



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE REDUÇÃO DE
SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Aluna: Daphne De La Torre Barros

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande – PB.

Maio de 2011

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE REDUÇÃO DE
SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento
parcial às exigências para obtenção
do Grau de Engenheira Eletricista.*

ALUNA: _____

Daphne De La Torre Barros

ORIENTADOR: _____

Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande – PB.

Maio de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou todos os dias permitindo a realização desta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, Flávio e France, que são a minha inspiração. Agradeço pelos ensinamentos, pela confiança, pelo incentivo, pela paciência, pelo amor, enfim, por estarem presentes em todos os instantes da minha vida.

Aos meus irmãos, Kevin, Brenda, Lígia e Ariadne, pelo amor, pela amizade, por todos os momentos felizes que me proporcionam, dando um sentido ainda maior para minha vida.

Ao meu tio Renato pela confiança em mim depositada e por ter me proporcionado melhores condições para realizar a minha graduação.

Ao professor Damásio Fernandes Jr. pela confiança, paciência, incentivo e dedicação. As suas recomendações e orientações foram essenciais para a minha formação acadêmica e pessoal.

Aos professores Edmar Candeia, Edson Guedes e Washington Neves pela valiosa contribuição na minha formação acadêmica.

Ao professor Karcus Dantas pela imprescindível ajuda na realização deste trabalho.

A Adail e Tchaikovsky por estarem sempre à disposição para prestar qualquer ajuda ou esclarecimento, tornando tudo mais simples durante o curso, além da grande amizade.

A Yonatha pela verdadeira amizade, força, incentivo, confiança, estando presente sempre em todos os momentos.

A Mariana, Raphael, Edson, Juliana, Maria Leticia, Jamile, Mayanna e a todos os meus amigos do período 06.1 pela amizade, pelos conhecimentos compartilhados, por todos os momentos que vivenciamos ao longo do curso, enriquecendo ainda mais a minha experiência de vida.

Aos amigos do LIEC pela amizade e companheirismo.

A Tony pelo companheirismo, paciência, dedicação, confiança, amor, enfim, por estar sempre presente, me compreendendo e me ajudando.

Agradeço a todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica pela dedicação.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
SUMÁRIO.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
1. Introdução.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Geral	1
1.2.2 Específico	1
1.3 Metodologia.....	1
1.4 Organização do relatório	2
2. Fundamentação Teórica.....	2
2.1 Linhas de Transmissão	3
2.1.1 Equações de Linhas de Transmissão	4
2.1.2 Transposição em Linhas de Transmissão	7
2.2 Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência	8
2.2.1 Sobretensões	8
2.3 Métodos de Redução de Sobretensões de Manobras em Linhas de Transmissão	13
2.3.1 Resistores de pré-inserção	13
2.3.2 Pára-raios	15
2.3.3 Chaveamento Controlado	16
3. ATP.....	19
4. Avaliação dos Métodos	21
4.1 Sistema Elétrico Modelado.....	23
4.2 Métodos aplicados	26
4.2.1 Pára-Raios.....	26
4.2.2 Resistores de pré-inserção	26
4.2.3 Chaveamento Controlado	26
4.3 Análise dos Resultados.....	27
5. Resultados e Análises	28
5.1 Energização	28

5.1.1 Linha não-transposta.....	28
5.1.2 Linha com transposição	31
5.1.3 Análise dos métodos em função da transposição da linha para manobras de energização	33
5.2 Religamento.....	36
5.2.1 Linha não-transposta.....	37
5.2.2 Linha com Transposição.....	39
5.2.3 Análise dos métodos em função da transposição da linha para manobras de energização	41
6. Considerações Finais	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito elementar de uma linha de transmissão.....	4
Figura 2.2 – Esquema de transposição com três torres de transposição.....	7
Figura 2.3 – Sobretensão típica de uma manobra de energização.....	10
Figura 2.4 – Onda tensão no terminal receptor de uma linha sem compensação reativa em uma manobra de religamento.	12
Figura 2.5 – Onda tensão no terminal receptor de uma linha com compensação reativa em uma manobra de religamento.	13
Figura 2.6 – Circuito para representação de disjuntor com resistor de pré-inserção.....	14
Figura 2.7 – Sinal de referência de uma das fases sobre os contatos do disjuntor quando não há carga residual na linha de transmissão. (Fonte: DANTAS, 2007).....	17
Figura 2.8 – Sinal de tensão sobre o disjuntor em das fases com a linha sem compensação em um religamento. (Fonte: DANTAS, 2007).....	18
Figura 2.9 – Tensão entre os contatos do disjuntor para uma compensação de 80%. (Fonte: DANTAS, 2007).....	19
Figura 2.10 – Tensão entre os contatos do disjuntor para uma compensação de 30%. (Fonte: DANTAS, 2007).....	19
Figura 4.1 – Esquema de simulações (Método 1: Pára-raios; Método 2: Resistores de pré-inserção; Método 3: Chaveamento controlado).....	22
Figura 4.2 – Esquema básico do sistema elétrico de potência modelado.....	23
Figura 4.3 – Geometria da linha de 500 kV São João do Piauí – Milagres. Fonte: (DANTAS, 2007).....	24
Figura 5.1 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	28
Figura 5.2 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	30
Figura 5.3 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	30

Figura 5.4 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	31
Figura 5.5 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	32
Figura 5.6 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	33
Figura 5.7 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 1: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios. ...	34
Figura 5.8 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 2: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios ...	35
Figura 5.9 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 3: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios. ...	36
Figura 5.10 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no momento de energização (Curva vermelha: Fase A; Curva verde: Fase B; Curva azul: Fase C).	36
Figura 5.11 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	37
Figura 5.12 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	38
Figura 5.13 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	38
Figura 5.14 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).	39

Figura 5.15 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).....	40
Figura 5.16 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).....	41
Figura 5.17 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de religamento para o Caso 1: (a) Sem método de redução, (b) Com para-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios ...	42
Figura 5.18 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 2: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios. ..	42
Figura 5.19 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 3: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios. ..	43
Figura 5.20 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 1.....	44
Figura 5.21 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 1.....	44
Figura 5.22 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 2.....	45
Figura 5.23 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 2.....	45
Figura 5.24 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 3.....	46
Figura 5.25 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 3.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Módulo e fase das fontes de tensão (Base 550 kV).....	23
Tabela 4.2 – Impedâncias das fontes.....	23
Tabela 4.3 – Dados dos condutores da linha São João do Piauí – Milagres.	25
Tabela 4.4 – Características dos pára-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV.	25
Tabela 4.5 – Valores dos reatores.....	25

1. Introdução

Neste trabalho será apresentado um estudo comparativo entre métodos de redução de sobretensões transitórias devido a manobras de energização e religamento de linhas de transmissão. O estudo analisará o desempenho de três técnicas: pára-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado. Além disso, será avaliado o desempenho destas três técnicas em duas situações: com linhas de transmissão não transpostas e com linhas de transmissão com uma transposição do tipo $\frac{1}{6} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{6}$. O desempenho dos métodos também será avaliado segundo o grau de compensação reativa da linha. Para validar o estudo serão usados dados reais de linhas de transmissão e de equipamentos elétricos. A análise comparativa entre os métodos será feita a partir dos resultados de simulações realizadas com o programa ATP/EMTP.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

- Aprofundar os conhecimentos em métodos de redução de sobretensões transitórias devido a manobras de energização e religamento de linhas de transmissão;
- Aprofundar os conhecimentos em programas de estudo de transitórios eletromagnéticos.

1.2.2 Específico

- Realizar um estudo comparativo, em termos quantitativos e qualitativos, entre três métodos de redução de sobretensões transitórias provenientes de manobras de energização e religamento de linhas de transmissão: pára-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado de disjuntores.

1.3 Metodologia

O trabalho será desenvolvido em três etapas. Na primeira etapa será feita uma pesquisa das principais referências bibliográficas necessárias para o entendimento dos fenômenos

transitórios em linhas de transmissão e dos métodos empregados para redução de sobretensões transitórias oriundas de manobras de energização e religamento de linhas de transmissão. Na segunda etapa será utilizado um programa para estudo de transitórios, o ATP (*Alternative Transients Program*), que permitirá a análise do desempenho das três técnicas de redução de sobretensões transitórias abordadas neste trabalho por meio de simulações. E na terceira etapa, de posse dos resultados das simulações, será feita uma análise desses resultados para efeito de comparação do desempenho dos métodos estudados.

1.4 Organização do Relatório

O relatório está organizado em 6 seções, sendo a primeira seção esta breve introdução a respeito do trabalho. Na segunda seção é feita uma apresentação acerca dos principais assuntos que fundamentam o estudo realizado neste trabalho. Em seguida, na terceira seção, são apresentados os aspectos gerais do programa usado para realizar o estudo comparativo, o ATP (*Alternative Transients Program*). Na quarta seção é feita a descrição do sistema elétrico modelado no ATP usado para realizar o estudo, e também é explicitado como os resultados das simulações serão analisados. Os resultados e a análise desses são realizados na quinta seção. E por fim, na sexta seção, são feitas as considerações finais.

2. Fundamentação Teórica

Os sistemas elétricos de potência, apesar de operarem em regime permanente na maior parte do tempo, devem ser projetados levando-se em consideração a ocorrência de distúrbios. Em geral, as solicitações mais extremas que um sistema elétrico pode ser submetido são causadas por distúrbios de natureza transitória. Os fenômenos transitórios podem ocorrer devido a diversos fatores, podendo gerar sobrecorrentes, sobretensões, formas de onda anormais e transitórios eletromecânicos (D'AJUZ *et al*, 1987).

Para sistemas elétricos em Extra Alta Tensão (EAT) caracterizados por longas linhas de transmissão, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN), as sobretensões de manobra afetam diretamente a coordenação de isolamento (DANTAS, 2007). Desta forma, o estudo de métodos para redução da amplitude destas sobretensões é de grande importância para o setor elétrico.

O método comumente usado para redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão utiliza disjuntores com resistores de pré-inserção. Porém, experiências em campo demonstraram que o método apresenta baixa confiabilidade, além do custo associado à aquisição e manutenção dos disjuntores com resistores de pré-inserção (LEGATE *et al*, 1988; RIBEIRO & MACCLUM, 1989). Estas constatações impulsionaram pesquisas para o desenvolvimento de métodos mais eficazes e confiáveis para a redução dos níveis de sobretensões oriundas de manobra em linhas de transmissão. Dentre os métodos propostos, o método do chaveamento controlado tem tido maior destaque.

O chaveamento controlado de disjuntores é uma técnica que, baseada no monitoramento de sinais elétricos de referência, controla o instante de fechamento ou abertura dos contatos do disjuntor. Apesar de ter sido estudada há vários anos atrás, a sua implementação só se tornou possível recentemente devido ao avanço tecnológico na área de dispositivos eletrônicos voltados para sistemas de potência, além da viabilidade em termos econômicos (FROEHLICH *et al*, 1997a).

Neste trabalho será avaliado o desempenho de três métodos de redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão: resistores de pré-inserção, pára-raios e chaveamento controlado.

2.1 Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão podem ser definidas, de forma geral, como estruturas capazes de transportar energia de um ponto transmissor para um ponto receptor.

Tratando-se da transmissão de energia elétrica, as linhas são estruturas compostas basicamente por torres, cabos e isoladores, tendo como função transportar grandes blocos de energia elétrica por longas distâncias, visto que as usinas geradoras de energia estão afastadas, em geral, dos grandes centros consumidores, como é o caso do sistema elétrico brasileiro, o SIN.

Há diversos tipos de estruturas de linhas de transmissão, variando desde o material da torre até o número de cabos por fase e a disposição desses. O projeto de uma linha envolve diversos aspectos, desde os aspectos elétricos aos físicos, não sendo uma tarefa elementar. Várias pesquisas em sistemas de potência têm como objeto de estudo as linhas de

transmissão, em que grande parte tem como objetivo otimizar a sua utilização em sistemas de transmissão.

2.1.1 Equações de Linhas de Transmissão

Os parâmetros de uma linha de transmissão são distribuídos ao longo de sua extensão. Com isto, perturbações no sistema provocadas por chaveamentos ou descargas atmosféricas, por exemplo, causam a propagação de ondas pela linha. Os terminais da linha não sentem variações de corrente ou tensão simultaneamente, pois há o período de trânsito destas ondas. Então, os modelos utilizados em cálculos de transitórios eletromagnéticos que envolvem linhas de transmissão baseiam-se na solução das equações de onda de tensão e de corrente (ARAÚJO, NEVES, 2005).

A rigor, a dedução das equações básicas de propagação de ondas em linhas de transmissão deveria ser feita segundo a teoria de ondas eletromagnéticas. Entretanto, é possível utilizar a teoria de circuitos ao admitir algumas hipóteses. Uma dessas hipóteses é admitir que a distância entre os condutores seja pequena em relação ao comprimento da onda trafegante. Outra é considerar que a corrente no condutor não é constante ao longo da linha. Além disso, também é admitido que não seja possível ter ou somente campo elétrico ou somente campo magnético em qualquer região no espaço que envolva a linha. Diante destas hipóteses, conclui-se que não podem existir resistências, indutâncias ou capacitâncias concentradas em determinados pontos da linha. Com isto, pode-se utilizar o circuito apresentado na Figura 2.1. Com este circuito a linha foi representada como um elemento com parâmetros distribuídos, ou seja, com indutância, capacitância e resistência por unidade de comprimento.

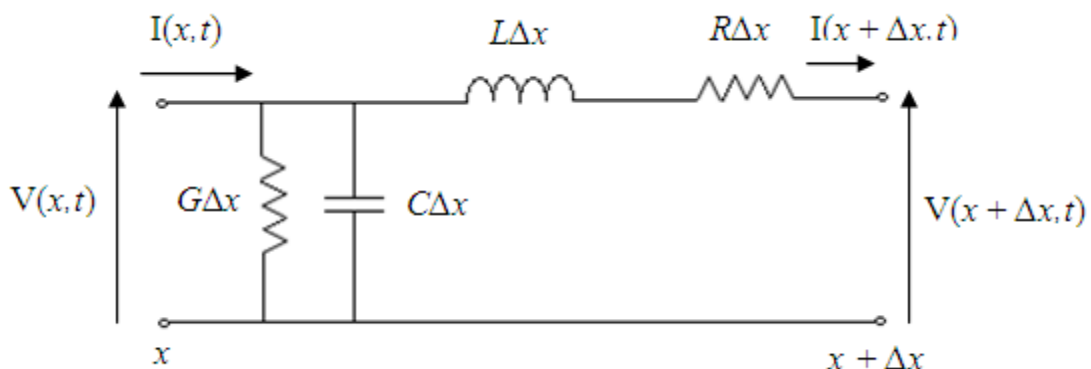


Figura 2.1 – Circuito elementar de uma linha de transmissão.

