{pn+1} \\ V_{gn+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(Z_{SP} - R_{FP}) & R_{FP} \\ -R_{FP} & R_{FP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11n+1} & Z_{12n+1} \\ Z_{21n+1} & Z_{22n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde $Z_{12n+1} = -Z_{21n+1}$.

Para o nó “n” a equação matricial correspondente será dada por:

$$V_{pn} = V_{pn+1} - I_p Z_{pn} + I_{gn+1} Z_{mn} \quad (2)$$

$$V_{gn} = V_{gn+1} + I_{gn+1} Z_{gn} - I_p Z_{mn} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{pn} \\ V_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{pn+1} \\ V_{gn+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_{pn} & Z_{mn} \\ -Z_{mn} & Z_{gn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{pn} \\ V_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11n+1} - Z_{pn} & Z_{12n+1} + Z_{mn} \\ Z_{21n+1} - Z_{mn} & Z_{22n+1} + Z_{gn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Equação (5) obtida por [4]

Percebe-se que a equação (5) expressa as tensões em termos da corrente no cabo pára-raios do vão anterior. Rearranjando a equação de forma que a mesma seja expressa pela corrente I_{gn} , obtém-se as seguintes equações:

$$V_{gn} = R_n (I_{gn} - I_{gn+1}) \quad (6)$$

$$V_{gn+1} + I_{gn+1} Z_{gn} - I_p Z_{mn} = R_n (I_{gn} - I_{gn+1}) \quad (7)$$

$$R_{fp} I_{gn+1} - R_{fp} I_p + I_{gn+1} (Z_{gn} + R_n) - I_p Z_{mn} - R_n I_{gn} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{(-R_{fp} - Z_{mn})}{R_n} I_p - I_{gn} + \frac{(R_n + R_{fp} + Z_{gn})}{R_n} I_{gn+1} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{pn} \\ V_{gn} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11n+1} - Z_{pn} & 0 & Z_{12n+1} + Z_{mn} \\ Z_{21n+1} - Z_{mn} & 0 & Z_{22n+1} + Z_{gn} \\ \frac{Z_{21n+1} - Z_{mn}}{R_n} & -1 & 1 + \frac{Z_{22n+1} + Z_{gn}}{R_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn} \\ I_{gn+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Equação (10) obtida por [4]

Usando-se de técnicas de redução de matrizes, a equação acima é transformada em uma matriz 2x2, resultando na expressão abaixo [4]:

$$\begin{bmatrix} V_{pn} \\ V_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_{11n+1} - Z_{pn}) - \left(\frac{Z_{21n+1} - Z_{mn}}{R_n} \right) \frac{(Z_{12n+1} + Z_{mn})}{\left(1 + \frac{Z_{22n+1} + Z_{gn}}{R_n} \right)} & \frac{(Z_{12n+1} + Z_{mn})}{\left(1 + \frac{Z_{22n+1} + Z_{gn}}{R_n} \right)} \\ (Z_{21n+1} - Z_{mn}) - \left(\frac{Z_{21n+1} - Z_{mn}}{R_n} \right) \frac{(Z_{22n+1} + Z_{gn})}{\left(1 + \frac{Z_{22n+1} + Z_{gn}}{R_n} \right)} & \frac{(Z_{22n+1} + Z_{gn})}{\left(1 + \frac{Z_{22n+1} + Z_{gn}}{R_n} \right)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_{gn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Da mesma maneira calcula-se a matriz de impedância para os demais vãos da LT. No local da falta a matriz da equação (11) é da seguinte forma [4]:

$$\begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{111} & Z_{121} \\ Z_{211} & Z_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{p1} \\ I_{g1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Subtraindo V_{g1} de V_{p1} [4]:

$$(V_{g1} - V_{p1}) = V_{sp} = (Z_{221} + 2Z_{211} - Z_{111})I_p \quad (13)$$

Onde $I_p = I_{g1}$.

Dessa forma calcula-se a corrente I_p , que é a corrente de falta do sistema. Conhecendo a corrente no local da falta é possível calcular a distribuição da corrente nos cabos pára-raios com a expressão abaixo [4]:

$$I_{gk} = E_k I_{g1} + F_k I_p \quad (14)$$

Onde E_k e F_k são os coeficientes de correntes de I_{g1} e I_p respectivamente e são determinados pelas seguintes expressões [4]:

$$E_k = \left(1 + \frac{Z_{22k-1}}{R_{k-1}} \right) E_{k-1} \tag{15}$$

$$F_k = \left(1 + \frac{Z_{22k-1}}{R_{k-1}} \right) E_{k-1} - \frac{Z_{22k-1}}{R_{k-1}} \tag{16}$$

No caso em que se desejar conhecer as correntes que descem pelas estruturas basta subtrair a corrente do cabo pára-raios do vão anterior e posterior à estrutura em análise.

Para circuitos trifásicos o circuito representativo é mostrado na Figura 3. O curto-circuito neste caso está sendo alimentado por ambas as SEs terminais da LT.

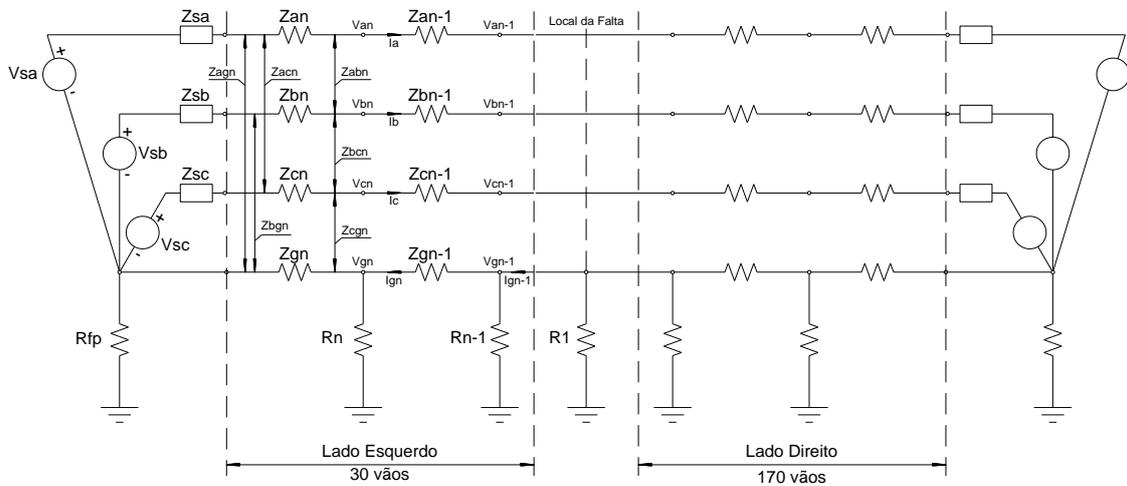


FIGURA 3 – Circuito Equivalente do Curto-Circuito em uma LT Trifásica Adaptado da Referência [4]

A relação entre as tensões e corrente no circuito trifásico é expressa pela seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{ak} \\ V_{bk} \\ V_{ck} \\ V_{gk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11k} & Z_{12k} & Z_{13k} & Z_{14k} \\ Z_{12k} & Z_{22k} & Z_{23k} & Z_{24k} \\ Z_{13k} & Z_{12k} & Z_{23k} & Z_{34k} \\ -Z_{14k} & -Z_{22k} & -Z_{34k} & -Z_{44k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ak} \\ I_{bk} \\ I_{ck} \\ I_{gk} \end{bmatrix} \tag{17}$$

Para a seção da SE à esquerda do curto-circuito os elementos da matriz de impedâncias são os seguintes:

- $Z_{ijk} = R_{fp}$ para $i \neq j$ e $i \neq 4$
- $Z_{ijk} = -R_{fp}$ para $i \neq j$ e $i = 4$
- $Z_{iik} = -(Z_{sp} + R_{fp})$ para $Z_{sp} = Z_{sa}$ ($i=1$), $Z_{sp} = Z_{sb}$ ($i=2$) e $Z_{sp} = Z_{sc}$ ($i=3$)

$$Z_{44k} = R_{fp}$$

Para a seção entre a SE até o local da falta a matriz de impedância é calculada da mesma forma como para o caso monofásico. Para o lado direito ao local da falta, as matrizes de impedância são calculadas também da mesma maneira. A equação matricial para os demais vãos da LT são representados pela equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_{ak} \\ V_{bk} \\ V_{ck} \\ V_{gk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ak+1} \\ V_{bk+1} \\ V_{ck+1} \\ V_{gk+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_{ak} & -Z_{abk} & -Z_{ack} & Z_{agk} \\ -Z_{abk} & -Z_{bk} & -Z_{bck} & Z_{bgk} \\ -Z_{ack} & -Z_{bck} & -Z_{ck} & Z_{cgk} \\ -Z_{agk} & -Z_{bgk} & -Z_{cgk} & Z_{gk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{gk+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Após o cálculo das matrizes de impedância para o lado esquerdo e direito do local da falta, o sistema equivalente resultante pode ser representado pela Figura 4.

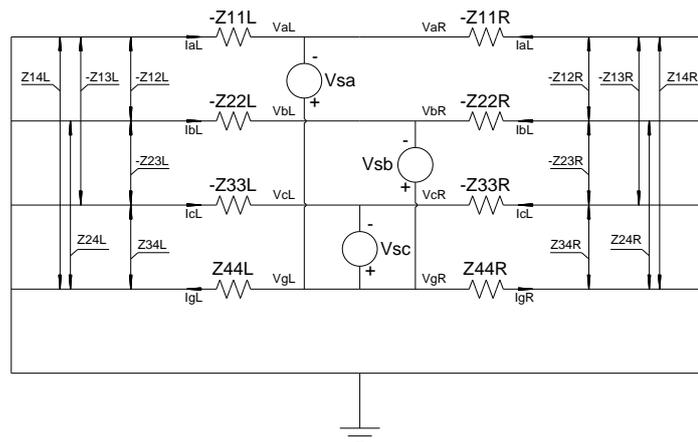


FIGURA 4 – Circuito Trifásico Resultante no Local da Falta Adaptado da Referência [4]

Fontes auxiliares são colocadas no local do curto-circuito e seus valores são os mesmos valores das tensões nas fases, no ponto de falta e no instante anterior à falta. A Figura 4 está representando um curto-circuito trifásico para a terra. Para modelar um curto de duas fases a terra basta retirar a fonte da fase que não está em curto, bem como no caso do curto fase-terra onde são retiradas duas fontes.