As equações de corrente e de tensão do circuito são dadas por:

$$I(x + \Delta x, t) = I(x, t) - G\Delta x \cdot V(x, t) - C\Delta x \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$V(x + \Delta x, t) = V(x, t) - L\Delta x \cdot \frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} - R\Delta x \cdot I(x + \Delta x, t) \quad (2)$$

As equações (1) e (2) podem ser reescritas como:

$$\frac{I(x + \Delta x, t) - I(x, t)}{\Delta x} = -G \cdot V(x, t) - C \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{V(x + \Delta x, t) - V(x, t)}{\Delta x} = -L \cdot \frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} - R \cdot I(x + \Delta x, t) \quad (4)$$

Fazendo Δx tender a zero nas equações (3) e (4), tem-se que:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x + \Delta x, t) - I(x, t)}{\Delta x} &= \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \\ -\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} &= G \cdot V(x, t) + C \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V(x + \Delta x, t) - V(x, t)}{\Delta x} &= \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \\ -\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} &= R \cdot I(x, t) + L \cdot \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (6)$$

A derivada segunda de $V(x, t)$ em relação a x é dada por:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} &= R \cdot \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} + L \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \right) \Rightarrow \\ -\frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} &= R \cdot \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} + L \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Se a derivada da corrente em relação à x da equação (7) for substituída pela equação (5), tem-se que:

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial V^2(x,t)}{\partial x^2} &= -R(GV(x,t) + C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}) - L \frac{\partial}{\partial t} (GV(x,t) + C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}) \Rightarrow \\
-\frac{\partial V^2(x,t)}{\partial x^2} &= -RGV(x,t) - RC \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} - LG \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} - LC \frac{\partial V^2(x,t)}{\partial t^2} \Rightarrow \\
\frac{\partial V^2(x,t)}{\partial x^2} &= RGV(x,t) + (RC + LG) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + LC \frac{\partial V^2(x,t)}{\partial t^2} \quad (8)
\end{aligned}$$

De maneira similar, obtém-se a segunda derivada da corrente:

$$\frac{\partial I^2(x,t)}{\partial x^2} = RGI(x,t) + (RC + LG) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} + LC \frac{\partial I^2(x,t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

A solução das equações (8) e (9) dará as funções que descrevem o comportamento da tensão e da corrente ao longo da linha de transmissão. A solução das equações de linha utilizando a transformada de Laplace é dada por:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x} \quad (10)$$

$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)} e^{-\gamma x} - \frac{B(s)}{Z_c(s)} e^{\gamma x} \quad (11)$$

em que $\gamma = \sqrt{(R+sL)(G+sC)}$, que é a constante de propagação da linha, e $Z_c(s) = \sqrt{\frac{R+sL}{G+sC}}$, que é a impedância característica da linha. Aplicando as condições iniciais, ou seja, para $x = 0$ ($V(0,s)$ e $I(0,s)$), obtém-se as seguintes equações de tensão e de corrente:

$$V(x,s) = \frac{V(0,s) + Z_c(s)I(0,s)}{2} e^{-\gamma x} + \frac{V(0,s) - Z_c(s)I(0,s)}{2} e^{\gamma x} \quad (12)$$

$$I(x,s) = \frac{V(0,s) + Z_c(s)I(0,s)}{2Z_c(s)} e^{-\gamma x} - \frac{V(0,s) - Z_c(s)I(0,s)}{2Z_c(s)} e^{\gamma x} \quad (13)$$

2.1.2 Transposição em Linhas de Transmissão

A geometria de uma linha de transmissão é definida pelo número de condutores por fase, o modo como estão dispostos entre si, a distância entre eles e em relação à terra, entre outras informações. Esta geometria tem implicação direta no desequilíbrio dos sinais de tensão e de corrente nas fases, pois devido ao acoplamento eletromagnético entre os condutores, a tensão e a corrente em uma fase não serão iguais nas demais fases. A fim de minimizar o desequilíbrio entre as tensões e correntes de fase, realiza-se a transposição em linhas de transmissão. A transposição consiste, basicamente, em alterar a posição das fases por meio de mudanças nas posições físicas dos condutores de fase.

Na prática, o esquema de transposição utilizado é o com três torres de transposição, conforme mostrado na Figura 2.2. Este tipo de transposição também é conhecido como 1/6-1/3-1/3-1/6 devido ao comprimento de cada trecho da linha. Como é possível observar na Figura 2.2, a linha de transmissão é dividida em quatro trechos, onde o primeiro trecho possui 1/6 do comprimento da linha, o segundo trecho possui 1/3 do comprimento da linha, assim como o terceiro, e o último possui um 1/6 do comprimento da linha. Com este tipo de transposição, cada fase ocupa todas as posições na torre por comprimentos iguais, ou seja, por 1/3 do comprimento da linha.

Neste trabalho, os métodos de redução de sobretensões de manobras em linhas de transmissão serão avaliados em uma linha não-transposta e em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

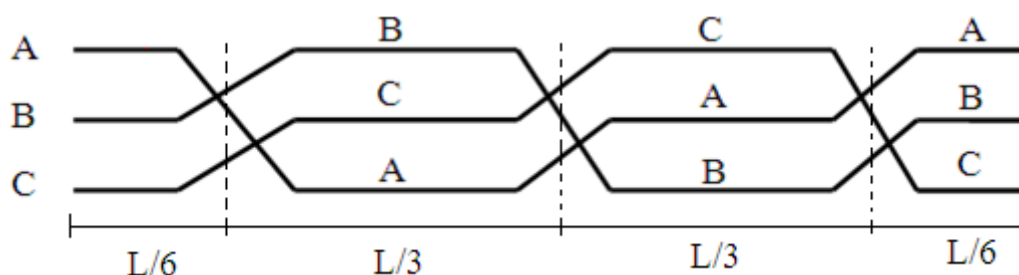


Figura 2.2 – Esquema de transposição com três torres de transposição.

2.2 Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas de potência é de extrema importância, visto que, em geral, as piores solicitações a que um sistema pode ser submetido são de natureza transitória. Estes fenômenos são causados por diversos motivos, podendo gerar sobrecorrentes, sobretensões, transitórios eletromecânicos e formas de onda anormais. Maior detalhe será dado às sobretensões.

2.2.1 Sobretensões

Sobretensão é uma tensão variável com o tempo, entre uma fase e terra ou entre fases, cujo valor de crista é superior ao valor de crista da tensão máxima de um sistema (D'AJUZ *et al*, 1987).

Do ponto de vista da origem da sobretensão, esta pode ser externa ou interna. As sobretensões externas são provocadas, em geral, por descargas atmosféricas. Enquanto que as sobretensões internas são causadas por eventos ocorridos dentro do próprio sistema, como manobras com disjuntores, curtos-circuitos, entre outros.

As sobretensões podem ainda ser classificadas de acordo com o grau de amortecimento e o tempo de duração: temporárias, de manobra e atmosféricas. Neste trabalho será dada maior atenção às sobretensões de manobras.

As sobretensões de manobra são resultado de mudanças topológicas do sistema, como energização de uma linha de transmissão, chaveamento de capacitores e reatores, entre outras manobras. Uma característica muito importante deste tipo de sobretensão é o seu caráter probabilístico, pois para determinada manobra diferentes valores de sobretensão podem ser obtidos visto que dependerão tanto da dispersão dos instantes de fechamento do disjuntor quanto do valor da onda de tensão no instante em que ocorre o fechamento dos pólos do disjuntor.

Dentre as operações que provocam sobretensões de manobra, as mais importantes são: energização e religamento de linhas, chaveamento de capacitores e reatores, aplicação e eliminação de faltas, energização de transformadores e rejeição de carga.

As sobretensões oriundas de manobras de energização e religamento de linhas de transmissão dependem das condições do sistema, como comprimento da linha, grau de compensação da linha, tensão de pré-manobra, potência de curto-circuito do sistema alimentador, entre outras. A seguir serão explicitados os principais aspectos desses dois tipos de manobras em linhas de transmissão.

2.2.1.1 Energização

A manobra de energização de linhas de transmissão é realizada, em geral, com a energização inicial de apenas um dos terminais da linha, o terminal emissor, com o outro terminal em aberto, o terminal receptor. Desta forma, quando ocorre a energização da linha com o fechamento dos contatos do disjuntor, ondas de tensão começam a trafegar pela linha. Ao alcançarem o terminal receptor, o qual está em aberto, essas ondas de tensão são refletidas e neste ponto observam-se as maiores sobretensões.

É importante destacar dois aspectos presentes na energização de linhas que contribuem com geração de sobretensões mais elevadas: a dispersão entre os contatos do disjuntor e o acoplamento mútuo entre as fases. Devido ao primeiro aspecto, os pólos do disjuntor não são fechados simultaneamente. Porém, devido ao acoplamento mútuo entre as fases, quando o primeiro pólo é fechado, não haverá apenas onda de tensão na fase associada àquele pólo, mas haverá também ondas de tensão se propagando nas demais fases. Este efeito acarreta maiores sobretensões nas manobras de energização. Além disso, devido a esses dois fatores, a obtenção das máximas sobretensões no terminal receptor da linha deve ser feita mediante a realização de um número considerável de manobras a fim de se ter diferentes sequências de fechamento, o permitirá a construção de um histograma de sobretensões máximas.

Na Figura 2.3 é mostrada uma sobretensão típica de energização em uma fase da linha de transmissão. Pode-se observar que o instante t_0 representa o momento em que ocorre a energização. Antes deste instante não havia qualquer sinal de tensão na linha. Com a energização iniciada, tem-se um período transitório no qual se observa as maiores sobretensões. Este período tem duração de alguns milissegundos, e logo em seguida o sinal começa a entrar em regime permanente. É importante destacar que o sinal de tensão representado na Figura 2.3 se refere à tensão vista do terminal emissor da linha, pois caso fosse monitorado o sinal de tensão no terminal receptor, haveria um intervalo de tempo entre

o instante de energização e o aparecimento de tensão na linha devido ao tempo de propagação da onda de tensão.

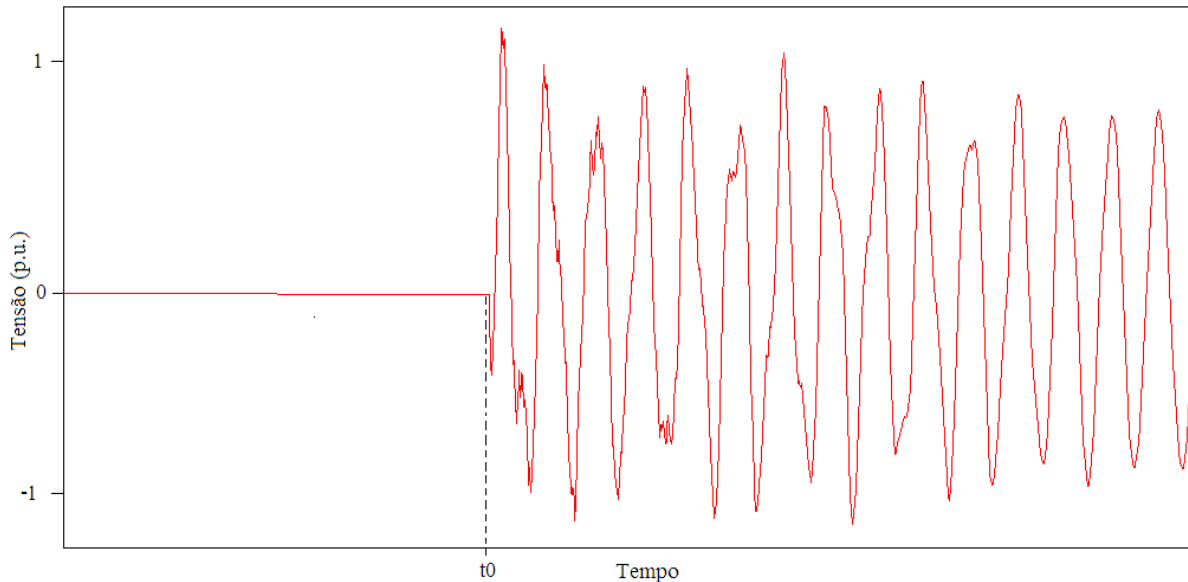


Figura 2.3 – Sobretensão típica de uma manobra de energização.

2.2.1.2 Religamento

O religamento de linhas de transmissão ocorre, em geral, quando há interrupção do fornecimento de energia elétrica de forma inesperada. Neste caso o religamento automático é efetuado a fim de colocar o sistema em funcionamento o mais rápido mais possível. Devido ao retardo no início de fechamento dos contatos do disjuntor, a linha permanece um intervalo de tempo desligada. Este tempo é conhecido como “tempo morto”, e geralmente dura em torno de 500 ms a 15 s.

Ao desligar uma linha em vazio, devido ao seu comportamento predominantemente capacitivo, a corrente somente é interrompida quando passa por zero. Conseqüentemente, neste instante a tensão é máxima. Com isto, uma “carga residual” permanece na linha, e esta não é igual em todas as fases devido ao acoplamento eletromagnético entre elas. Desta forma, a primeira fase que teve sua corrente interrompida poderá apresentar uma tensão de até 1,3 p.u. Caso a linha seja religada antes do decaimento total da carga residual e o fechamento do disjuntor seja efetuado quando a polaridade da tensão está oposta a polaridade da carga, as sobretensões podem atingir até 5,0 p.u. (D’AJUZ *et al*, 1987). O tempo de decaimento da

carga depende da existência ou não de compensação reativa. Quando não há compensação, a duração do decaimento total da carga é de 2 a 5 minutos, e depende das condições climáticas, podendo chegar até a 15 minutos quando as condições ambientais estão muito secas (D'AJUZ *et al*, 1987).

Quando a linha é compensada por reatores em derivação, a carga residual passa a ter uma forma oscilatória que é causada pela troca de energia entre a capacitância da linha com a indutância do reator. A frequência de oscilação depende do grau de compensação da linha, e geralmente assume valores entre 30 e 55 Hz (FROEHLICH *et al.*, 1997a).

A depender do valor dos reatores em derivação utilizados para a compensação reativa de uma linha e da capacitância da linha, tem-se um determinado grau de compensação. Para definir este grau, considere uma linha perfeitamente transposta com reatores em derivação. A potência reativa capacitiva associada à capacitância da linha é dada por:

$$Q_l = \omega \cdot C_l \cdot V^2 \quad (9)$$

em que C_l corresponde à capacitância equivalente da linha, V corresponde à tensão nominal da linha e $\omega = 2\pi \cdot f_{nom}$, com f_{nom} é a frequência nominal do sistema elétrico. E a potência reativa indutiva associada aos reatores em derivação é dada por:

$$Q_r = \frac{V^2}{\omega \cdot L_r} \quad (10)$$

em que L_r corresponde à indutância equivalente dos reatores, e as demais variáveis são as mesmas definidas para a potência reativa capacitiva. Então, o grau de compensação da linha de transmissão é dado por:

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (11)$$

E a frequência de oscilação da carga residual é dada por:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r \cdot C_l}} \quad (12)$$

Pode-se mostrar que esta frequência de oscilação é menor que a frequência fundamental do sistema e depende do grau de compensação. O grau de compensação pode ser dado em função dos valores de L_r e C_l :

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} = \frac{V^2 / \omega \cdot L_r}{\omega \cdot C_l \cdot V^2} = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_l \cdot L_r} . \quad (13)$$

Desta forma, a frequência de oscilação da carga residual pode ser reescrita como:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r \cdot C_l}} \cdot \frac{\omega}{\omega} = \frac{\omega}{2\pi \cdot \omega \cdot \sqrt{L_r \cdot C_l}} = \frac{\omega}{2\pi \cdot \sqrt{\omega^2 \cdot L_r \cdot C_l}} = \frac{\omega}{2\pi \cdot 1/\sqrt{k}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{k}$$

mas $f_{nom} = \omega/2\pi$, então:

$$f_{osc} = f_{nom} \cdot \sqrt{k} . \quad (14)$$

Portanto, a frequência de oscilação corresponde a uma porcentagem da frequência nominal do sistema, e depende do grau de compensação. Quanto maior o grau de compensação, mais próxima a frequência de oscilação estará da frequência nominal do sistema.

Nas Figuras 2.4 e 2.5 são mostradas ondas de tensão típicas em uma linha de transmissão sem reatores de compensação e com compensação de 30%, respectivamente. Estes sinais de tensão correspondem ao sinal visto no terminal receptor da linha.

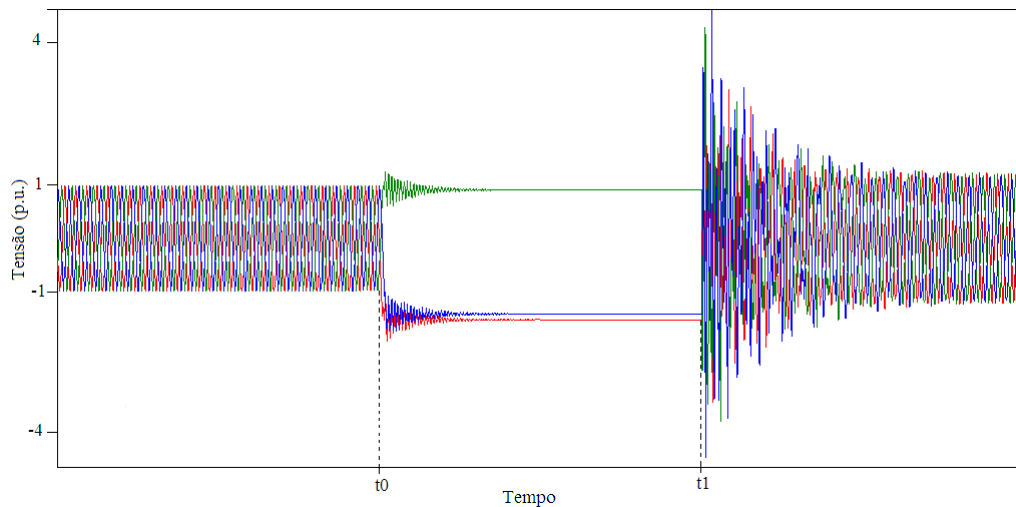


Figura 2.4 – Onda tensão no terminal receptor de uma linha sem compensação reativa em uma manobra de religamento.