A condição de fronteira no ponto onde ocorre a falta é representada pelo sistema matricial da equação (19). Esse sistema matricial leva em consideração a matriz de impedância vista à esquerda e à direita do ponto de falta [4].

$$\begin{bmatrix} V_{gL} - V_{aL} \\ V_{gL} - V_{bL} \\ V_{gL} - V_{cL} \\ \Sigma I \\ V_{aL} - V_{aR} \\ V_{bL} - V_{bR} \\ V_{cL} - V_{cR} \\ V_{gL} - V_{gR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{14L} & -Z_{11R} & -Z_{24L} & -Z_{12R} & -Z_{34L} & -Z_{13R} & Z_{44L} & -Z_{14R} \\ -Z_{14L} & -Z_{12R} & -Z_{24L} & -Z_{22R} & -Z_{34L} & -Z_{23R} & Z_{44L} & -Z_{24R} \\ -Z_{14L} & -Z_{13R} & -Z_{24L} & -Z_{23R} & -Z_{34L} & -Z_{33R} & Z_{44L} & -Z_{34R} \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ Z_{11L} & -Z_{11R} & -Z_{12L} & -Z_{12R} & -Z_{13L} & -Z_{13R} & Z_{14L} & -Z_{14R} \\ Z_{12L} & -Z_{12R} & -Z_{24L} & -Z_{22R} & -Z_{23L} & -Z_{23R} & Z_{24L} & -Z_{24R} \\ Z_{13L} & -Z_{13R} & -Z_{23L} & -Z_{23R} & -Z_{33L} & -Z_{33R} & Z_{34L} & -Z_{34R} \\ -Z_{14L} & Z_{14R} & -Z_{24L} & Z_{24R} & -Z_{34L} & Z_{34R} & Z_{44L} & -Z_{44R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aL} \\ I_{aR} \\ I_{bL} \\ I_{bR} \\ I_{cL} \\ I_{cR} \\ I_{gL} \\ I_{gR} \end{bmatrix} \quad (19)$$

A resolução desse sistema matricial irá fornecer as correntes antes e depois do ponto de falta. A equação matricial anterior é válida para uma falta trifásica para terra. Quando o interesse é uma falta entre duas fases e a terra, a linha que representa a equação da falta que não está em curto é eliminada e a corrente da fase que não está em curto é a mesma em ambos os lados direito e esquerdo ao curto-circuito. Para a falta entre uma fase e a terra duas linhas das fases que não estão em curto são retiradas.

Para o cálculo das correntes nos cabos pára-raios nos demais vãos, conhecendo-se a corrente de falta I_{g1} , pode ser utilizada a expressão abaixo [4]:

$$I_{gk} = P_k I_{g1} + Q_k I_a + R_k I_b + S_k I_c \quad (20)$$

Onde:

$$P_k = \left(1 + \frac{Z_{44k-1}}{R_{k-1}} \right) P_{k-1} \quad (21)$$

$$Q_k = \left(1 + \frac{Z_{44k-1}}{R_{k-1}} \right) Q_{k-1} - \frac{Z_{41k-1}}{R_{k-1}} \quad (22)$$

$$R_k = \left(1 + \frac{Z_{44k-1}}{R_{k-1}} \right) R_{k-1} - \frac{Z_{42k-1}}{R_{k-1}} \quad (23)$$

$$S_k = \left(1 + \frac{Z_{44k-1}}{R_{k-1}} \right) S_{k-1} - \frac{Z_{43k-1}}{R_{k-1}} \quad (24)$$

As expressões acima podem ser utilizadas para o cômputo das correntes nos cabos pára-raios em ambos os lados direito e esquerdo ao curto-circuito.

3 Fenômenos de Indução em Linhas de Transmissão

3.1 – Introdução

Este capítulo visa destacar a importância do fenômeno de indução eletromagnética em LTs. Será abordado o fenômeno de indução de tensão em cabos pára-raios de linhas de transmissão em regime permanente realçando as perdas de energia associadas e também a indução de tensão em LTs que caminham em paralelo durante longos trechos, verificando a suportabilidade do isolamento dessas LTs diante de tais tensões induzidas.

Será considerada uma abordagem de circuitos elétricos para se avaliar o fenômeno. Os casos práticos deste tema serão tratados no Capítulo 4, onde são mostrados os resultados obtidos por meio de simulações no software ATP e comparados com valores apresentados em estudos realizados na época do projeto das LTs estudadas.

3.2 – Análise do Fenômeno

Uma linha de transmissão pode atuar como fonte de interferências eletromagnéticas de diversas maneiras, como por exemplo, a indução de tensões em condutores paralelos vizinhos, que podem ser outras linhas de transmissão, de telecomunicações, ferrovias, gasodutos, cercas, etc. Outro importante efeito desse fenômeno está relacionado à circulação de correntes induzidas em cabos pára-raios de LTs. Essas correntes se traduzem em perdas de energia ao longo do percurso das LTs.

A indução de tensões em circuitos desenergizados, na perspectiva de segurança dos operadores de manutenção da LT, também é um importante fator a ser verificado. Neste caso, a LT deve ser adequadamente aterrada para a proteção dos trabalhadores.

As tensões induzidas em condutores podem ser contabilizadas por meio da teoria de circuitos com a resolução da equação matricial (25), que relaciona as tensões e correntes no sistema em análise por meio da matriz de admitância do sistema [1].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} \\ Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Essa matriz pode representar uma linha de transmissão de circuito duplo onde os índices de 1 a 3 representam os condutores do primeiro circuito; 4 a 6 os condutores do segundo circuito e os índices 7 e 8 os pára-raios da LT. Conhecendo-se as tensões do primeiro circuito e estipulando que o segundo circuito esteja flutuando, ou seja, desenergizado (I_4, I_5 e I_6 iguais a zero), as tensões induzidas no segundo circuito (V_4, V_5 e V_6), devido ao acoplamento eletromagnético entre os circuitos, podem ser facilmente obtidas através da resolução do sistema matricial acima. Caso não seja de interesse conhecer as correntes que circulam nos cabos pára-raios, a matriz 8x8 acima pode ser reduzida para uma matriz 6x6 que contemple implicitamente a contribuição desses cabos pára-raios no sistema [1].

De forma análoga ao que foi feito para se determinar as tensões induzidas no circuito vizinho, pode-se encontrar também as correntes induzidas nos condutores do circuito vítima solucionando o sistema matricial (26) que relaciona as tensões e correntes dos condutores por meio das impedâncias do sistema [1].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} & Z_{17} & Z_{18} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} & Z_{27} & Z_{28} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} & Z_{37} & Z_{38} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} & Z_{47} & Z_{48} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} & Z_{57} & Z_{58} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} & Z_{67} & Z_{68} \\ Z_{71} & Z_{72} & Z_{73} & Z_{74} & Z_{75} & Z_{76} & Z_{77} & Z_{78} \\ Z_{81} & Z_{82} & Z_{83} & Z_{84} & Z_{85} & Z_{86} & Z_{87} & Z_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Neste caso, assume-se que as tensões no segundo circuito (V_4, V_5 e V_6) são iguais a zero e determinam-se as correntes através da resolução do sistema (26).

Os fatores que influenciam os valores das correntes e tensões induzidas estão diretamente relacionados com o acoplamento eletromagnético entre os condutores, ou seja, espaçamento entre as fases, altura dos condutores e transposições da linha. A corrente na linha também altera os níveis de indução, que será maior quanto maior for a corrente. Assim, é importante também verificar as solicitações do sistema próximo durante a ocorrência de um curto-circuito no circuito gerador.

4 Simulações Computacionais

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as simulações computacionais realizadas por meio do programa computacional desenvolvido neste trabalho de monografia (para cálculo da distribuição de corrente de curto-circuito ao longo de LTs) e as simulações realizadas por meio do software ATP para o cômputo de fenômenos eletromagnéticos de indução em LTs.

4.2 – Software de Monografia

Neste item são apresentados os resultados obtidos com o software elaborado por meio do pacote computacional Matlab R2008a. O software foi baseado na metodologia apresentada no Capítulo 2 e foi elaborado para o cálculo das correntes de curto de uma LT trifásica de circuito simples com um cabo pára-raios. O programa permite o cômputo das correntes de curto para os três tipos de falta a terra (trifásico, bifásico e monofásico).

Os dados de entrada são a matriz de impedância longitudinal da LT (4x4), o local da falta e os vãos onde se deseja conhecer as correntes que circulam nos cabos pára-raios. Neste programa foi considerado um vão típico de LTs e também uma resistência média de aterramento típica, porém com pequenas mudanças nos códigos do programa é possível modelar todos os vãos da LT com seu comprimento real e também a resistência de aterramento de cada estrutura. É possível também com a modificação das matrizes internas de cálculo estender a aplicação do programa para quaisquer configurações de LTs, como por exemplo, LTs de circuito duplo com dois cabos pára-raios.

Para validação do programa foi considerado o mesmo caso utilizado na referência [4]. A seguir e nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentados os dados de entrada, a saída do programa e uma comparação com os resultados obtidos pela referência [4].