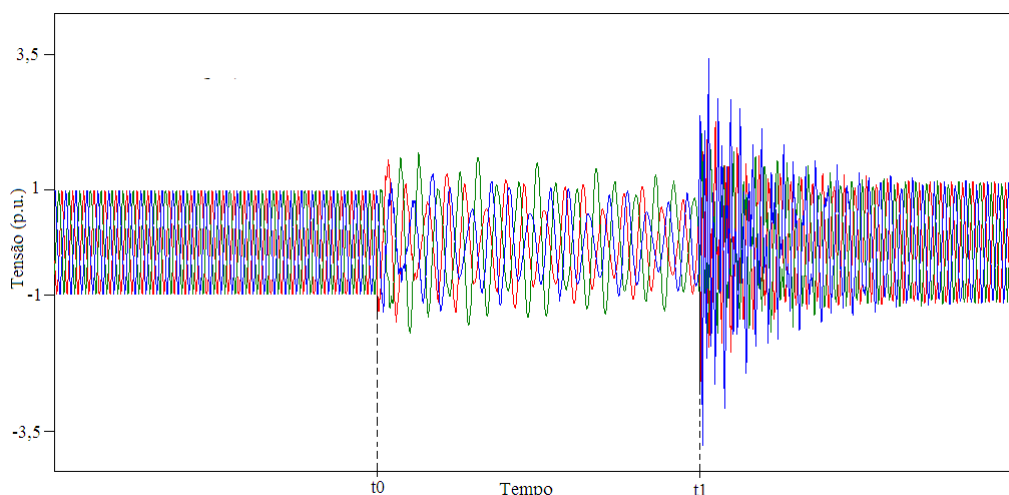


Figura 2.5 – Onda tensão no terminal receptor de uma linha com compensação reativa em uma manobra de religamento.

O instante t_0 representa o instante em que há a interrupção da energia elétrica na linha, e o instante t_1 corresponde ao instante de religamento acrescido do tempo de trânsito da onda de tensão na linha, visto que o religamento é efetuado no terminal emissor da linha. Como é possível observar, quando não há reatores de compensação na linha, ao interromper o fornecimento de energia na linha, uma carga residual praticamente constante permanece na linha. Enquanto que quando há compensação, o comportamento oscilatório da carga residual é evidente, assim como o seu decaimento.

2.3 Métodos de Redução de Sobretensões de Manobras em Linhas de Transmissão

2.3.1 Resistores de pré-inserção

O resistor de pré-inserção é um equipamento que é instalado junto à câmara do disjuntor, configurando-se como o método tradicionalmente utilizado para redução de sobretensões oriundas de manobras de energização e religamento em linhas de transmissão. No entanto, esta técnica apresentou baixa confiabilidade em experiências em campo (LEGATE *et al*, 1988; RIBEIRO & MACCLUM, 1989). Registrou-se um número

relativamente grande de falhas em disjuntores com resistores de pré-inserção. Isto se deve à maior complexidade do dispositivo, que contém várias peças mecânicas. Além disto, há o custo, pois a recuperação de um disjuntor com resistor de pré-inserção requer a reposição de um maior número de componentes.

Disjuntores com resistores de pré-inserção funcionam, no mínimo, em duas etapas. Quando o disjuntor é acionado para fechar os seus contatos, inicialmente é inserido o resistor. O tempo de permanência do resistor é de 6 a 10 ms (ZANETTA, 2003). Este período corresponde ao tempo que o contato móvel leva para se conectar com o contato fixo do disjuntor, curto-circuitando, dessa forma, o resistor. Em termos de representação, o disjuntor com resistor de pré-inserção pode ser representado pelo fechamento sequencial de chaves, conforme mostrado na Figura 2.6. Primeiramente a chave S_1 é fechada, inserindo o resistor R , e permanece fechada durante um intervalo de tempo. Em seguida, a chave S_2 é fechada, curto-circuitando o resistor R . A inserção do resistor também pode ser realizada em várias etapas (COLCLASER et al, 1969). Neste caso, são inseridos mais de um resistor a cada fechamento do disjuntor.

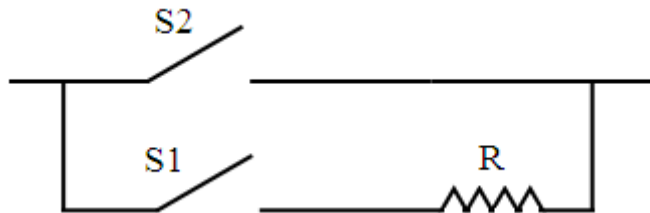


Figura 2.6 – Circuito para representação de disjuntor com resistor de pré-inserção.

A inserção do resistor de pré-inserção provoca a redução das ondas de tensão aplicadas na linha de transmissão. Isto pode ser explicado facilmente pelo princípio de divisor de tensão. Considere que a linha possa ser representada por sua impedância característica. Então, ao inserir o resistor, a tensão da linha é dividida entre este resistor e a sua impedância característica. Logo, a onda de tensão na linha terá menor amplitude.

Apesar da inserção do resistor reduzir sobretensões, não se pode aumentar muito o seu valor, pois quando o mesmo é curto-circuitado são introduzidas novas sobretensões na linha, e estas sobretensões aumentam com o valor do resistor. Em geral, o valor do resistor é da ordem

de grandeza da impedância característica da linha, assumindo valores entre 250 e 450 ohm (ZANETTA, 2003).

2.3.2 Pára-raios

O pára-raios é um equipamento de extrema importância para os sistemas elétricos, desempenhando diversas funções que contribuem com a confiabilidade, economia e continuidade de operação do sistema. Basicamente, é um equipamento constituído por um elemento resistivo não-linear. De forma simplificada, o pára-raios funciona como um circuito aberto quando em operação normal, e quando ocorre uma sobretensão se comporta como um resistor de baixa impedância a fim de manter a tensão sobre seus terminais em um determinado valor.

O uso de pára-raios de óxido de zinco com a finalidade de redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão tornou-se uma alternativa ao uso de resistores de pré-inserção. Além de ser uma alternativa mais econômica, também é mais confiável em relação aos resistores de pré-inserção devido à simplicidade do equipamento. Diversos estudos constataram que o uso de pára-raios de ZnO nas extremidades da linha (LEGATE *et al*, 1988; RIBEIRO & MACCLUM, 1989), ou ainda, em alguns pontos ao longo da linha (STENSTROM, MOBEDJINA, 1998; SEYEDI *et al*, 2005), reduzem satisfatoriamente as sobretensões de manobra, dispensando o uso de resistores de pré-inserção.

A utilização de pára-raios de ZnO com a finalidade de reduzir as sobretensões de manobra deve-se principalmente a dois fatores: baixo nível de proteção e alta capacidade de absorção de energia. Os níveis de proteção são definidos em função da tensão residual que se estabelece nos terminais do pára-raios durante a sobretensão transitória. Para isto, são realizados ensaios em laboratório, em que se aplicam diferentes formas de onda de impulso de corrente no pára-raios e mede-se a tensão residual em seus terminais. Quando não são realizados estudos específicos adota-se, em geral, uma corrente de 3 kA visto que muito dificilmente este valor será ultrapassado (D'AJUZ, 1985). Quanto à capacidade de absorção de energia, esta característica elétrica é bastante relevante nos sistemas de EAT devido à grande energia disponível. Normalmente, a capacidade de absorção de energia dos pára-raios usados em sistemas de EAT é de 7 a 8 kW por kV de tensão nominal (D'AJUZ, 1985).

2.3.3 Chaveamento Controlado

Em manobras de energização ou religamento de linhas de transmissão, o instante em que ocorre o fechamento dos contatos do disjuntor é de grande relevância. Pois, a depender da amplitude da onda de tensão no instante em que o disjuntor tem seus contatos fechados, a sobretensão resultante pode ser muito elevada como pode ser mínima. Por esta razão, é fácil ver que se esse instante de fechamento é devidamente controlado, tem-se uma redução significativa do efeito das sobretensões provenientes destas manobras. O chaveamento controlado é uma técnica que, a partir do monitoramento de determinados sinais elétricos do sistema, determina o instante ótimo para o fechamento dos contatos do disjuntor.

O método de chaveamento controlado não se trata de uma técnica que foi idealizada recentemente, mas já havia sido estudada há alguns anos atrás. No entanto, a sua implementação é relativamente recente devido à imaturidade tecnológica até antes de 1995 (ITO, 2002). O princípio básico do funcionamento do chaveamento controlado consiste em reconhecer a forma de onda do sinal de referência e estimar o ponto ótimo de fechamento dos contatos do disjuntor. As estratégias adotadas para realizar o chaveamento dependerão do tipo de manobra, ou seja, se é uma energização ou um religamento, além das condições da linha, isto é, se há compensação reativa ou não. A seguir são apresentadas estratégias possíveis para cada tipo de manobra.

2.3.3.1 Estratégia para Energização de Linhas de Transmissão

Em manobras de energização a estratégia do chaveamento controlado é simples, pois não há carga residual na linha visto que o tempo entre um desligamento e uma energização é suficiente para o descarregamento total da carga. Desta forma, o melhor instante para fechamento dos contatos do disjuntor ocorre quando a tensão sobre o mesmo passa por zero. No entanto, para detectar este melhor instante basta monitorar o sinal de tensão do lado da fonte, pois como o disjuntor está em aberto e não há carga residual na linha, a tensão sobre o disjuntor é a própria tensão da fonte. Na Figura 2.7 é apresentado um típico sinal de tensão de umas das fases sobre o disjuntor quando não há carga residual na linha de transmissão, e os possíveis instantes ótimos para fechamento dos contatos estão indicados pelas setas. Como já mencionado, estes instantes ótimos são os instantes de passagem por zero.

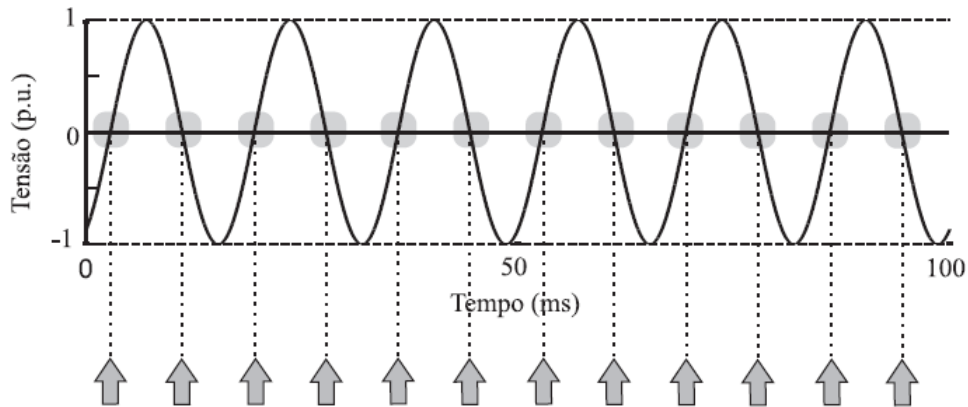


Figura 2.7 – Sinal de referência de uma das fases sobre os contatos do disjuntor quando não há carga residual na linha de transmissão. (Fonte: DANTAS, 2007)

2.3.3.1 Estratégia para Religamento de Linhas de Transmissão

Diferentemente do que ocorre na energização de linhas de transmissão, manobras de religamento são realizadas com carga residual na linha. Desta forma, não se pode aplicar a mesma estratégia que foi utilizada na energização. Além disso, ainda se deve considerar o grau de compensação da linha, pois esse modifica o comportamento da carga residual. Sendo assim, é necessária uma estratégia para religamento de linhas de transmissão sem compensação e outra para religamento de linhas com compensação.

Linhas de transmissão sem compensação reativa

Em linhas de transmissão sem compensação, a carga residual permanece praticamente constante devido ao efeito capacitivo da linha em torno de ± 1 p.u. (DANTAS, 2007). Este comportamento da carga residual da linha provoca um deslocamento da tensão entre os contatos do disjuntor. Uma forma de onda de tensão típica entre os contatos do disjuntor para este caso em uma das fases é mostrada na Figura 2.8. Os possíveis instantes ótimos de fechamento estão indicados na figura pelas setas, que correspondem aos instantes de passagem por zero, isto é, os pontos em que a tensão é mínima.

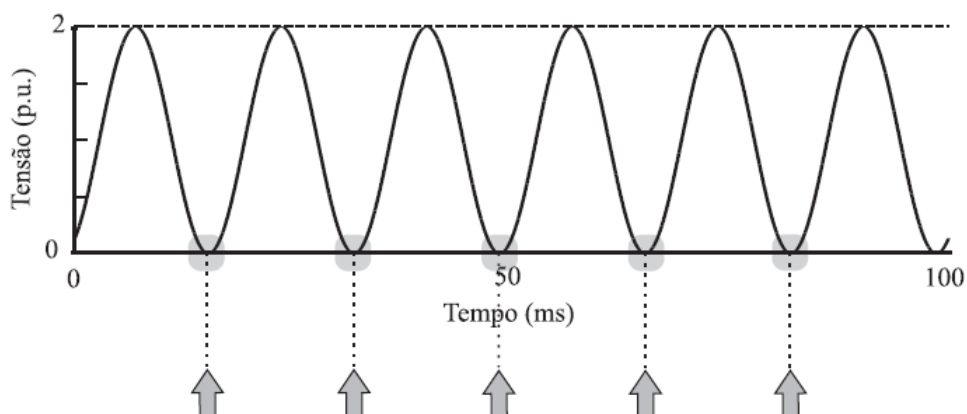


Figura 2.8 – Sinal de tensão sobre o disjuntor em das fases com a linha sem compensação em um religamento.
(Fonte: DANTAS, 2007)

Linhas de transmissão com compensação reativa

Em linhas de transmissão com compensação reativa, quando ocorre o desligamento da linha, observa-se que a carga residual que permanece na linha tem um comportamento oscilatório. Esta oscilação ocorre devido à troca de energia entre a capacitância da linha e a indutância dos reatores em derivação, tendo uma frequência que depende do grau de compensação, como mostrado anteriormente.

A depender do grau de compensação da linha, têm-se diferentes tipos de formas de onda de tensão sobre o disjuntor. Quanto maior for o grau de compensação mais fácil ficará a detecção dos possíveis instantes ótimos de fechamento do disjuntor. No entanto, não é interessante compensar a capacitância da linha totalmente, limitando até 80% (ZANETTA, 2005). Pois o uso de reatores em derivação para a compensação reativa de linhas de transmissão pode levar a circuitos ressonantes quando há mais de um circuito na mesma faixa de passagem e um deles se encontra fora de operação com suas duas extremidades não aterradas (PEREIRA, 2008).

Nas Figuras 2.9 e 2.10 são mostrados os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor em uma fase para um elevado grau de compensação e para um menor grau de compensação, respectivamente. Como é possível observar, para um maior grau de compensação a pulsação da onda de tensão é mais bem definida em comparação ao sinal de tensão quando se tem menor grau de compensação. O religamento da linha deve ser efetuado em instantes de menor batimento do sinal, como indicado pelas setas nas Figuras 2.9 e 2.10. Pois, apesar de existirem outros instantes de passagem pelo zero, não é recomendável realizar o religamento em

instantes de maior pulsação do sinal, já que qualquer falta de precisão no fechamento poderá conduzir ao religamento em instantes que a tensão é bastante elevada.