Dados de Entrada:

$R_t = 3,33333$ *Resistências de aterramento das estruturas*
 $R_{fp} = 0,0333333$ *Resistência de aterramento da malha da SE*
 $Z_{sa} = 0, Z_{sb} = 0$ e $Z_{sc} = 0$ *Impedâncias associadas às fontes externas*
 $Z_a = 0,02432 + 0,19446i$ *Impedância da fase A*
 $Z_b = 0,02432 + 0,19446i$ *Impedância da fase B*
 $Z_c = 0,02432 + 0,19446i$ *Impedância da fase C*
 $Z_{ab} = 0,0159 + 0,0810833i$ *Impedância mútua entre as fases A e B*
 $Z_{ac} = 0,0159 + 0,0810833i$ *Impedância mútua entre as fases A e C*
 $Z_{bc} = 0,0159 + 0,0810833i$ *Impedância mútua entre as fases B e C*
 $Z_{ag} = 0,0159 + 0,0763476i$ *Impedância mútua entre a fase A e o cabo pára-raios*
 $Z_{bg} = 0,0159 + 0,0698567i$ *Impedância mútua entre a fase B e o cabo pára-raios*
 $Z_{cg} = 0,0159 + 0,0648667i$ *Impedância mútua entre a fase C e o cabo pára-raios*
 $Z_g = 0,03573 + 0,203560i$ *Impedância do cabo pára-raios*
 Número de vãos: 200
 Vão em curto: 30
 Tipo da falta a terra: 1 (monofásica)
 Vão à esquerda para cálculo da corrente no cabo pára-raios: 3
 Vão à direita para cálculo da corrente no cabo pára-raios: 3

Saída do Programa:

```

Programa para cálculo da Distribuição de Correntes de Curto-Circuito em LTS
Vão em curto: 30
Entre com o tipo de falta: 1

imod =

    38688
    6810.2
    74.696
    74.696
    61.155
    61.155
    31332
    14170

IF =

    45498

Corrente no pára-raios - Vão à esquerda: 3
Corrente no pára-raios - Vão à direita: 3

IgL =

    27163

IgR =

    12355
  
```

FIGURA 5 – Saída do programa Desenvolvido no Matlab

TABELA 1 – Comparativo dos resultados entre a ref. [4] e o programa desenvolvido (A)

I	Falta 3Ø a terra		Falta 2Ø a terra		Falta 1Ø a terra	
	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa
If	2676	2276	33206	33042	45531	45498
IaL	59217	59724	52026	53022	38700	38688
IaR	10450	10545	9187	9310	6831	6810
IbL	58377	58723	53068	53388	7	75
IbR	10302	10401	9360	9501	7	75
IcL	57917	57654	6	45	8	61
IcR	10221	10186	6	45	8	61
IgL	-	3176	-	22676	-	31332
IgR	-	951	-	10463	-	14170

TABELA 2 – Correntes nos cabos pára-raios nos vãos à esquerda do curto-circuito (A)

Vão	Falta 3Ø a terra		Falta 2Ø a terra		Falta 1Ø a terra	
	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa
3	3013	2867	18504	19449	25119	27163
15	3639	4091	10379	13179	14040	18277
27	3607	3528	10689	10769	14639	14798

TABELA 3 – Correntes nos cabos pára-raios nos vãos à direita do curto-circuito (A)

Vão	Falta 3Ø a terra		Falta 2Ø a terra		Falta 1Ø a terra	
	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa	Ref. [4]	Programa
3	67	867	9972	9042	13172	12355
85	637	610	1875	1852	2578	2559
167	636	610	1900	1852	2595	2559

Conforme pode ser verificado na Tabela 01, os resultados obtidos com o programa desenvolvido estão muito coerentes com a referência [4]. Os recursos computacionais da época em que o algoritmo foi elaborado [4], com pouco limite para as memórias computacionais, limitavam os cálculos. Como o programa se baseia em processos recursivos, onde uma operação é requisito para a próxima, erros de arredondamento de números podem explicar as pequenas diferenças que foram observadas. Os valores extremamente baixos na Tabela 01 das correntes das fases que não estão em falta, nos resultados da referência [4], fazem pouco sentido, pois a proximidade entre os condutores já indicaria correntes maiores causadas pela indução da fase que está em falta.

Nas Tabelas 02 e 03 estão destacadas as correntes nos cabos pára-raios à esquerda e à direita do curto, respectivamente. Novamente pode ser observada a coerência dos resultados, exceto pelo valor 67 A na Tabela 03, da referência [4]. Esse valor não pode estar correto já que a corrente no IgR no primeiro vão, conforme a Tabela 01 é de 951 A. Os resultados da referência [4] mais discrepantes na Tabela 2, referentes às faltas envolvendo duas fases e uma fase à terra no vão 15 estão incoerentes fisicamente, pois seus valores em [4] estão menores do que no vão 27.

O programa foi também adaptado para gerar gráficos que facilitam o entendimento do fenômeno. A Figura 06 a seguir representa os valores de corrente de curto possíveis na LT, em função do vão onde ocorre o curto-circuito. Devido à impedância da fonte ter sido considerada nula neste exemplo, quando a falta ocorre nos vãos próximos às SEs a corrente de curto tende a infinito. Verifica-se então que o curto é muito severo quando incide próximo das SEs e cai rapidamente à medida em que ocorre no meio da LT, atingindo um patamar praticamente fixo, em função da característica da LT e do sistema elétrico de potência.

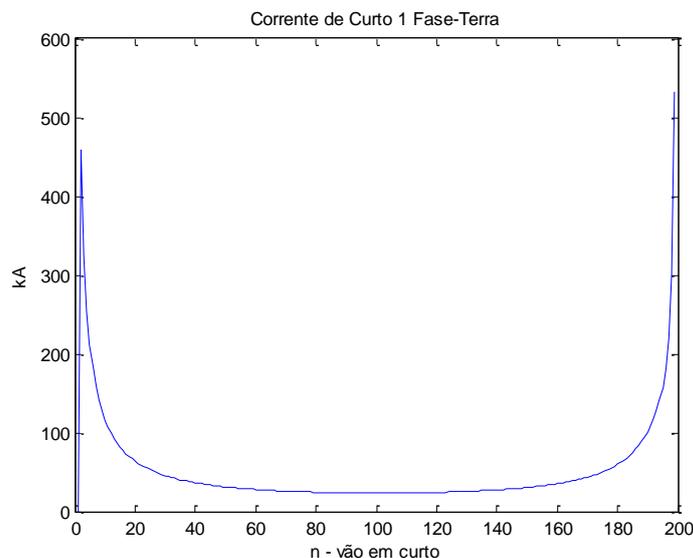


FIGURA 6 – Corrente de Curto x Vão da LT em Curto

A Figura 07 apresenta uma ampliação do gráfico na área entre os vãos 10 a 190 para eliminar o efeito das altas correntes próximas das SEs. Assim é possível verificar melhor como varia a intensidade do curto em função de sua ocorrência ao longo da LT.