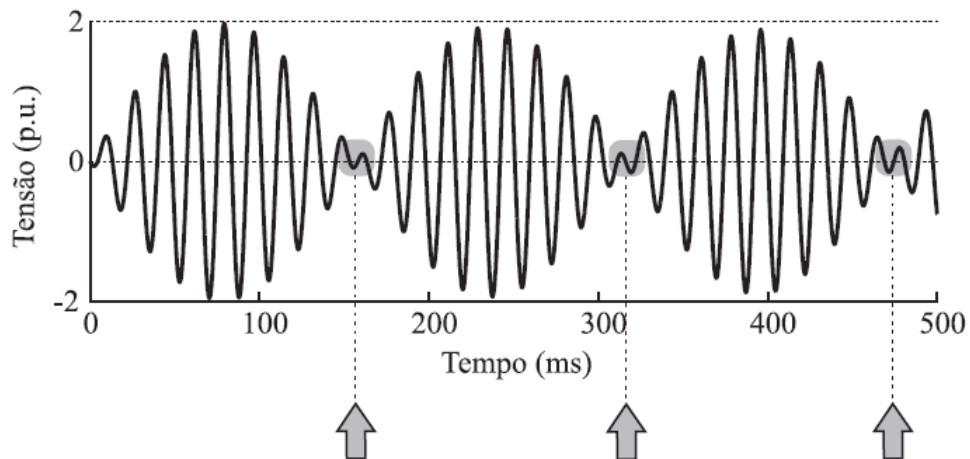


Figura 2.9 – Tensão entre os contatos do disjuntor para uma compensação de 80%. (Fonte: DANTAS, 2007)

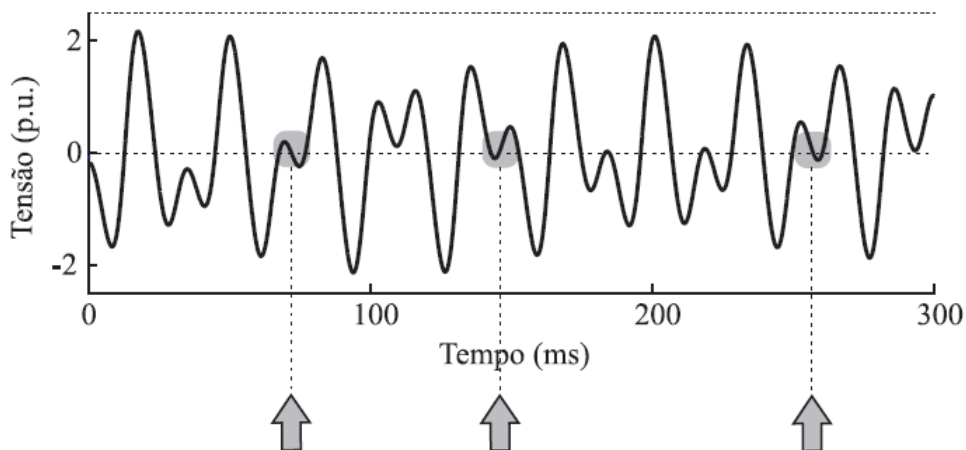


Figura 2.10 – Tensão entre os contatos do disjuntor para uma compensação de 30%. (Fonte: DANTAS, 2007)

3. ATP

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um programa de simulação digital usado para estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). O ATP é um dos programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), consistindo basicamente na continuação das versões anteriores do EMTP.

A formulação matemática do ATP baseia-se na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados e no método das características, também conhecido como o método de Bergeron, para elementos com parâmetros distribuídos. O ATP também utiliza, durante os cálculos, técnicas de esparsidade e fatoração triangular otimizada de matrizes.

Para simular um caso no ATP, o usuário deve entrar com os dados referentes ao sistema que deseja simular. Estes dados são salvos em formato de texto e segue uma rígida estrutura, de modo que cada informação deve ser alocada em uma posição preestabelecida. Caso não seja seguido o formato pré-definido, ocorrerá erro no processamento. O erro ou os erros podem, muitas vezes, ser identificados por meio da análise de um arquivo gerado pelo ATP, arquivo com extensão *.LIS*. Desta forma, é importante que o *Rule-Book* do programa seja consultado para evitar erros associados à estruturação dos dados.

Diversos modelos estão disponíveis no programa, sendo possível representar elementos não-lineares, elementos com parâmetros concentrados e distribuídos, chaves, fontes de tensão e de corrente, transformadores, entre outros.

ELEMENTOS CONCENTRADOS

É possível representar indutâncias, capacitâncias e resistências a parâmetros concentrados sem acoplamento entre fases. Estes podem ser conectados de diversos modos, o que permite representar banco de reatores e capacitores, equivalentes de rede, etc.

ELEMENTOS NÃO-LINEARES

Elementos não-lineares podem ser representados no ATP, como resistências e indutâncias não-lineares. Uma resistência não-linear é representada por meio dos dados de tensão e corrente de sua curva característica. Enquanto que para representar uma indutância não-linear são utilizadas as informações referentes à curva de fluxo em função da corrente.

LINHAS DE TRANSMISSÃO

O ATP oferece diferentes modelos de linhas de transmissão, sendo possível representá-las por uma cadeia de circuitos PI ou por parâmetros distribuídos. Para este último modelo pode-se ainda escolher entre a representação com ou sem variação dos parâmetros com a frequência. E ainda associada a linhas de transmissão, há uma sub-rotina do ATP para

cálculo de parâmetros de linhas, o LINE CONSTANTS. Esta rotina permite que, a partir dos dados de geometria da linha de transmissão, os parâmetros dela sejam calculados.

CHAVES

O ATP permite a simulação de diferentes tipos de chaves: chaves controladas por tempo, por tensão ou por sinal, chaves sistemáticas, chaves estatísticas e chaves de medição.

FONTES

O programa fornece modelos de fontes de excitação de tensão e de corrente, estas podem assumir diferentes formas de onda, como onda senoidal e rampa.

4. Avaliação dos Métodos

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo de métodos de redução de sobretensões de manobras de energização e de religamento de linhas de transmissão. As manobras em questão serão tratadas apenas sob o ponto de vista trifásico.

Os métodos avaliados serão: pára-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado. O desempenho destes métodos será analisado sob dois aspectos: grau de compensação reativa da linha e tipo de transposição da linha.

Quanto ao grau de compensação da linha, os métodos serão avaliados em três casos:

- Caso 1: Linha de transmissão sem compensação reativa;
- Caso 2: Linha de transmissão com baixo grau de compensação reativa, em torno de 30%;
- Caso 3: Linha de transmissão com um maior grau de compensação reativa, cerca de 60%.

Quanto ao tipo de transposição de linhas, os métodos serão avaliados em uma linha não-transposta e em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Desta forma, as simulações serão feitas tanto com uma linha não-transposta quanto com uma linha com transposição.

Na Figura 4.1 é apresentado um esquema que ilustra como as simulações serão realizadas. Os métodos em estudo estão indicados na parte inferior do esquema, em que o

método 1 se refere ao uso de pára-raios, o método 2 corresponde ao uso de resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios e o método 3 se refere ao chaveamento controlado em conjunto com pára-raios. Deste modo, para cada tipo de manobra, energização e religamento trifásico, serão realizadas simulações com a linha não-transposta e com a linha com transposição para cada um dos três casos de compensação, aplicando-se os três métodos de redução de sobretensões.

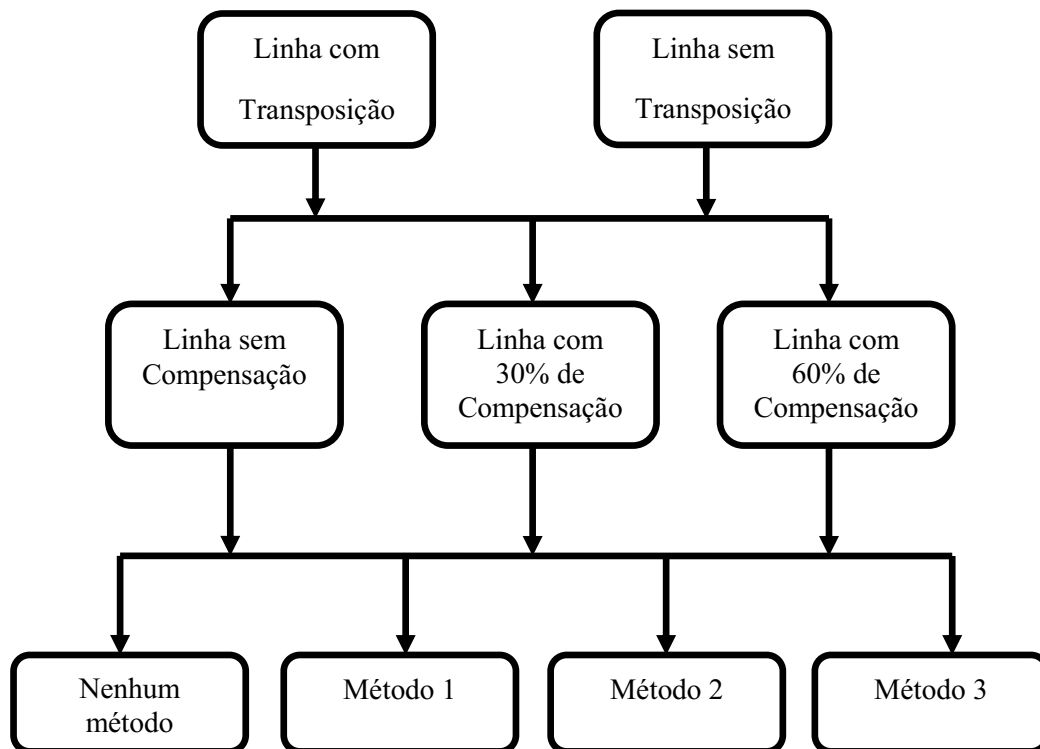


Figura 4.1 – Esquema de simulações (Método 1: Pára-raios; Método 2: Resistores de pré-inserção; Método 3: Chaveamento controlado).

A seguir será feita a descrição do sistema elétrico modelado no ATP usado para realizar o estudo comparativo dos métodos de redução de sobretensões de manobra. Após a descrição do sistema, será indicado como cada método será aplicado no sistema, e por fim será explicitado o modo como será feita a análise dos resultados das simulações serão feitas.

4.1 Sistema Elétrico Modelado

O sistema elétrico de potência modelado para realizar a análise comparativa dos métodos de redução de sobretensões de manobra é fictício, porém os seus dados são baseados em dados reais obtidos do sistema elétrico de potência de 500 kV da CHESF (Companhia Hidro Elétrica de São Francisco). O esquema básico do sistema modelado é apresentado na Figura 4.2. Em seguida são dadas as especificações dos equipamentos do sistema usadas para realizar as simulações.

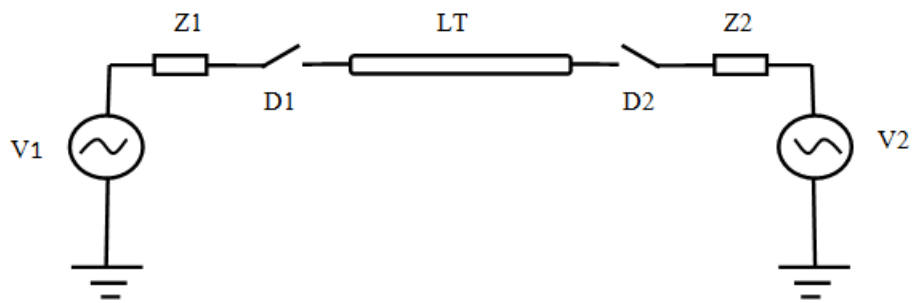


Figura 4.2 – Esquema básico do sistema elétrico de potência modelado.

FONTES

Os dados de módulo e de fase das fontes de tensão utilizadas no sistema simulado são apresentados na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 são apresentados os dados das impedâncias das fontes.

Tabela 4.1 – Módulo e fase das fontes de tensão (Base 550 kV).

Barra	Módulo (p.u.)	Fase (°)
Fonte 1	1,00	0
Fonte 2	0,99	- 10

Fonte: (DANTAS, 2007)

Tabela 4.2 – Impedâncias das fontes.

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	R ₀ (Ω)	X ₀ (Ω)	R ₁ (Ω)	X ₁ (Ω)
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Fonte: (DANTAS, 2007)

LINHA DE TRANSMISSÃO

Utilizou-se uma linha de transmissão de 400 km, a qual foi modelada segundo os seus dados de geometria, que são referentes a uma linha da CHESF (Linha de 500 kV São João do Piauí - Milagres). A geometria da linha é mostrada na Figura 4.3, e os dados dos condutores são apresentados na Tabela 4.3.

Para modelar a linha de transmissão no ATP a partir dos seus dados de geometria, utilizou-se a rotina LINE CONSTANTS do ATP. É importante destacar também que a linha foi segmentada em quatro trechos, tanto para modelar a linha não-transposta como para modelar a linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Devido ao esquema de transposição a linha foi dividida da seguinte forma:

- Primeiro trecho: 1/6 do comprimento total da linha (66,67 km);
- Segundo trecho: 1/3 do comprimento total da linha (133,33 km);
- Terceiro trecho: 1/3 do comprimento total da linha (133,33 km);
- Quarto trecho: 1/6 do comprimento total da linha (66,67 km).

Esta partição da linha também foi útil para a análise dos resultados, como será explicado depois.

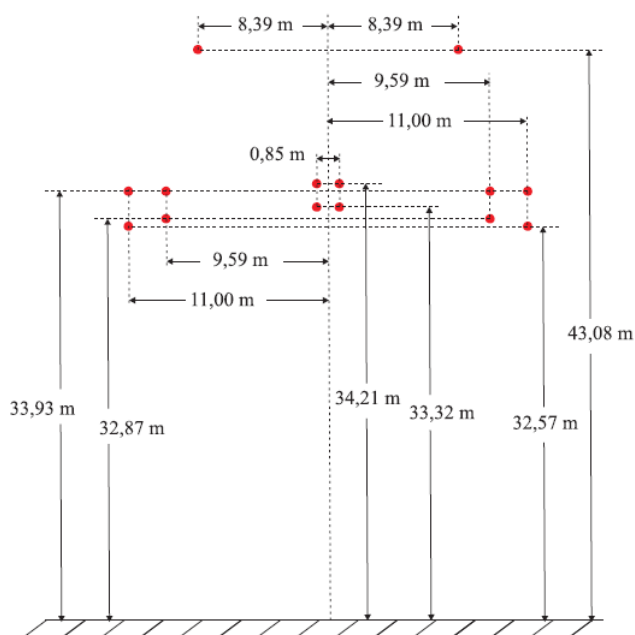


Figura 4.3 – Geometria da linha de 500 kV São João do Piauí – Milagres. Fonte: (DANTAS, 2007).

Tabela 4.3 – Dados dos condutores da linha São João do Piauí – Milagres.

Parâmetros	Condutor fase	Condutor pára-raios
Tipo de cabo	Cabo Rail	Cabo EHS 3/8''
Diâmetro externo (cm)	2,96	0,914
Raio médio geométrico (cm)	1,1735	0,0302
Resistência CA (Ω)	0,0674	4,271

Fonte: (DANTAS, 2007)

PÁRA-RAIOS

Utilizaram-se pára-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV. Os dados de corrente e de tensão de sua curva característica são apresentados na Tabela 4.4. A partir destes dados o pára-raios foi modelado no ATP como uma resistência não-linear.

Tabela 4.4 – Características dos pára-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV.

Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
0,001	643,72
0,010	681,23
0,050	721,27
0,100	738,70
0,200	756,14
0,400	775,75
0,700	793,18
1,000	806,26
2,000	830,23
5,000	873,81

Fonte: (DANTAS, 2007)

REATORES DE COMPENSAÇÃO

Os reatores utilizados para realizar a compensação da linha foram determinados a partir da equação (13). Na Tabela 4.5 são apresentadas as especificações dos reatores usados na compensação de 30% (reator 1) e na de 60% (reator 2). Estes reatores foram modelados no ATP como elemento concentrado.

Tabela 4.5 – Valores dos reatores.

Reator	Resistência (Ω)	Reatância Indutiva (Ω)
Reator 1	6,5	2618,0
Reator 2	2,8	1122,0

RESISTORES DE PRÉ-INSERÇÃO

Os resistores de pré-inserção foram modelados no ATP como elemento concentrado, com valor de resistência por fase de 400 Ω .

4.2 Métodos Aplicados

4.2.1 Pára-Raios

O método de redução de sobretensão de manobra em linhas de transmissão utilizando pára-raios consiste em colocar estes equipamentos nas extremidades da linha ou ainda em determinados pontos ao longo da linha. Neste trabalho o método será aplicado apenas com pára-raios de ZnO nas extremidades da linha.

4.2.2 Resistores de pré-inserção

Os resistores de pré-inserção são utilizados tradicionalmente para reduzir sobretensões de manobras em linhas de transmissão. Estes elementos são instalados junto à câmara do disjuntor, e são inseridos no sistema quando o disjuntor é acionado para ser fechado, permanecendo no sistema por um determinado intervalo de tempo.

Este método será aplicado colocando-se resistores de pré-inserção apenas nas chaves do terminal emissor da linha, e o tempo de permanência destes no sistema será de 8 ms.

4.2.3 Chaveamento Controlado

Neste trabalho não foi desenvolvido um dispositivo de controle para realizar o chaveamento controlado. A aplicação deste método baseou-se exclusivamente nos princípios da técnica, que consistiu no fechamento dos contatos do disjuntor em um instante ótimo, isto é, quando o sinal de tensão entre os seus contatos passa por zero. Desta forma, o chaveamento foi aplicado a partir da visualização do sinal de tensão entre os contatos da chave associada ao terminal emissor da linha, verificando-se o melhor instante de fechamento para cada fase.

Para a manobra de energização, o sinal de referência é o sinal de tensão da fonte localizada ao lado do terminal emissor da linha. A partir da visualização deste sinal,

determinaram-se os instantes ótimos de fechamento dos contatos da chave para cada fase, que são os instantes de passagem por zero.

Para a manobra de religamento, o sinal de referência adotado é o sinal de tensão entre os contatos da chave associada ao terminal emissor da linha. A determinação dos instantes ótimos segue o mesmo princípio usado na energização, isto é, são os instantes de passagem por zero. No entanto, quando há reatores em derivação na linha, devido ao caráter oscilatório da carga residual, os instantes ótimos de fechamento dos contatos, além de serem quando a tensão passa por zero, devem estar localizados nos pontos de menor pulsação do sinal de tensão. Sendo assim, o chaveamento controlado nas manobras de religamento é aplicado a partir da visualização do sinal de tensão entre os contatos da chave do terminal emissor da linha, verificando-se os instantes de passagem por zero nos pontos de menor pulsação do sinal de tensão.

4.3 Análise dos Resultados

A análise comparativa dos métodos de redução de sobretensões será feita a partir dos resultados das simulações, analisando-se o perfil das sobretensões ao longo da linha de transmissão. Este perfil é obtido a partir do monitoramento da tensão em alguns pontos da linha.

Ao realizar uma simulação com linhas de transmissão, pode-se verificar a tensão em seus terminais. Para obter informação a respeito da tensão em outros pontos ao longo da linha é necessário dividi-la em trechos, de modo que em cada nó de conexão entre trechos é possível verificar a tensão. Sendo assim, a linha foi dividida em quatro trechos. O primeiro e último trecho têm o mesmo comprimento, que é de $1/6$ da extensão total da linha. Enquanto que o segundo e o terceiro trechos possuem $1/3$ do comprimento total da linha, cada um. Estes comprimentos foram escolhidos em função da transposição da linha. Para realizar a transposição do tipo $1/6-1/3-1/3-1/6$, a linha precisa ser dividida em quatro trechos com estes comprimentos. Então, como os métodos serão aplicados em uma linha com transposição e em uma linha sem transposição, para efeito de comparação é interessante que se adote uma mesma estratégia de análise. Portanto, os pontos em que as sobretensões serão monitoradas devem ser iguais em ambas as linhas de transmissão. Então, a linha não-transposta foi dividida em quatro trechos da mesma forma que foi feito com a linha com transposição. Com

isto, as sobretensões poderão ser medidas nas extremidades da linha, a 1/3 das extremidades e no meio da linha. Os demais pontos serão estimados por interpolação.

5. Resultados e Análises

5.1 Energização

A manobra de energização consiste em energizar um dos terminais da linha, terminal emissor, enquanto o outro terminal da linha permanece em aberto, terminal receptor. As sobretensões oriundas desta manobra serão avaliadas ao longo da linha de transmissão. Inicialmente, os métodos serão avaliados em uma linha não-transposta e em seguida em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

5.1.1 Linha não-transposta

As simulações foram feitas para três casos. No primeiro caso, os métodos de redução de sobretensões de manobra são avaliados na linha de transmissão sem compensação, ou seja, sem reatores em derivação nas extremidades da linha.

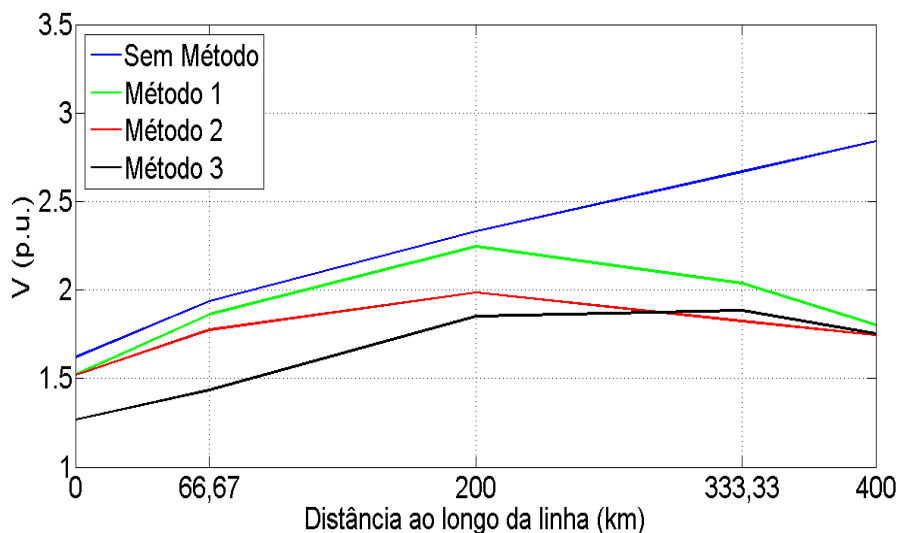


Figura 5.1 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Para demonstrar o quanto pode ser solicitado do sistema em uma manobra de energização, a linha é energizada sem aplicação de qualquer método de redução de sobretensões. Ao observar as sobretensões ao longo da linha nesta situação, conforme é mostrado na Figura 5.1, verifica-se que a solicitação mais extrema ocorre no terminal receptor da linha, alcançando em torno de 2,8 p.u. Além disso, observa-se o comportamento crescente das sobretensões ao longo da linha. Este comportamento já era esperado, pois como o terminal receptor está em vazio, praticamente toda a onda de tensão que atinge este terminal é refletida. Logo, as sobretensões serão maiores nas proximidades deste terminal.

Ao utilizar pára-raios de ZnO nas extremidades da linha, observa-se claramente a redução das sobretensões, as quais ficam limitadas a 2,2 p.u. Verifica-se ainda que a maior sobretensão ocorre no meio da linha, enquanto que nas extremidades as sobretensões são menores, onde os pára-raios estão instalados. Quando são utilizados resistores de pré-inserção conjuntamente com os pára-raios nos terminais da linha, a redução das sobretensões é ainda mais eficiente, limitando as sobretensões para até 2,0 p.u. E com o uso do chaveamento controlado também conjuntamente com os pára-raios nas extremidades da linha, verifica-se que a maior sobretensão está em torno de 1,9 p.u. Analisando o perfil das sobretensões ao longo da linha, constata-se que o chaveamento controlado apresentou melhor desempenho nesta situação de energização.

Para estudar a influência da compensação reativa em manobras de energização, as simulações foram feitas em uma linha com grau de compensação de 30%. Na Figura 5.2 são apresentados os resultados obtidos para este caso.

É possível observar que, devido à compensação, houve uma pequena redução das sobretensões na situação em que nenhum método de redução é aplicado no sistema. Nesta situação as sobretensões alcançaram até 2,6 p.u., o que não representa uma redução significativa em relação ao caso anterior (sem compensação). Com o uso de pára-raios, é possível observar que as sobretensões são limitadas em 2,2 p.u., que foi a mesma redução obtida no caso anterior. Ao utilizar os resistores de pré-inserção em conjunto com os pára-raios, obteve-se uma redução para 1,7 p.u. E quando o chaveamento controlado foi aplicado juntamente com os pára-raios, as sobretensões foram minimizadas para 1,8 p.u. O desempenho obtido com o chaveamento controlado é comparável ao desempenho obtido com o método com os resistores de pré-inserção, como é possível observar na Figura 5.2.

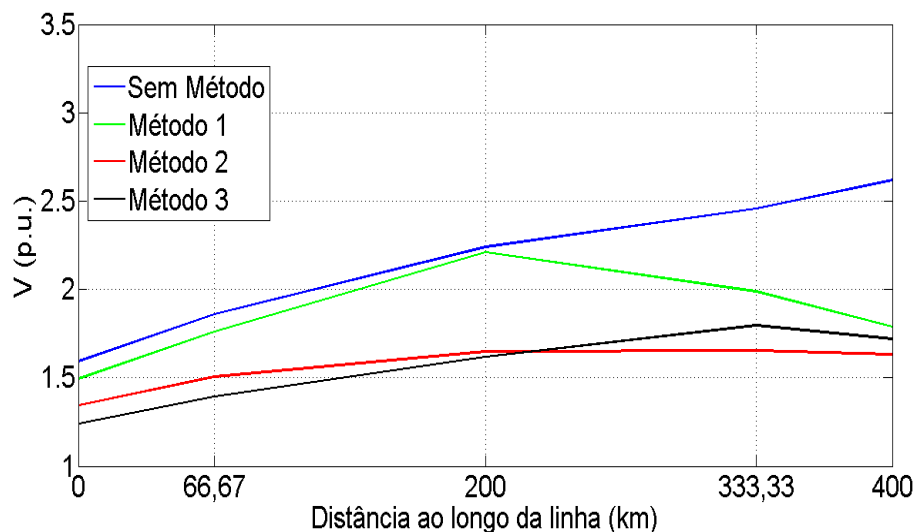


Figura 5.2 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Por fim, as simulações foram feitas para o caso em que a linha tem um grau de compensação de 60%, Figura 5.3.

Quando nenhum método é aplicado no sistema, observa-se que as sobretensões atingem até 2,3 p.u. Ao utilizar pára-raios, as sobretensões são limitadas para 2,1 p.u. Quando são utilizados os resistores de pré-inserção, a maior sobretensão registrada é de 1,5 p.u. E com a aplicação do chaveamento controlado, as sobretensões são limitadas para até 1,7 p.u. Nesta situação, o método com os resistores de pré-inserção apresentou melhor desempenho ao longo de toda a linha de transmissão.

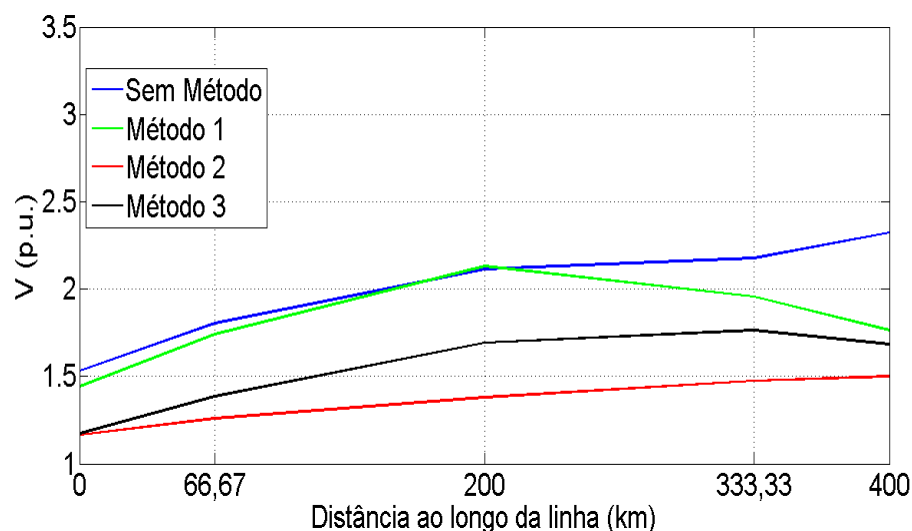


Figura 5.3 – Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de energização para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

De modo geral, ao analisar os três casos de compensação, observa-se que o grau de compensação da linha não tem influência significativa em manobras de energização. E quanto aos métodos de redução de sobretensões, verificou-se que o uso de resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios nos terminais da linha e o chaveamento controlado em conjunto com os pára-raios apresentaram desempenhos similares.

5.1.2 Linha com transposição

Os mesmos casos de simulação que foram realizados com a linha não-transposta foram feitos com a linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

Na Figura 5.4 são apresentados os perfis das sobretensões ao longo da linha para o caso 1. Na situação em que nenhum método de redução de sobretensões é aplicado no sistema, observa-se que as sobretensões têm um comportamento crescente ao longo do comprimento da linha, alcançando em torno de 3,1 p.u. no terminal receptor. Quando são colocados pára-raios nas extremidades da linha, verifica-se a redução das sobretensões. Estas são limitadas para 2,2 p.u. Ao utilizar resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios, as sobretensões são limitadas para 2,1 p.u. E ao aplicar o chaveamento controlado conjuntamente com os pára-raios, a maior sobretensão verificada é por volta de 1,9 p.u. Nesta situação, o método que apresentou melhor desempenho foi o com chaveamento controlado como se pode verificar na Figura 5.4.

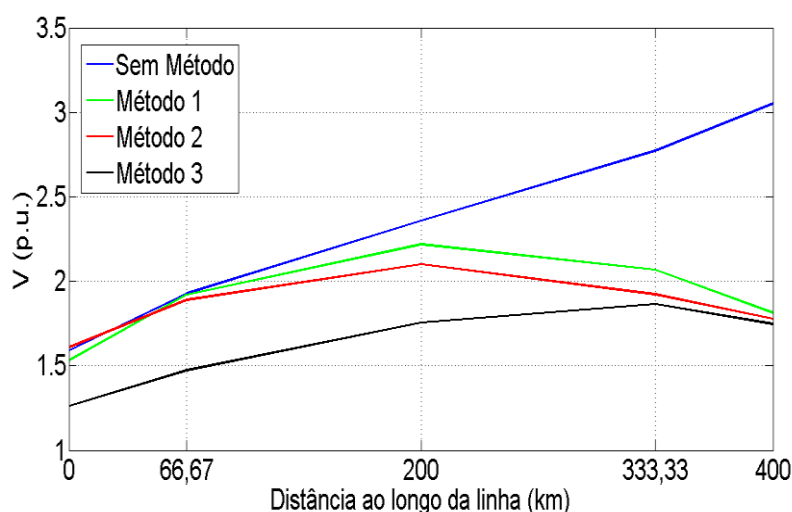


Figura 5.4 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

No caso 2 (linha com compensação de 30%), ao observar o perfil das sobretensões ao longo da linha quando nenhum método é aplicado, verifica-se que as sobretensões atingem por volta de 2,8 p.u., conforme pode ser visto na Figura 5.5. Ao utilizar pára-raios nos terminais da linha, as sobretensões são reduzidas, alcançando até 2,2 p.u. O uso dos resistores de pré-inserção combinado com os pára-raios proporcionou a redução das sobretensões, limitando-as para 1,8 p.u. A aplicação do chaveamento controlado limitou as sobretensões para em torno de 1,8 p.u. também. Ao observar os perfis de sobretensões ao longo da linha, verifica-se que o chaveamento controlado em conjunto com os pára-raios apresentou melhor desempenho em relação aos outros dois métodos.

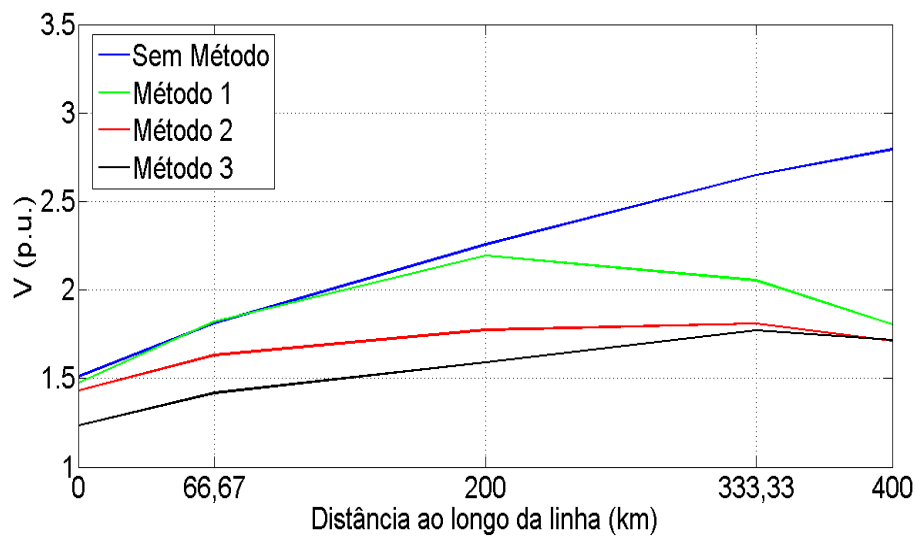


Figura 5.5 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Na Figura 5.6 são apresentados os perfis de sobretensões para o caso 3. Quando nenhum método é aplicado, as sobretensões alcançam até 2,5 p.u. Com os pára-raios nas extremidades da linha, as sobretensões são limitadas para até 2,1 p.u. Ao utilizar os resistores de pré-inserção em conjunto com os pára-raios, as sobretensões atingem em torno de 1,6 p.u. E ao aplicar o chaveamento controlado conjuntamente com os pára-raios, as sobretensões alcançam por volta de 1,7 p.u. Nesta situação, o método com os resistores de pré-inserção apresentou melhor desempenho.