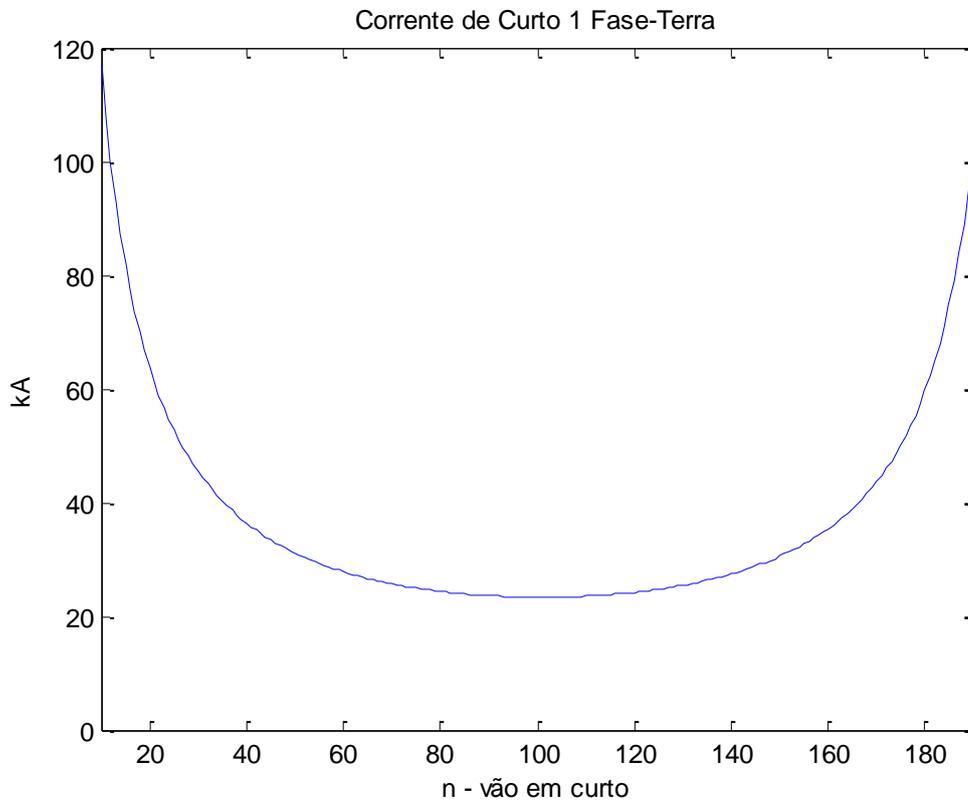
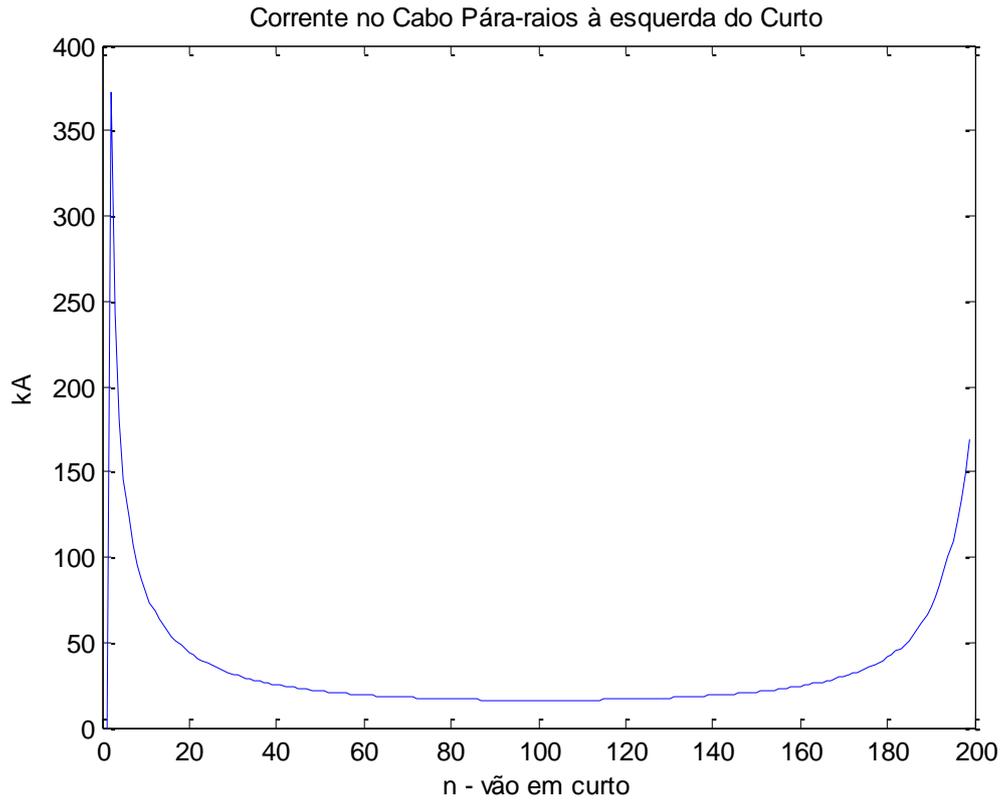
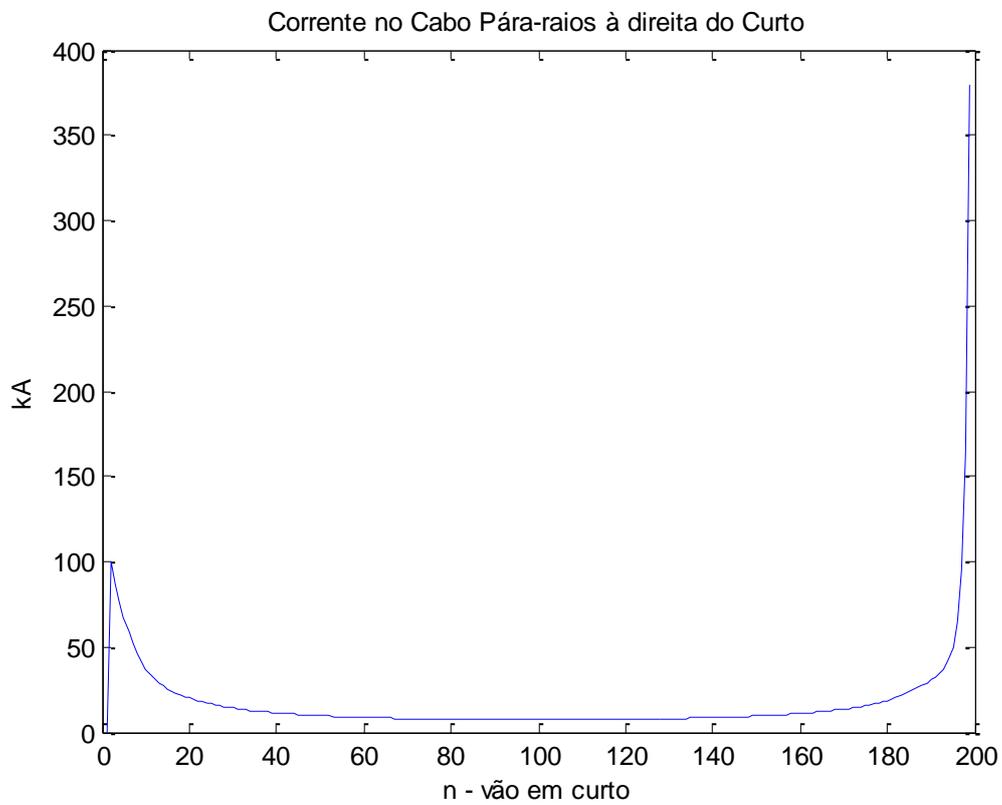


FIGURA 7 – Corrente de Curto x Vão da LT em Curto (Entre os vãos 10 a 190)

Na Figura 08 é mostrada a corrente no cabo pára-raios que flui para esquerda do ponto de falta. Essa corrente é maior também nas proximidades da SE e tende a um patamar na medida em que o curto ocorre no meio da LT. Comparando a corrente de falta próximo às SEs pode ser verificado que a corrente é maior na vizinhança da SE da esquerda do que na vizinhança da SE da direita, já que a impedância vista pela corrente que flui para a esquerda é muito maior no terminal da direita. Esse fato é também verificado na Figura 09, porém a situação é o inverso, ou seja, a corrente de falta que flui para a direita é maior próximo da SE da direita do que da SE da esquerda devido a uma impedância menor vista por esta corrente neste ponto.

**FIGURA 8 – Corrente no PR à Esquerda do Curto x Vão da LT em Curto****FIGURA 9 – Corrente no PR à Direita do Curto x Vão da LT em Curto**

A Figura 10 simula uma falta fase-terra ocorrendo no vão 30 da LT, conforme Figura 03 e mostra como se distribui a corrente de curto nos cabos pára-raios ao longo da LT. A corrente é máxima no ponto da falta e decai à media que se propaga para as SEs. Como o curto ocorreu mais próximo da SE da esquerda a impedância vista do ponto de falta para a direita é muito maior e com isso a corrente decai mais rapidamente ao se propagar para a direita, se estabilizando alguns vãos depois.