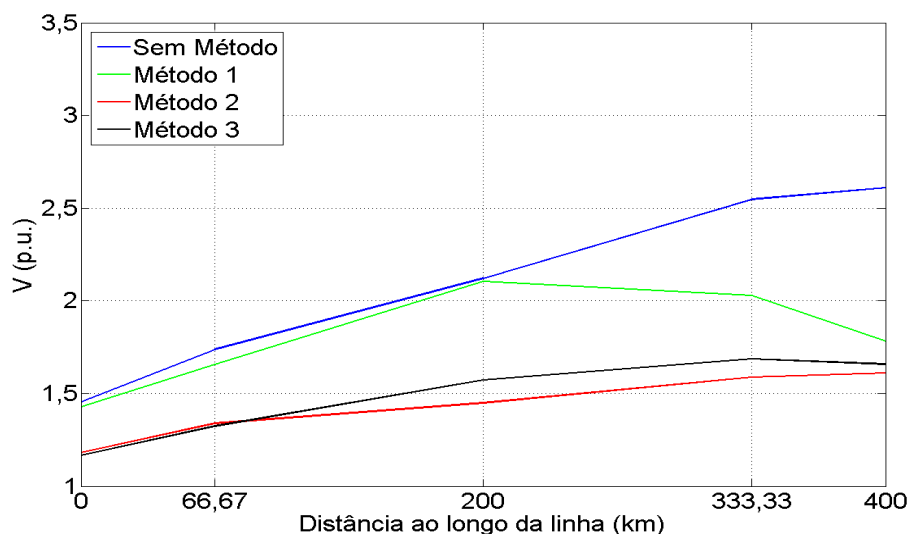


Figura 5.6 – Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de energização para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Com os resultados dos três casos de compensação, percebe-se que a compensação não tem influência expressiva na amplitude das sobretensões, como já observado para a linha não-transposta. E dentre os três métodos de redução de sobretensões avaliados, o chaveamento controlado foi o que apresentou melhor desempenho.

5.1.3 Análise dos métodos em função da transposição da linha para manobras de energização

O desempenho dos métodos na linha não-transposta e na linha com transposição será avaliado a partir das Figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

Nas manobras de energização, os níveis de tensão entre os contatos do disjuntor no instante em que se realiza a energização são os mesmos tanto para a linha não-transposta como para linha com transposição, apresentando os níveis de tensão mostrados na Figura 5.10. Então, sob este aspecto, tem-se a mesma condição nas duas linhas. De modo geral, observou-se que com o uso de pára-raios nos terminais da linha, o comportamento das sobretensões ao longo de ambas as linhas foram similares. O método com os resistores de pré-inserção em conjunto com os pára-raios apresentou melhor desempenho na linha não-transposta, enquanto que o chaveamento controlado em conjunto com pára-raios proporcionou maior redução das sobretensões na linha com transposição. Estas observações são válidas para

os três casos de compensação. Portanto, apenas quando nenhum método de redução é aplicado e quando são usados resistores de pré-inserção, observam-se menores sobretensões na linha não-transposta. Este comportamento está diretamente associado com a tensão na fase B no instante de energização. Conforme pode ser visto na Figura 5.10, a maior tensão no instante de energização é a tensão na fase A. Caso a tensão na fase B fosse a de maior amplitude, isto implicaria maiores sobretensões ao longo da linha não-transposta. Enquanto que na linha com transposição não se observa este efeito devido à troca de posição entre as fases ao longo do comprimento da linha.

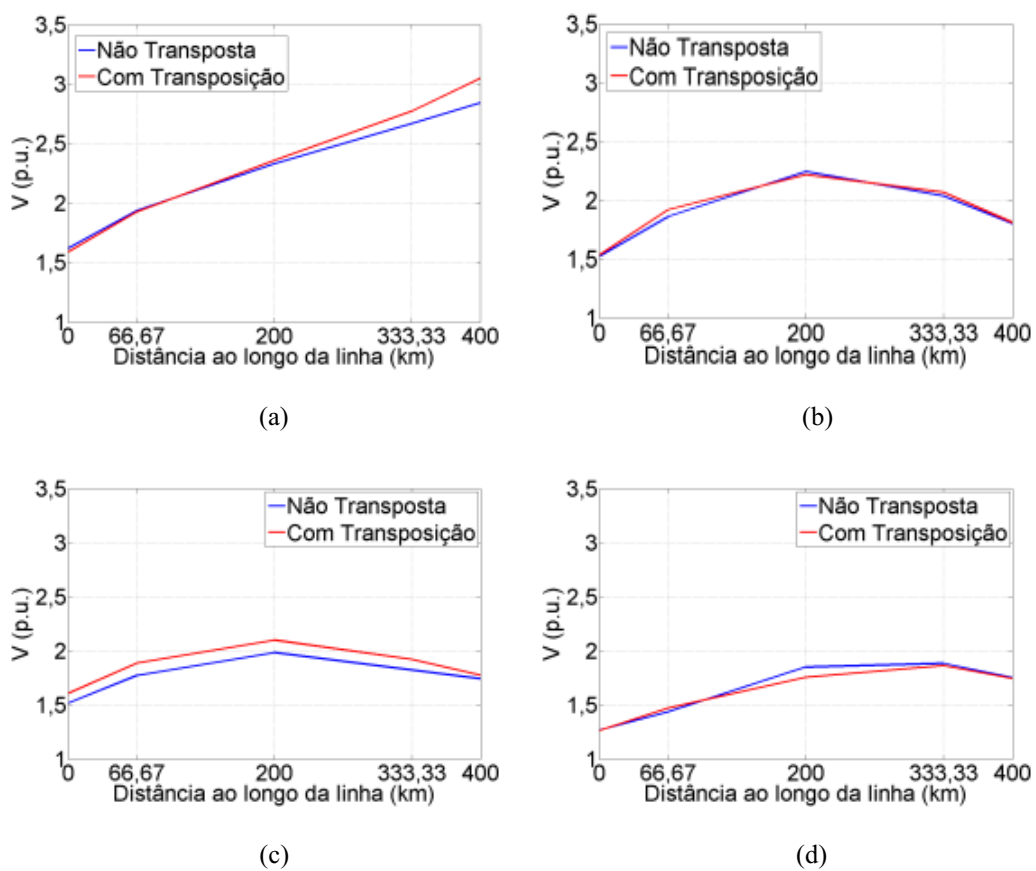
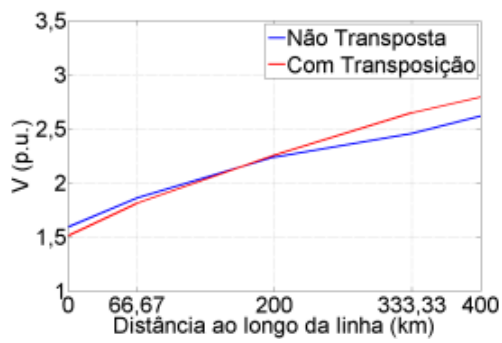
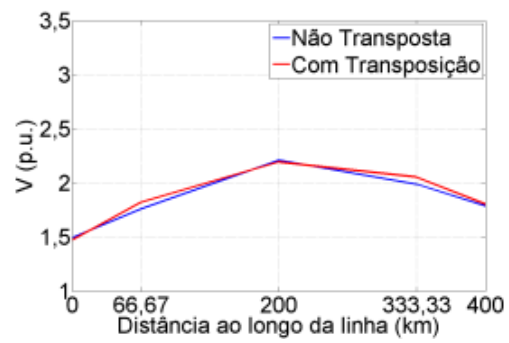


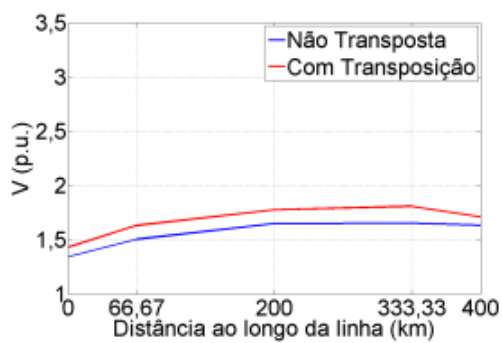
Figura 5.7 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 1: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.



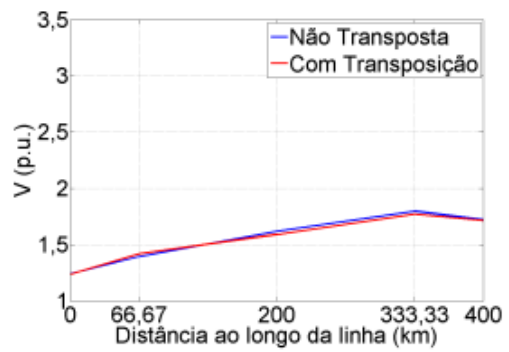
(a)



(b)

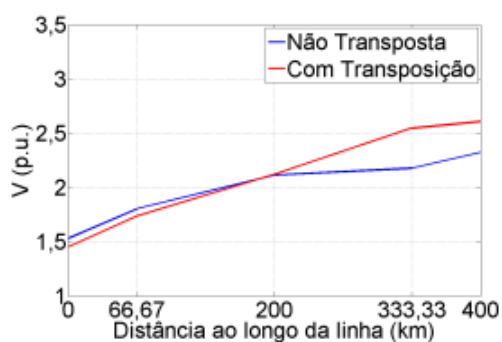


(c)

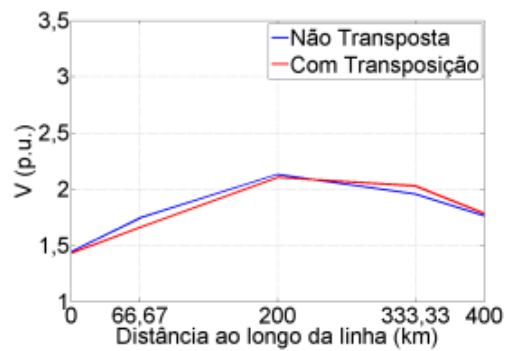


(d)

Figura 5.8 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 2:
 (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios



(a)



(b)

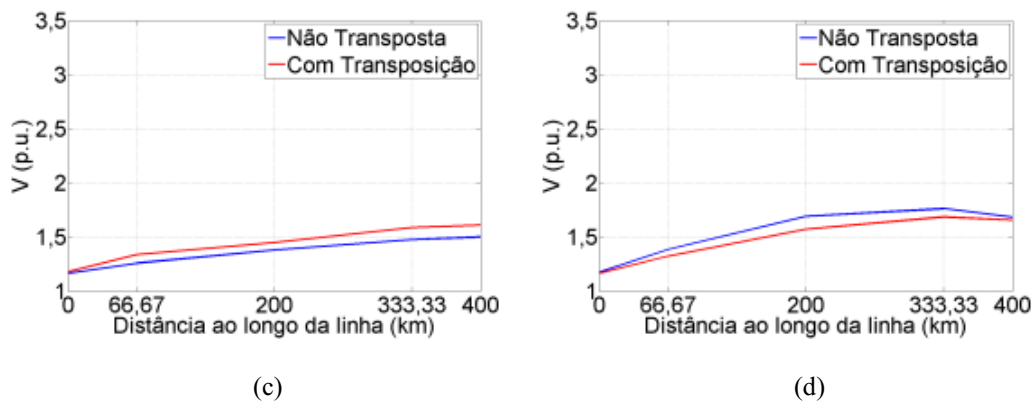


Figura 5.9 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 3: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

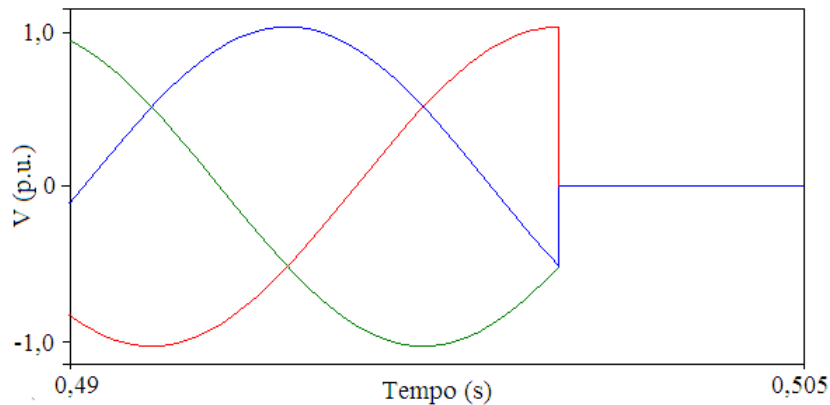


Figura 5.10 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no momento de energização (Curva vermelha: Fase A; Curva verde: Fase B; Curva azul: Fase C).

5.2 Religamento

A manobra de religamento trifásico consiste em abrir os terminais da linha de transmissão quando o sistema se encontra em regime permanente, e após um curto intervalo de tempo, efetua-se a energização da linha por meio de um dos terminais (terminal emissor), enquanto o outro permanece em aberto (terminal receptor).

A seguir são apresentados os resultados obtidos com as simulações de religamento para os mesmos casos que foram simulados para as manobras de energização.

5.2.1 Linha não-transposta

Na Figura 5.11 são apresentados os perfis das sobretensões ao longo da linha de transmissão para o caso em que não há compensação reativa da linha.

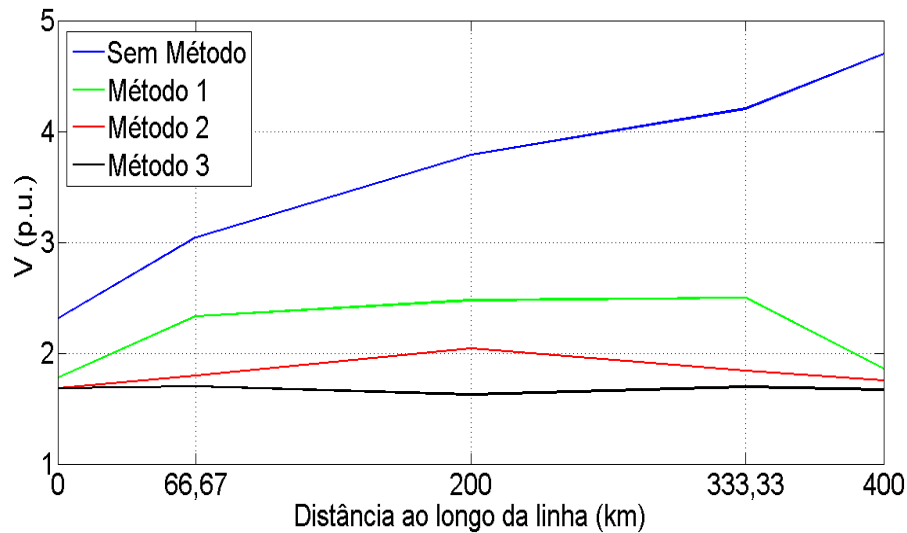


Figura 5.11 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Quando nenhum método é aplicado, observa-se o comportamento crescente das sobretensões ao longo da linha, de modo que a maior sobretensão é registrada no terminal receptor da linha, em torno de 4,7 p.u. Ao aplicar pára-raios nas extremidades da linha, observa-se uma redução das sobretensões, estas atingem até 2,5 p.u. A redução das sobretensões é ainda maior ao utilizar os resistores de pré-inserção em conjunto com os pára-raios, limitando as sobretensões para em torno de 2,1 p.u. Ao aplicar o chaveamento controlado em conjunto com os pára-raios, observa-se uma maior redução das sobretensões. A maior sobretensão registrada é em torno de 1,7 p.u., representando uma redução em mais de 60%.

Para o caso em que a linha apresenta um grau de compensação de 30%, os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.12. É notável a redução das sobretensões quando a linha é compensada, mesmo quando nenhum método é aplicado. O uso dos pára-raios nas extremidades da linha proporciona uma limitação das sobretensões para até 2,1 p.u. Ao aplicar os resistores de pré-inserção em conjunto com os pára-raios, as sobretensões são limitadas para 1,6 p.u. Enquanto que com o chaveamento controlado, a maior sobretensão

registrada tem amplitude em torno de 1,7 p.u. Neste caso, o método que utiliza os resistores de pré-inserção apresentou relativamente melhor desempenho.