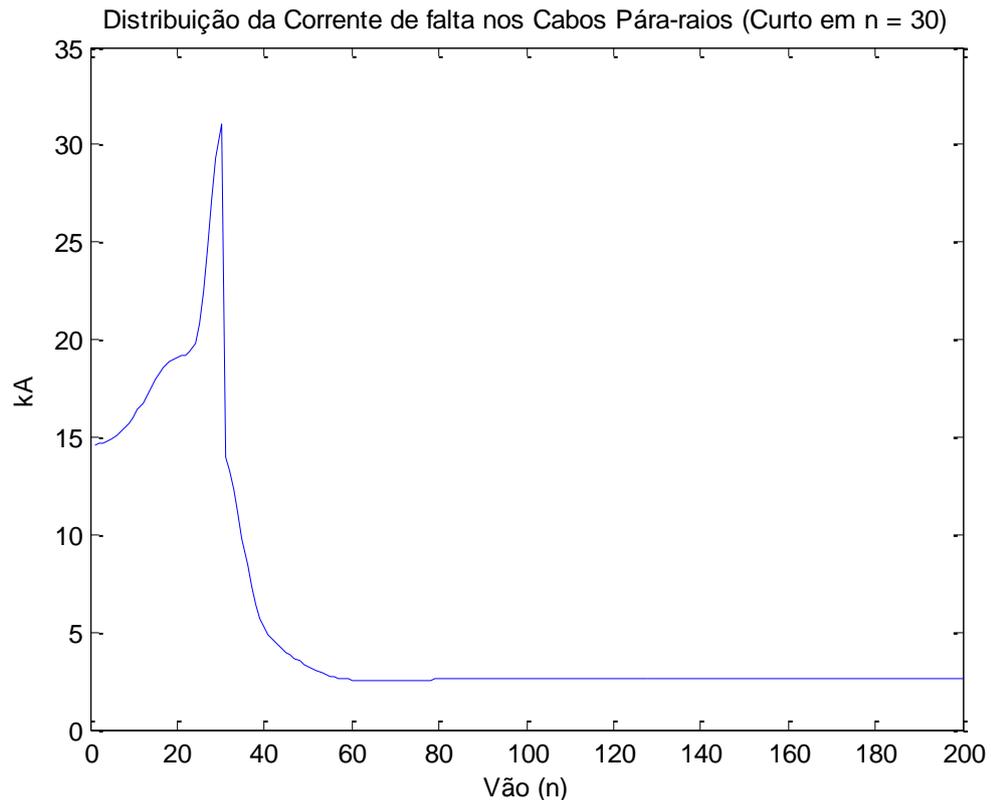
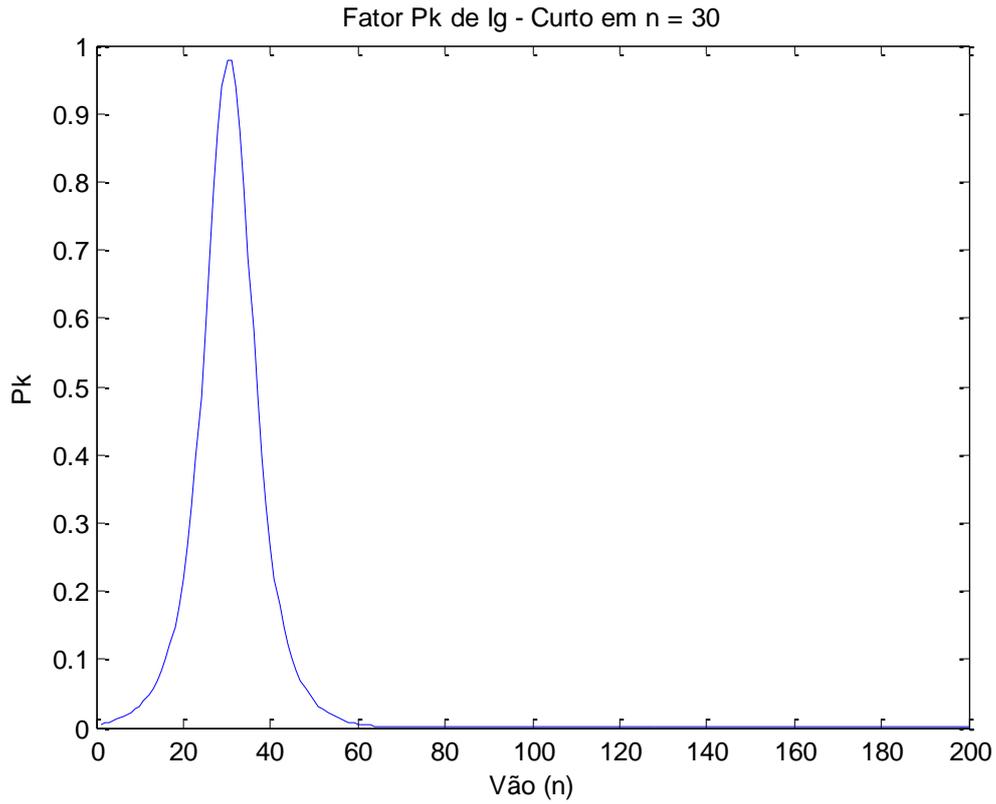
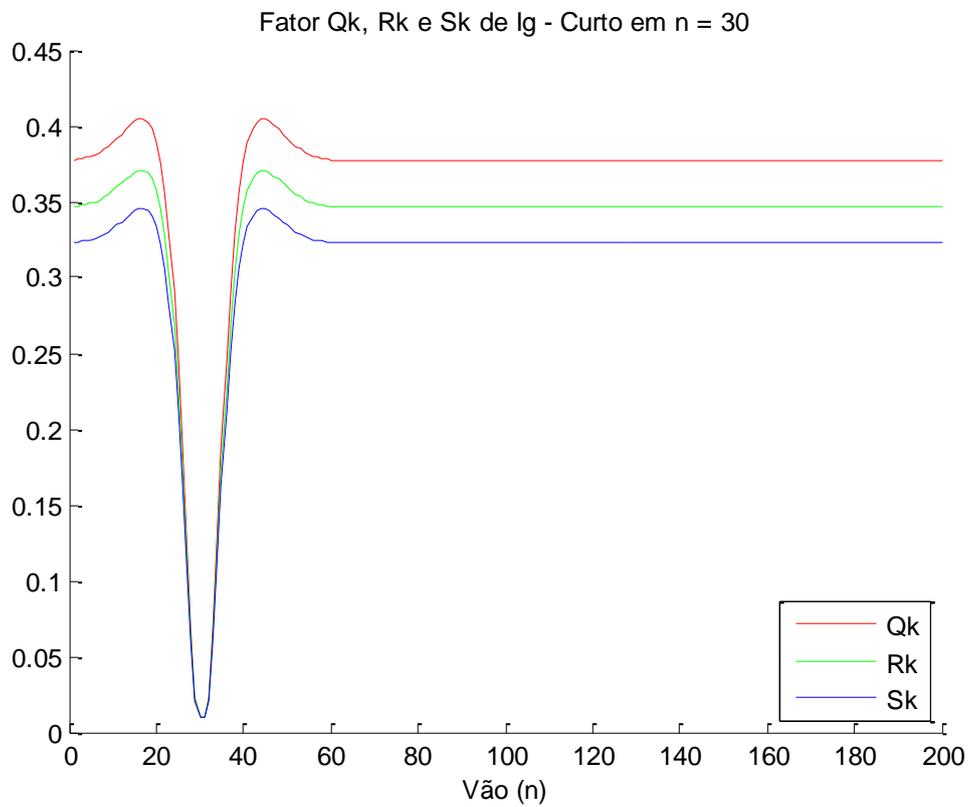


FIGURA 10 – Distribuição da Corrente de falta nos Cabos Pára-raios

As Figuras 11 e 12 mostram os coeficientes da equação (20). O fator P_k está relacionado à corrente que circula no próprio cabo pára-raios. Seu valor é próximo de um na região do curto e decai à medida que a corrente se propaga. Os fatores Q_k , R_k e S_k estão relacionados às contribuições das fases para a corrente que circula no cabo pára-raios. A contribuição das fases é praticamente nula próxima ao curto e cresce rapidamente ao se distanciar do mesmo. A fase “a” apresenta uma contribuição maior devido à sua maior proximidade em relação ao cabo pára-raios.

**FIGURA 11 – Fator Pk da Correte Ig x Vão da LT (Curto em no vão 30)****FIGURA 12 – Fatores Qk, Rk e Sk da Correte Ig x Vão da LT (Curto em no vão 30)**

4.3 – Simulações dos fenômenos de Indução em LTs pelo ATP

Será apresentada neste item a simulação de tensões e correntes induzidas em duas LTs reais: LT 2x500 kV Ancoa – Alto Jahuel (Chile) e LT 60 kV Uige I – Negage (Angola) [2,3]. No primeiro caso, a LT 500 kV será tratada como fonte da interferência eletromagnética e, no segundo caso a LT 60 kV será o circuito vítima.

LT 2x500 kV Ancoa – Alto Jahuel (Chile):

- LT paralela: LT 220 kV Colbún – Alto Jahuel;
- Ambas de circuito duplo;
- Extensão de 255 km;
- As LTs são paralelas durante praticamente todo o percurso, com uma distância média entre eixos de 75m;
- Silhuetas conforme Figura 13.

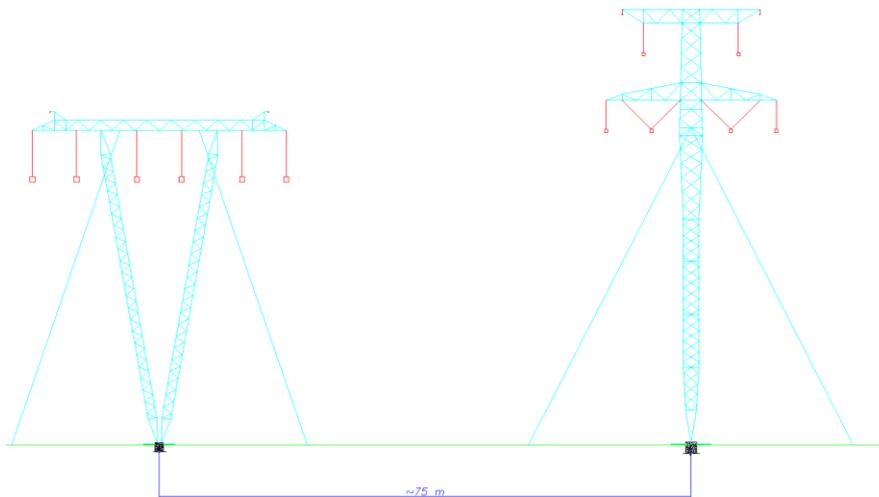


FIGURA 13 – Silhueta das estruturas da LT 220 kV (esquerda) e LT 500 kV (direita)

Devido à extensão das LTs, foi considerada a transposição das LTs com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total. O circuito composto pelas LTs foi simulado no ATP conforme Figura 14. Foram representadas torres de ambas as LTs a cada trecho de 5 km. A resistência de pé-de-torre considerada foi de 20 Ω e a das malhas de aterramento das SEs de 2 Ω . Considerou-se ainda a LT alimentando uma carga trifásica de 750 Ω , sendo esse valor definido de forma a se obter a corrente nominal da LT.

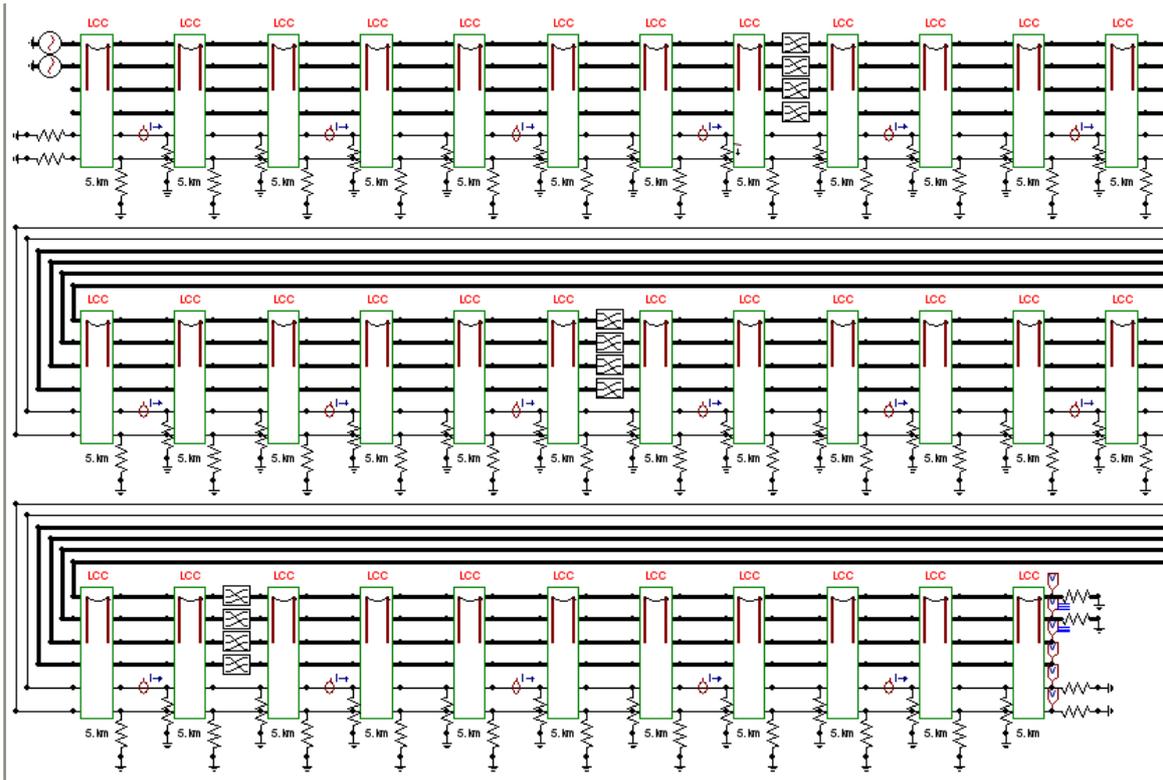


FIGURA 14 – Circuito simulado no ATP

A correta modelagem do circuito e a análise crítica dos resultados do ATP são de fundamental importância para que se obtenham resultados compatíveis com o que acontece na prática.

Primeiramente, foi verificada a indução de correntes e tensões nos cabos pára-raios da própria LT 500 kV. A Figura 15 mostra a variação das tensões induzidas nos cabos pára-raios ao longo da LT.

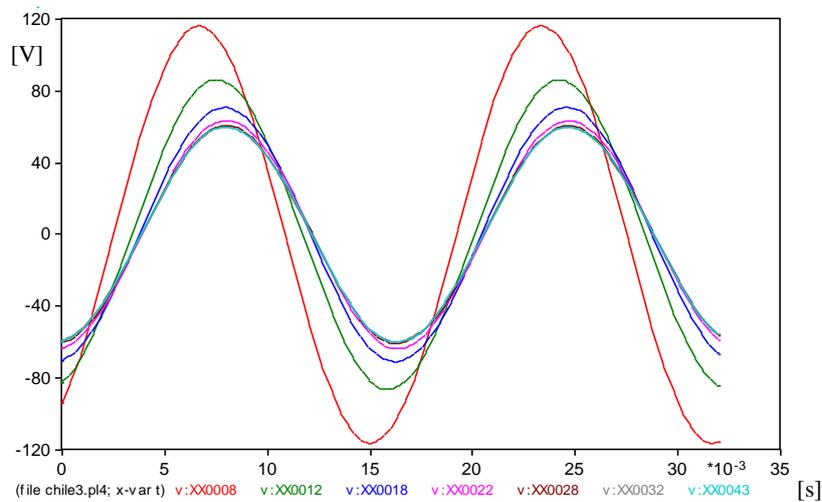


FIGURA 15 – Tensões induzidas nos cabos pára-raios da LT energizada

Como pode ser verificado, as tensões são maiores próximas à fonte e decrescem à medida que se afasta da mesma. Os níveis de tensão induzida são da ordem de algumas dezenas de volts. Tais tensões estabelecem a circulação de correntes nos cabos pára-raios, sendo que parte dessa corrente desce pela torre e parte segue para o próximo vão. A cada trecho de 10 km foi calculada a corrente que circula pelos cabos pára-raios, sendo discriminada na tabela a seguir a corrente por trecho e a perda de energia associada ($R.I^2$). As perdas nos cabos pára-raios não devem exceder a 5% das perdas nos cabos condutores, conforme recomendações da ONS (Operador Nacional do Sistema). Sendo que as perdas nos cabos condutores podem simplificarmente ser calculadas por $3.R.I_N^2$, no caso da LT em análise, a corrente nominal da LT ocasiona uma perda de 25 MW. Dessa forma, considerando a perda apresentada na Tabela 4, o valor em percentual da perda nos cabos pára-raios em relação aos cabos condutores é de 0,7%, valor esse que atende aos procedimentos da ONS.

TABELA 4 – Correntes induzidas nos Cabos Pára-raios e Perdas Associadas

Km	I (A)	R.I² (W)
5	53,41	4688,782
15	52,32	9185,146
25	46,52	8167,195
35	31,36	5505,626
45	30,07	5279,69
55	42,87	7526,631
65	47,4	8322,371
75	48,37	8492,443
85	48,23	8467,615
95	47,52	8343,475
105	45,44	7977,26
115	39,68	6965,516
125	26,96	4733,472
135	27,16	4768,232
145	37,92	6656,407
155	41,96	7366,49
165	43,03	7555,183
175	42,89	7529,114
185	41,31	7252,281
195	36,39	6388,264
205	25,01	4390,845
215	23,16	4065,597
225	32,36	5681,905
235	35,84	6292,676
245	35,48	6228,123

Total: **167830,3**

Foi verificada, então, a variação da tensão induzida em função da variação dos seguintes parâmetros:

1) Diminuição da distância entre os eixos das LTs:

- Curva verde: distância entre eixos de 75m;

- Curva vermelha: distância entre eixos de 55m;

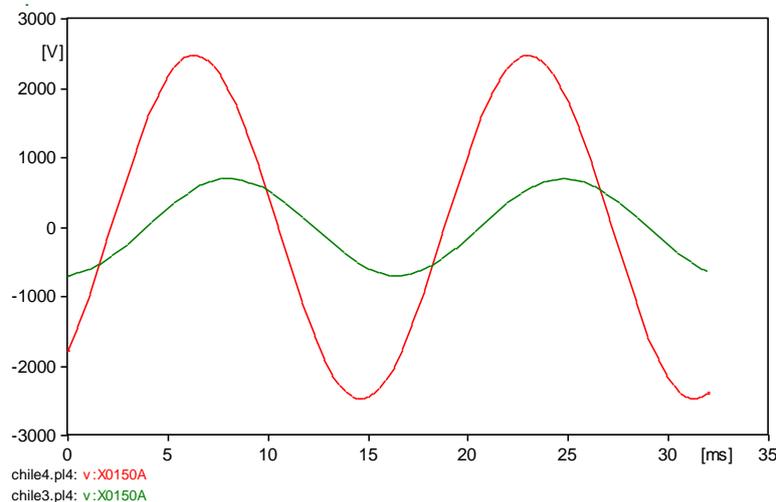


FIGURA 16 – Tensões induzidas na LT 220 kV com a variação da separação entre as linhas

As curvas referem-se à tensão induzida no final da LT 220kV. Percebe-se um significativo aumento da tensão induzida na LT 220 kV. Assim, é de se esperar que a tensão induzida no circuito 2 (desenergizado) da LT 500 kV seja ainda maior, devido à maior proximidade entre os circuitos (1 e 2 da LT 500 kV) e conseqüentemente maior acoplamento eletromagnético. Os níveis de tensão induzida no circuito 2 da LT 500 kV, estando este circuito desenergizado por algum motivo de manutenção ou falha, foi de 19 kV, conforme Figura 17.

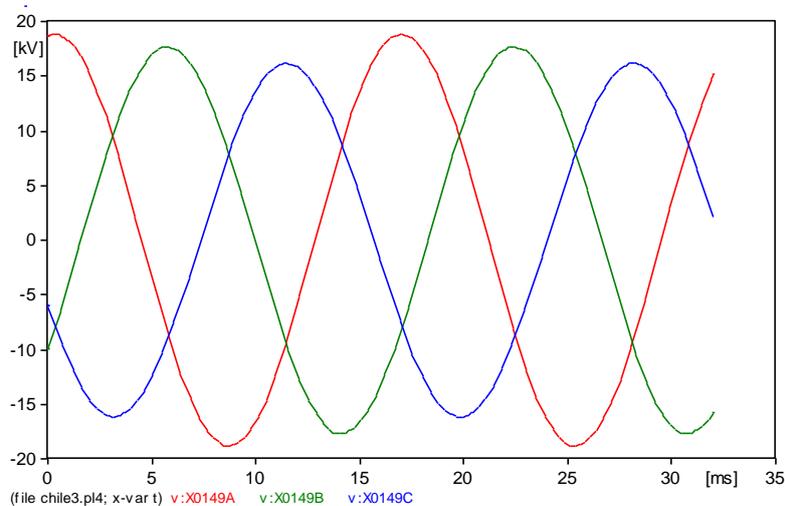


FIGURA 17 – Tensões induzidas no circuito 2 (desenergizado) da LT 500 kV pelo circuito 1 da mesma linha

Este nível de tensão pode ser perigoso para trabalhadores que estejam realizando a manutenção da LT, devendo a mesma ser adequadamente aterrada.

2) Efeito da transposição das LTs:

- Curva verde: com transposição;
- Curva vermelha: sem transposição;

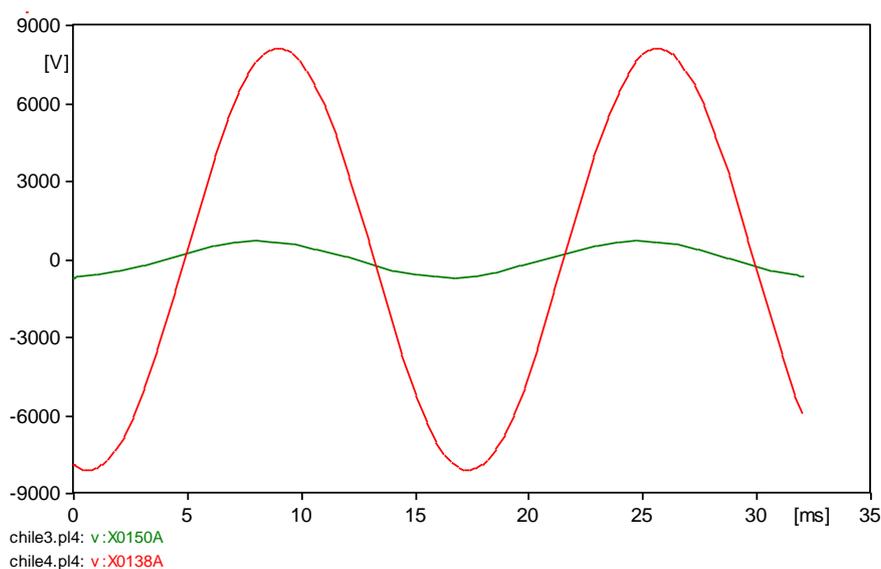


FIGURA 18 – Tensões induzidas na LT 200 kV com e sem transposição na LT 500 kV

A transposição da LT tende a equilibrar as impedâncias LT. Caso a transposição fosse perfeita, as matrizes da impedância e admitância seriam perfeitamente equilibradas, com todos os componentes mútuos iguais. O fato de haver este desequilíbrio sem a transposição acarreta em maiores correntes circulando na LT e conseqüentemente no aumento da indução no circuito vítima.