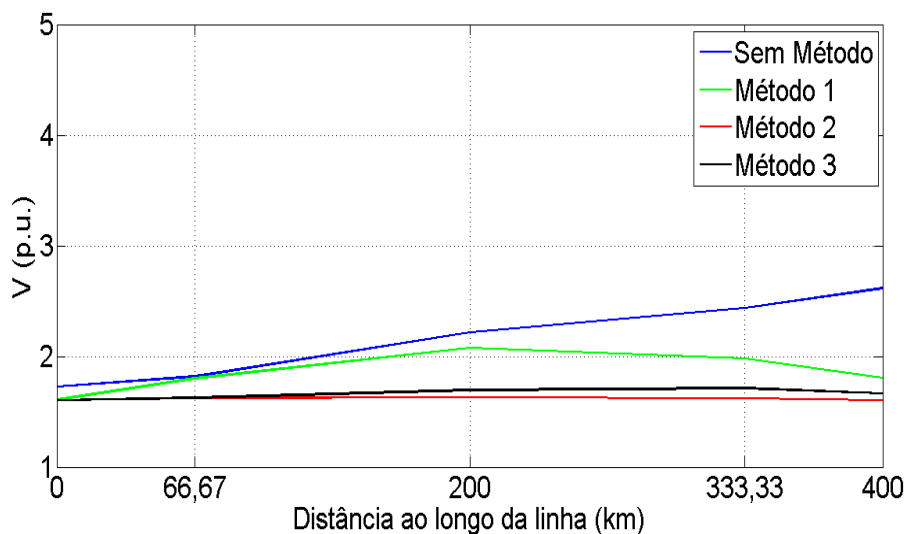


Figura 5.12 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

No caso 3, em que a linha tem grau de compensação de 60%, observa-se que quando nenhum método de redução é aplicado, as sobretensões são reduzidas para 2,1 p.u., conforme pode ser visualizado na Figura 5.13. Quando são colocados os pára-raios nas extremidades da linha, observa-se que as sobretensões são limitadas em 1,9 p.u. A redução obtida com o uso dos resistores de pré-inserção foi igual à redução obtida com o chaveamento controlado, registrando-se a máxima sobretensão em torno de 1,5 p.u.

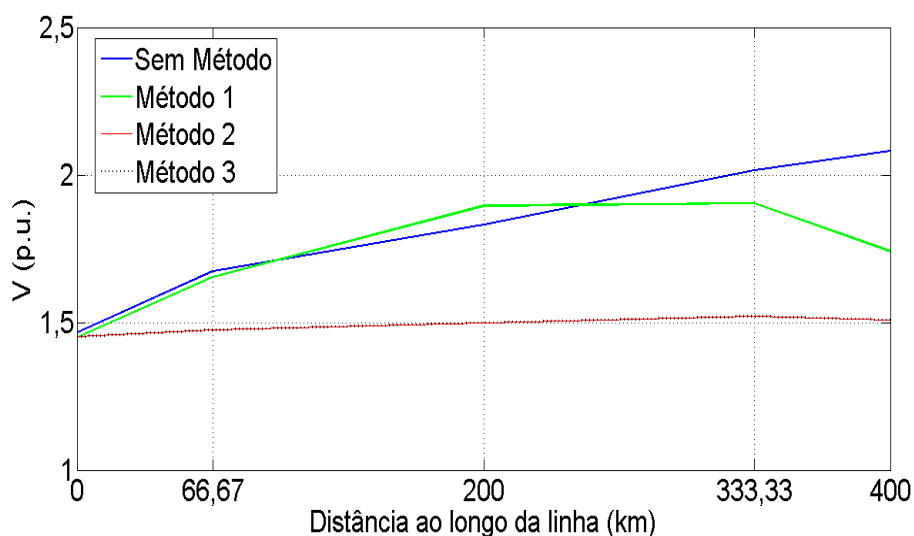


Figura 5.13 - Perfil de tensão ao longo da linha não-transposta em uma manobra de religamento para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Com os resultados obtidos, foi possível constatar a influência significativa da compensação nas manobras de religamento. Este fato deve-se a presença da carga residual na linha, de maneira que a compensação reativa proporciona o decaimento dessa carga e conseqüentemente tem-se a redução das sobretensões. Quanto aos métodos de redução de sobretensões, o uso de resistores de pré-inserção e o chaveamento controlado apresentam desempenhos compatíveis, e em algumas situações o chaveamento controlado apresenta melhor desempenho.

5.2.2 Linha com Transposição

Para a linha com transposição são simulados os mesmos casos de religamento trifásico que foram simulados para a linha não-transposta.

Para o caso 1, Figura 5.14, as sobretensões são limitadas para 4,4 p.u. quando nenhum método é aplicado. Quando são utilizados pára-raios nas extremidades da linha, as sobretensões são reduzidas para 2,5 p.u. Ao utilizar resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios, verifica-se que as sobretensões são limitadas para 2,2 p.u. E com o chaveamento controlado em conjunto com os pára-raios, a redução das sobretensões ainda é mais significativa, de maneira que a maior sobretensão registrada é por volta de 1,7 p.u.

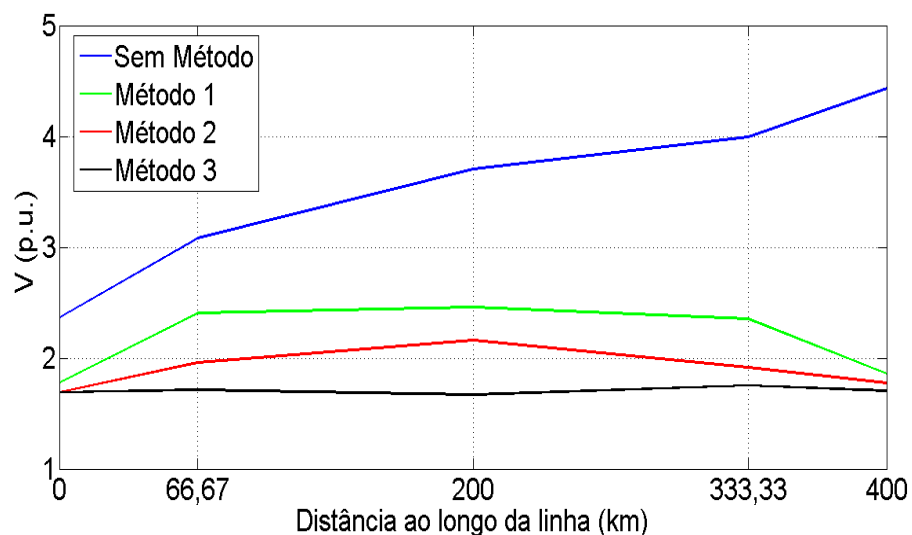


Figura 5.14 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 1 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

No caso 2, isto é, quando a linha tem grau de compensação de 30%, as sobretensões na linha sem aplicação de métodos de redução são limitadas em torno de 4,0 p.u., conforme pode ser visto na Figura 5.15. Com o uso de pára-raios, as sobretensões são reduzidas para 2,3 p.u. Ao utilizar resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios, as sobretensões atingem até 1,9 p.u. E com o chaveamento controlado, as sobretensões são limitadas em 1,7 p.u.

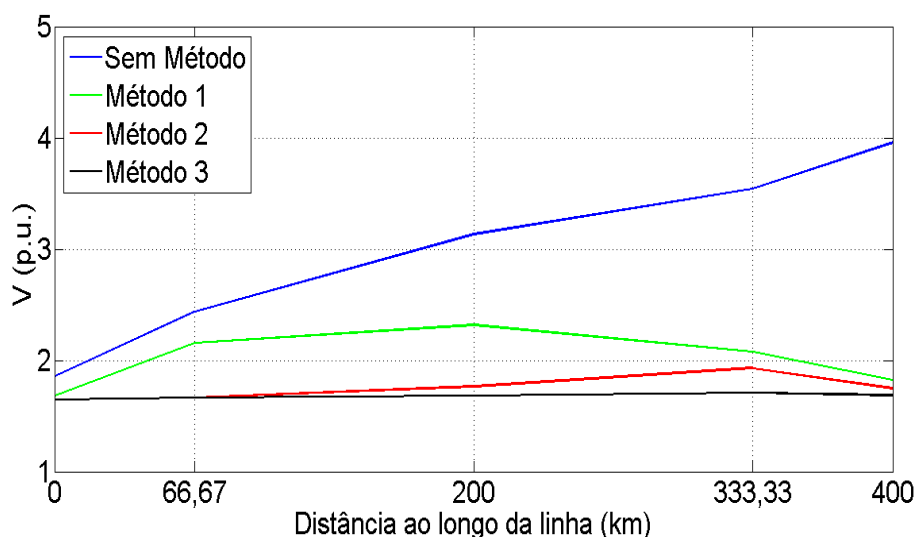


Figura 5.15 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 2 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

Quando a compensação reativa é de 60%, Figura 5.16, percebe-se uma significativa redução das sobretensões ao longo da linha, registrando-se a maior sobretensão de 2,0 p.u. Ao colocar pára-raios nos terminais da linha, as sobretensões são limitadas em 1,9 p.u. Quando são utilizados resistores de pré-inserção em conjunto com pára-raios, as sobretensões são reduzidas para 1,4 p.u. E ao aplicar o chaveamento controlado em conjunto com pára-raios, as sobretensões são limitadas em 1,5 p.u. Neste caso, observou-se que o método com resistores de pré-inserção apresentou melhor desempenho.

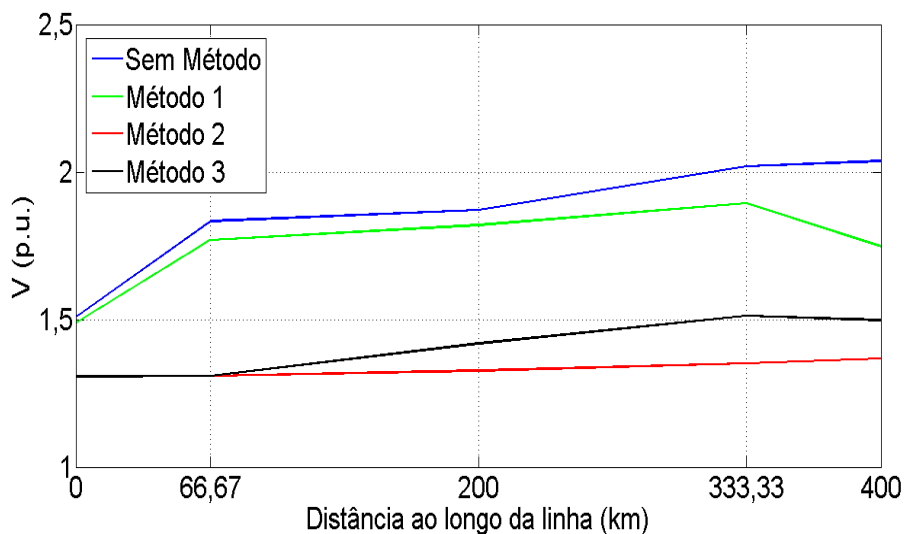
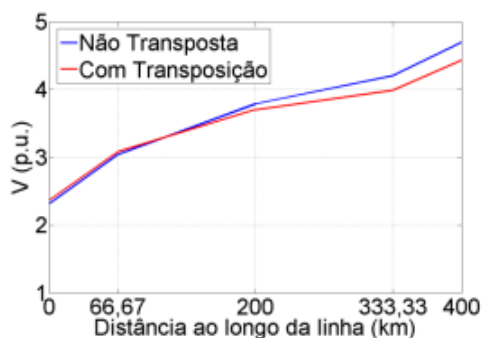


Figura 5.16 - Perfil de tensão ao longo da linha com transposição em uma manobra de religamento para o Caso 3 (Método 1: pára-raios, Método 2: resistores de pré-inserção com pára-raios; Método 3: chaveamento controlado com pára-raios).

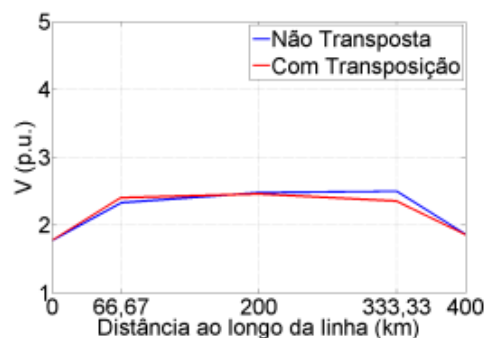
Para as manobras de religamento, a compensação reativa é um fator importante para redução das sobretensões. Observou-se que com a duplicação do grau de compensação da linha, de 30% para 60%, houve uma redução de 50% das sobretensões quando nenhum método é aplicado. De modo geral, o método que apresentou melhor desempenho foi o chaveamento controlado em conjunto com pára-raios.

5.2.3 Análise dos métodos em função da transposição da linha para manobras de energização

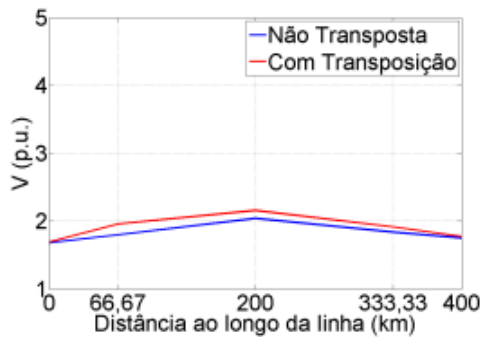
A avaliação do desempenho dos métodos na linha não-transposta e na linha com transposição nas manobras de religamento trifásico será feita a partir da análise das Figuras 5.17, 5.18 e 5.19.



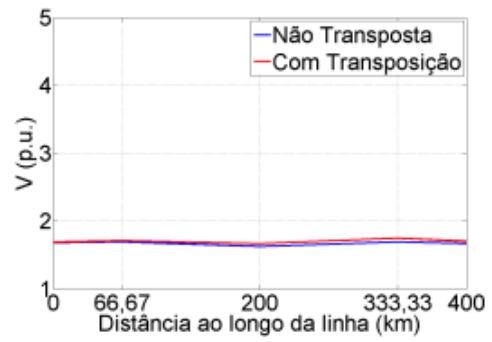
(a)



(b)

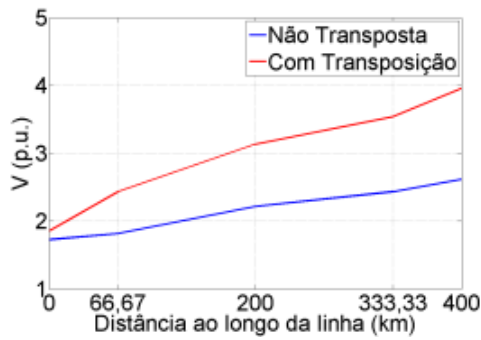


(c)

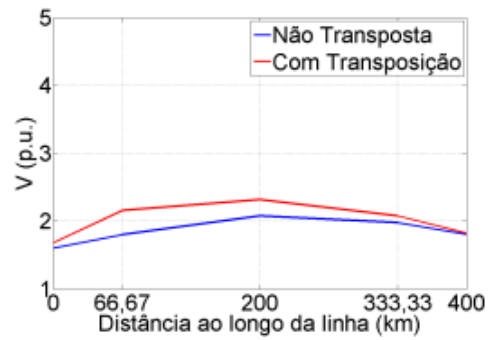


(d)

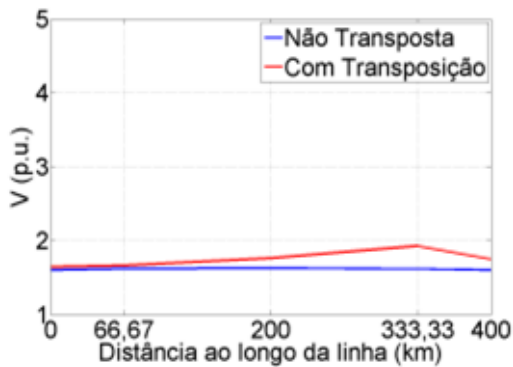
Figura 5.17 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de religamento para o Caso 1: (a) Sem método de redução, (b) Com para-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.