3) Efeito do Desequilíbrio de Cargas:

- Curva verde: carga equilibrada;
- Curva vermelha: carga desequilibrada;

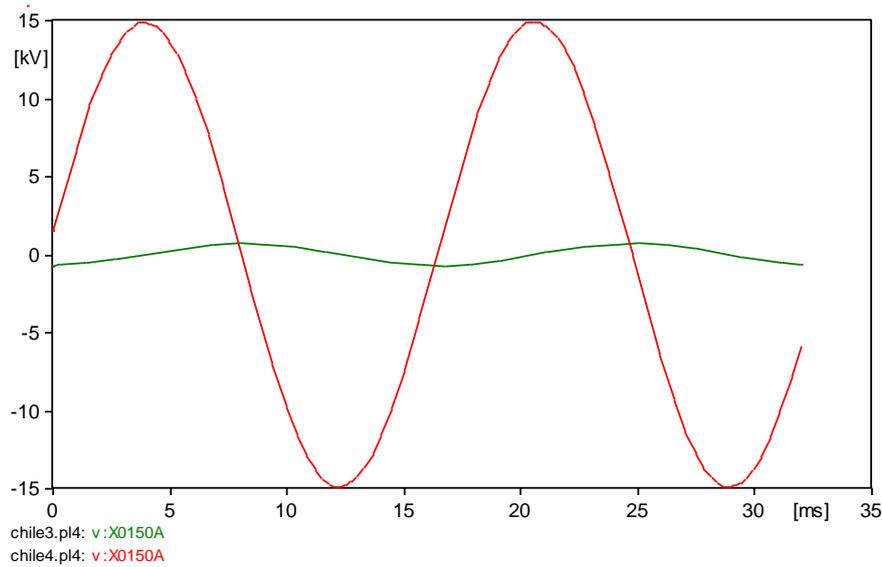
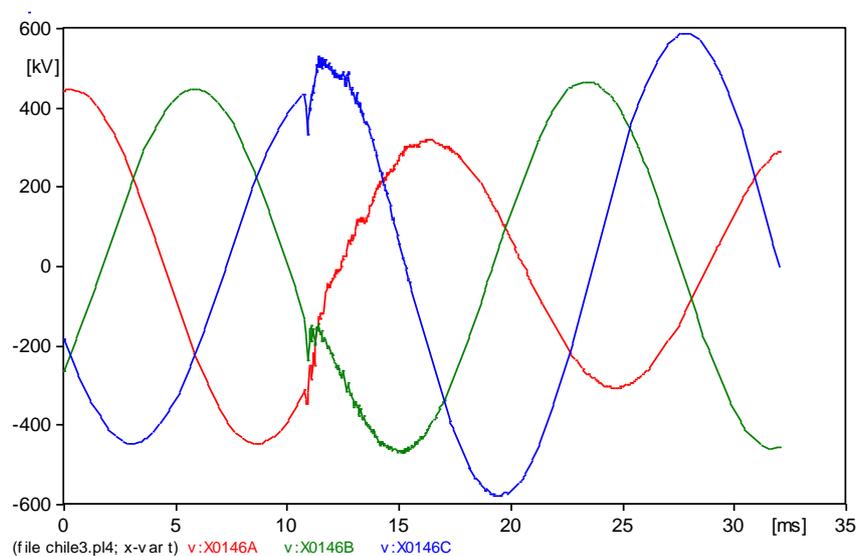


FIGURA 19 – Tensões induzidas na LT 200 kV com carga desequilibrada na LT 500 kV

O gráfico da Figura 19 representa a tensão induzida na LT 220kV para a situação de desequilíbrio de carga na LT geradora da interferência. O que foi mencionado no item 2 se torna ainda mais evidente, mostrando que a tensão induzida passou de 700V para 15kV.

4) Curto-Circuito no circuito 1 da LT geradora:

O curto foi simulado no instante 10ms. Verifica-se pela Figura 20 um transitório no circuito C2 (a) e uma significativa indução na LT 220 kV, de aproximadamente 160 kV. Esses resultados ressaltam a importância em se considerar a ocorrência de um curto-circuito na fonte da interferência eletromagnética. As linhas vermelha, verde e azul correspondem às tensões induzidas nas fase A, B e C, respectivamente.



(a)

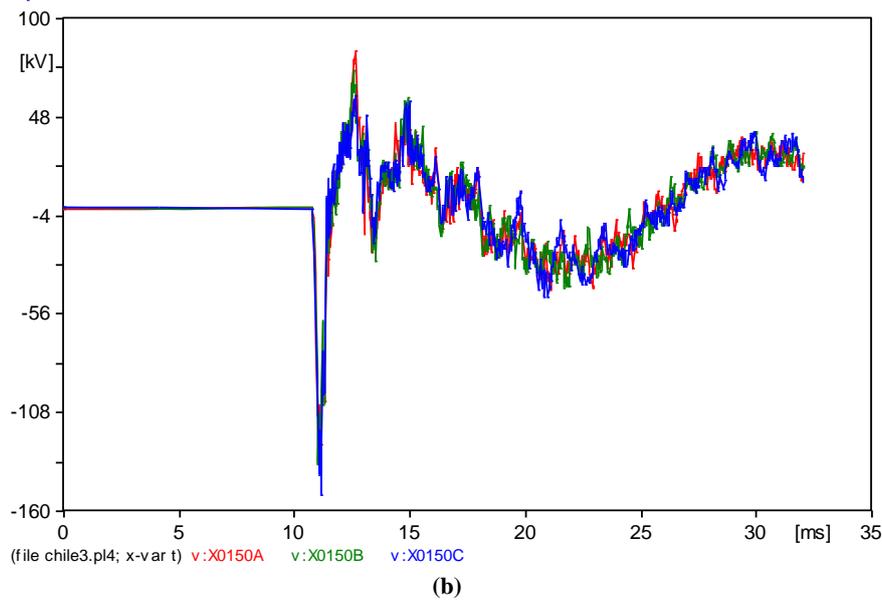


FIGURA 20 – Tensões induzidas no circuito 2 da LT 500 kV (a) e na LT 200 kV (b) com curto fase-terra no circuito 1 da LT 500 kV

Na referência [2] é apresentado um relatório da tensão induzida na LT 220 kV, tendo sido obtido o resultado listado na Tabela 5.

TABELA 5 – Indução Eletrostática da LT 500 kV sobre a LT 220 kV

LT 500kV Ancoa - Alto Jahuel				LT 220kV Colbun - Alto Jahuel		
Circuito indutor	Fase	V barra emissora (kV)	V barra receptora (kV)	Circuito induzido	Fase	V ind. (kV)
C1	A	317,54 <0°	317,54 <0°	C1	A	4,4 <-56,2°
	B	317,54 <-120°	317,54 <-120°		B	2,63 <-127,3°
	C	317,54 <120°	317,54 <120°		C	5,01 <-137,6°
C2	A	317,54 <0°	317,54 <0°	C2	A	4,44 <-57,4°
	B	317,54 <-120°	317,54 <-120°		B	2,39 <-83,8°
	C	317,54 <120°	317,54 <120°		C	2,45 <-94,2°

Pelas tensões apresentadas nas barras emissoras e receptora, pode-se concluir que a LT geradora foi considerada estando a vazia, já que as tensões são iguais em módulo e ângulo em ambas as barras. Nessa condição foi obtido o valor de 5 kV como a máxima tensão induzida no circuito vítima. Conforme mencionado nos itens anteriores, existem muitas outras condições mais severas que devem ser analisadas, como por exemplo, curto-circuito na LT geradora, sendo essas condições não verificadas em [2]. Devido ao nível de isolamento da LT do circuito vítima, é muito pouco provável que ocorra algum desligamento da LT devido à indução. Segundo [2], o valor da tensão induzida não implica a imposição de tensões elevadas em eventuais lâminas de chaves seccionadoras de aterramento instaladas na LT (em geral, tais chaves suportam tensões da ordem de 15 kV), a não ser que nesta LT estejam instalados reatores de linha e que com isto haja uma amplificação da tensão induzida por uma ressonância entre as capacitâncias da LT de 220 kV e os citados reatores. Entretanto, cabe ressaltar novamente a questão de segurança para os trabalhadores que tiverem contato direto com a LT, pois esses devem executar devidamente o aterramento da LT antes de manuseá-la.

LT 60 kV Uige I – Negage (Angola):

- LT geradora: LT 220 kV Lucala – Uige I;
- LT vítima: LT 60 kV Uige I – Negage;
- Extensão do paralelismo 30 km;
- Distância entre eixo: 22m;
- Curto-circuito fase terra na LT 220 kV em 10ms;
- Silhuetas conforme Figura 21.

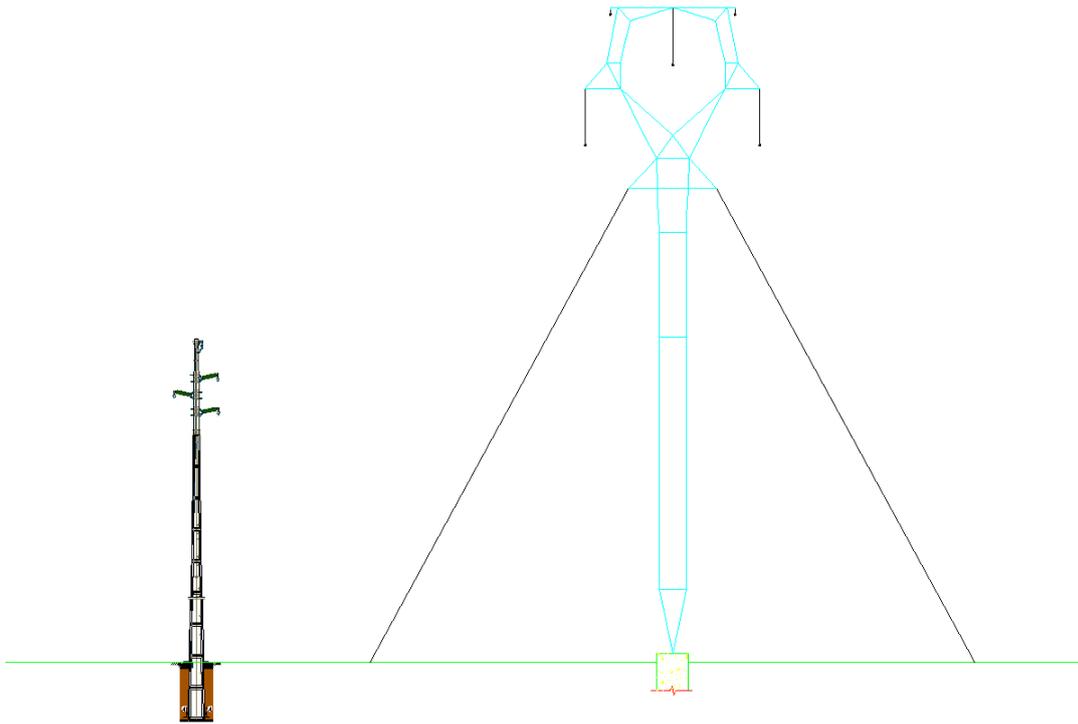


FIGURA 21 – Silhueta das estruturas da LT 60 kV (esquerda) e LT 220 kV (direita)

Para a análise da indução na LT 60 kV foi considerado um curto fase terra na LT 220 kV e a LT 60 kV operando com tensão nominal. A Figura 22 mostra as tensões resultantes nas fases da LT 60 kV. O valor de pico da tensão fase terra atingiu 52,1 kV, aproximadamente 7% acima da tensão nominal.

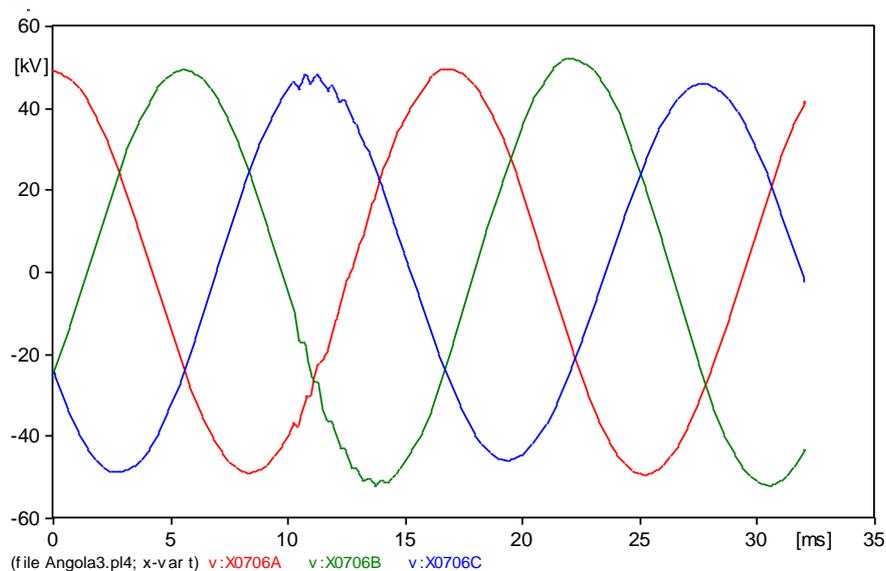


FIGURA 22 – Tensões induzidas na LT 60 kV estando a mesma energizada

A Figura 23 representa a tensão induzida na LT 60 kV, estando a mesma desenergizada, antes e após o curto-circuito na LT 220 kV.

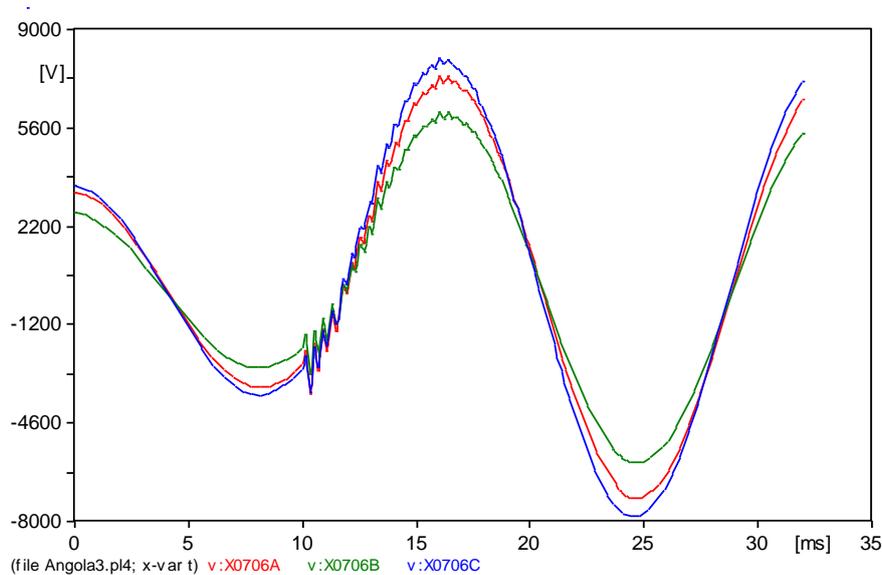


FIGURA 23 – Tensões induzidas na LT 60 kV estando a mesma desenergizada

A referência [3] indicou valores compatíveis com obtidos na simulação deste trabalho. É importante destacar também que, conforme exposto em [3], os valores de sobretensões obtidos não podem ultrapassar o limite máximo de suportabilidade dos equipamentos das SEs, como por exemplo, o pára-raios de ZnO instalado na LT para drenar os surtos que podem solicitar a mesma.

5 Conclusões

O conhecimento das correntes que circulam nos cabos pára-raios durante a ocorrência de um curto-circuito é fundamental para o correto dimensionamento deste componente das linhas de transmissão. Foi demonstrado como as correntes de falta são maiores quando a ocorrência do curto-circuito se dá em ponto próximo às subestações. A seção transversal dos cabos pára-raios são determinadas de forma que o cabo suporte as altas correntes de curto-circuito. Porém, como a corrente decai ao se afastar das extremidades da linha, adotar uma seção transversal menor no meio das LTs proporciona uma economia considerável para o projeto, nos casos de LTs longas.

Foi elaborado neste trabalho de monografia um programa computacional que fornece a distribuição da corrente de curto-circuito ao longo de LTs trifásicas. Podem ser modeladas faltas envolvendo uma, duas ou três fases a terra. Com esse programa é também possível conhecer as correntes que descem pelas torres da LT durante a ocorrência de uma falta. Essas correntes são necessárias para os projetos dos sistemas de aterramento das estruturas localizadas em áreas urbanas, onde as tensões de passo e toque devem ser verificadas.

Neste trabalho também foram feitas avaliações das sobretensões que as LTs podem estar submetidas devido à indução eletromagnética ocasionada por outros circuitos vizinhos. Tais avaliações são extremamente importantes, tanto para assegurar o bom funcionamento do Sistema Elétrico de Potência, quanto para garantir a segurança de profissionais do setor. Foram feitas várias simulações por meio do software ATP, considerando diversas variáveis na modelagem do sistema de transmissão, tais como proximidade entre os circuitos vítima e gerador, transposição da LT, influência da carga e ocorrência de curto-circuito no circuito gerador. Diante das simulações verificou-se a importância em se modelar corretamente os componentes do Sistema Elétrico, pois caso contrário os resultados das análises não serão condizentes com a prática, afetando a confiabilidade e segurança do projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] EPRI AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, Third Edition, Palo Alto, CA: 2005.1011974.
 - [2] NSA-LEM-001-0311, “Cálculo do Desequilíbrio de Tensões de Sequência e Indução Eletrostática – LT 500 kV Ancoa – Alto Jahuel e LT 220kV Colbún – Alto Jahuel”, Relatório Técnico – LEME Engenharia Ltda., 05/2011.
 - [3] NSA-LEM-008-109, “Análise das Interferências Eletromagnéticas da LT 220 kV Lucala – Pambos de Sonhe – Uige I em LTs 30 kV e 60 kV”, Relatório Técnico – LEME Engenharia Ltda, 10/2009.
 - [4] H.B. Gooi, S.A. Sebo, “Distribution of Ground Fault Currents Along Transmission Lines – An Improved Algorithm”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, n° 3, march 1985.
 - [5] S.T Sobral et. al., “Análise de Circuitos Lader de Parâmetros Concentrados Excitados por Fontes de Corrente”, IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte – MG – Brasil, 1987.
 - [6] P. P Marco, “Cálculo de Correntes de Curto-Circuito em Cabos Pára-raios de Linhas de Transmissão”, Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/38455417>>, acesso em 08/2012.
 - [7] F. Dawalibi, “Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, n° 2, march/april 1980.
 - [8] F. Dawalibi, George B. Niles, “Measurements and Computations of Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, n° 3, march 1984.
 - [9] J. Endrenyi, “Analysis of Transmission Towers Potentials During Ground Faults”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, n° 10, october 1967.
 - [10] Stephen A. Sebo, “Zero-Sequence Current Distribution Along Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, n° 6, june 1969.
-