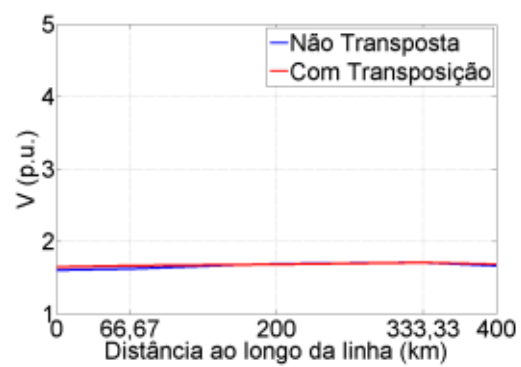
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.18 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 2: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

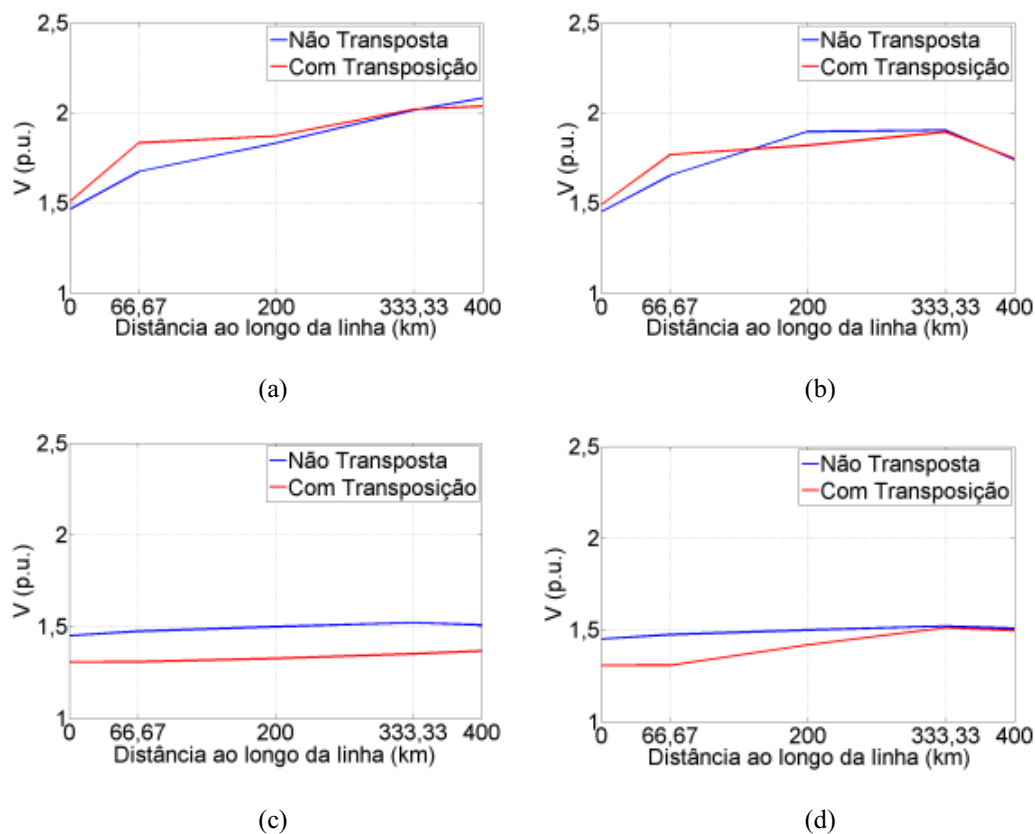


Figura 5.19 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de energização para o Caso 3: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

A amplitude das sobretensões em manobras de energização e de religamento de linhas de transmissão está diretamente associada com a tensão entre os contatos do disjuntor no instante em que ocorre o fechamento dos mesmos. Nas manobras de religamento trifásico, a compensação reativa tem grande influência devido à presença da carga residual na linha. Considerando-se estes dois aspectos, os resultados obtidos com a linha não-transposta e com a linha com transposição serão analisados.

No primeiro caso, quando a linha de transmissão não está compensada, observa-se que o comportamento das sobretensões na linha não-transposta não difere muito do que se observa na linha com transposição. Ao visualizar os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor no momento do religamento nas duas situações, verificou-se que os níveis de tensão são praticamente os mesmos, conforme pode ser visto nas Figuras 5.20 e 5.21.

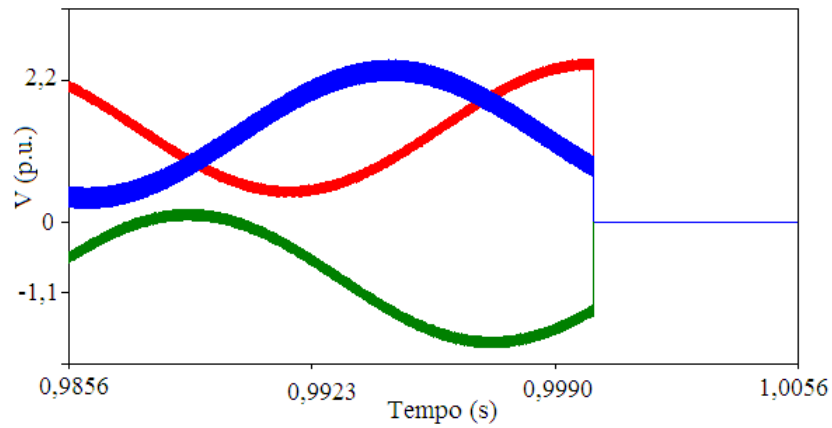


Figura 5.20 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 1.

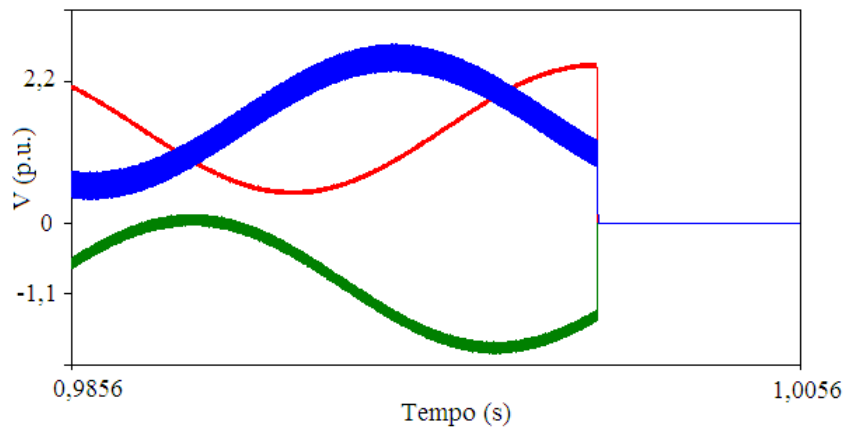


Figura 5.21 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 1.

No entanto, para o caso 2 observou-se que as maiores sobretensões ocorreram na linha com transposição. Ao verificar os níveis de tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no instante do religamento, observou-se que na linha com transposição estes níveis de tensão estavam bem mais elevados em comparação com o que se observou na linha não-transposta, como pode ser visualizado nas Figuras 5.22 e 5.23.

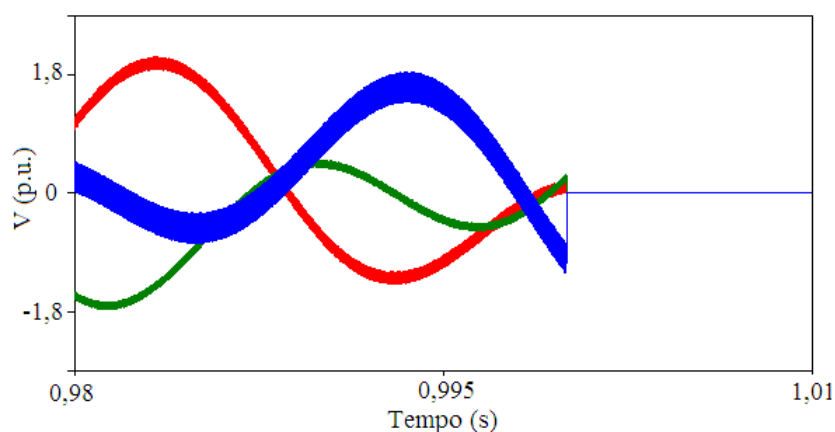


Figura 5.22 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 2.

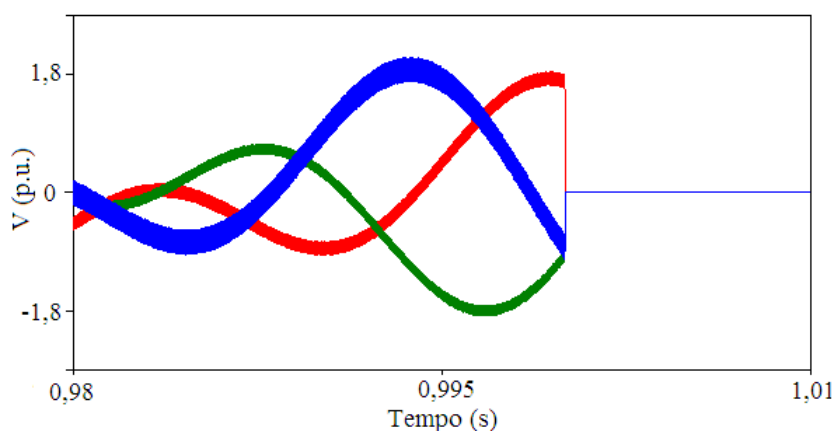


Figura 5.23 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 2.

No terceiro caso, em que se tem um maior grau de compensação, observou-se, de maneira geral, que os métodos de redução de sobretensões obtiveram melhor desempenho na linha com transposição. Os níveis de tensão entre os contatos do disjuntor no instante em que se efetua o religamento, tanto na linha não-transposta como na linha com transposição, são mostrados nas Figuras 5.24 e 5.25. Como é possível visualizar, os níveis de tensão são praticamente os mesmos nas duas situações. Portanto, com estes resultados foi possível constatar que quando os sinais de tensão sobre o disjuntor no instante de religamento são praticamente os mesmos em ambas as linhas, as sobretensões tendem a ser menores na linha com transposição, ou seja, os métodos de redução têm um desempenho relativamente melhor.

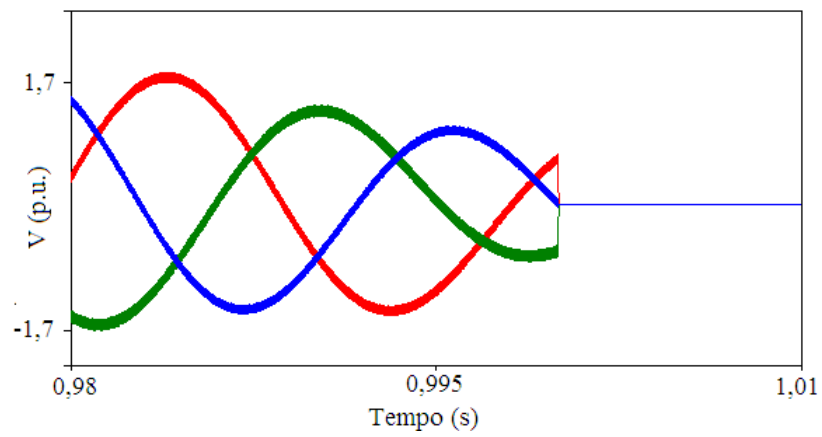


Figura 5.24 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha não-transposta no Caso 3.

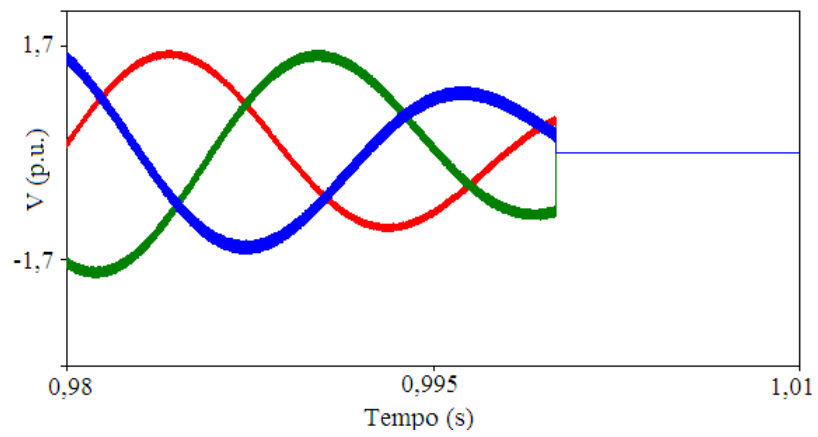


Figura 5.25 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor da linha com transposição no Caso 3.

6. Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo dos métodos de redução de sobretensões oriundas de manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão. Com os resultados obtidos a partir de simulações realizadas no ATP, constatou-se a importância dos métodos de redução de sobretensões. Quando o sistema está desprovido de qualquer método de redução de sobretensões, observou-se que as sobretensões em manobras de energização podem atingir mais de 3,0 p.u., e em manobras de religamento trifásico podem chegar a 5,0 p.u. Estas sobretensões provocam a degradação da qualidade da energia e redução da vida útil dos equipamentos, o que compromete a confiabilidade do sistema elétrico. Portanto, a aplicação de técnicas para minimizar os efeitos destas sobretensões é indispensável. Neste trabalho foram avaliados três métodos de redução de sobretensões: pára-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado. O desempenho destes métodos foi avaliado em manobras de energização e de religamento trifásico.

Os três métodos estudados apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, foram capazes de reduzir as sobretensões oriundas das manobras em linhas de transmissão. No entanto, os métodos que proporcionaram redução mais significativa das sobretensões em praticamente todos os casos simulados foram o chaveamento controlado e o método com resistores de pré-inserção. Em relação a esses dois métodos, o chaveamento controlado merece destaque por ser um método mais confiável, além de ter apresentado desempenho superior em muitas situações comparado com desempenho com os resistores de pré-inserção.

Com este trabalho também se verificou a importância da compensação reativa da linha nas manobras de religamento devido à carga residual, constatando-se uma redução significativa das sobretensões ao longo da linha de transmissão. Outro aspecto avaliado foi quanto à transposição da linha. O desempenho dos métodos foi avaliado em uma linha não-transposta e em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Nas manobras de energização foi observado que a redução proporcionada pelo uso de pára-raios nas extremidades da linha foi similar nas duas linhas. No entanto, ao aplicar o chaveamento controlado em conjunto com pára-raios, verificou-se que este método apresentou melhor desempenho na linha com transposição. Nas manobras de religamento foi possível constatar que os métodos de redução foram mais eficientes na linha com transposição, exceto em um dos casos de simulação. Esta exceção foi compreendida ao verificar os sinais de tensão entre

os contatos do disjuntor no momento do religamento nas duas linhas, pois na linha com transposição os sinais de tensão estavam relativamente elevados quando ocorreu a manobra. Portanto, de um modo geral, constatou-se que os métodos de redução de sobretensões oriundas de manobras em linhas de transmissão apresentaram melhor desempenho em uma linha com transposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. E. A., NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.

COLCLASER, R. G., WAGNER, C. L., DONOHUE, E. P. *Multistep Resistor Control of Switching Surges*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp. 1022-1028, Julho 1969.

D'AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O., MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. FURNAS, Rio de Janeiro, 1985.

D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., AMON, J. F., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. FURNAS, Rio de Janeiro, 1987.

DANTAS, K. M. C. *Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Setembro de 2007.

FROEHLICH, K., HOELZL, C., STANEK, M., CARVALHO, A. C., HOFBAUER, W., HOEGG, P., AVENT, B. L., PEELLO, D. F., SAWADA, J. H. “Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 734–740, April 1997a.

ITO, H. “Controlled Switching Technologies, State-of-the-art”. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, IEEE/PES, 2002.

LEGATE, A. C., BRUNKE, J. H., RAY, J. J., YASUDA, E. J. “Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 1, p. 223–231, January 1988.

LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.

PEREIRA, M. P. *Ressonância e Ferrorressonância em Sistemas Elétricos de Potência*, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, 2008.

RIBEIRO, J. R., MCCALLUM, M. E. “An Application of Metal Oxide Surge Arresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 282–291, January 1989.

SEYEDI, H.; SANAYE-PASAND, M.; DADASHZADEH, M. “Application of Transmission Line Surge Arresters to Reduce Switching Overvoltages”. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Montreal, Canada, June 2005.

STENSTRÖM, L.; MOBEDJINA, M. “Limitation of Switching Overvoltages by Use of Transmission Line Surge Arresters”. *CIGRE SC 33 International Conference*, Zagreb, Croatia, 1998.

ZANETTA, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo, Edusp, 2003.

ZANETTA, L. C. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. São Paulo, Editora: Livraria da Física, 2005.