

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE CONTROLE DE SOBRETENSÕES NA
ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

EDUARDO JUBINI DE MERÍCIA

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.
(Orientador)

Engº. Robson Francisco da Silva Dias
(Co-orientador)

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO – RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2008

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Sandra, ao meu irmão Everton e à minha namorada Aretha por serem minha força para continuar lutando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a minha vida e as pessoas que tenho ao meu lado.

À minha mãe Sandra, meu pai Ricardo e meu irmão Everton por todo amor e carinho que me deram, fazendo com que tudo isso fosse possível.

À minha namorada Aretha pela paciência, amor e dedicação, que a tornaram uma das pessoas mais importantes da minha vida.

À minha avó Adília por ter sido minha segunda mãe durante todo o tempo em que a primeira não pôde estar presente.

Aos meus amigos, que foram como verdadeiros irmãos, tanto nos momentos de alegria quanto nos momentos de tristeza.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica pelos conhecimentos passados, contribuindo muito para minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

A energização de uma linha de transmissão é uma manobra realizada em sistemas de potência. Essa manobra gera sobretensões transitórias que, quando não controladas, podem causar danos aos equipamentos. Por isso surge a necessidade de se utilizarem técnicas de redução desses picos de tensão.

O método de controle mais tradicional é o uso de disjuntores equipados com resistores de pré-inserção. Apesar de esse método ser bastante empregado, ele possui alto custo de implantação e manutenção.

Os pára-raios são utilizados para reduzir as sobretensões de surto atmosférico e de surto de manobra. A instalação de pára-raios de óxido metálico nas linhas tem se mostrado bastante eficiente quando utilizada como um controle adicional de sobretensões transitórias de manobra de energização.

Outro método utilizado para o controle de sobretensões é o fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor. Esse método consiste em comandar o fechamento dos 3 pólos simultaneamente no instante em que a tensão fase-terra é nula sobre um deles ou fechar cada pólo individualmente nos instantes em que a tensão fase-terra é nula sobre cada um deles.

O objetivo deste trabalho é comparar os níveis de sobretensão presentes na energização de uma linha para cada método de controle apresentado, tornando possível fazer uma comparação da eficácia desses métodos quando utilizados individualmente ou de forma combinada.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
-------------------------	----------

CAPÍTULO 2

PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	3
---	----------

2.1 ALGUNS ASPECTOS DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS	3
2.1.1 <i>Linhas com Parâmetros Invariantes com a Freqüência</i>	3
2.1.2 <i>Linhas com Parâmetros Variantes com a Freqüência</i>	10
2.2 MODELAGEM NO DOMÍNIO DE FASES	12
2.2.1 <i>Equacionamento Básico da Modelagem no Domínio de Fases</i>	13
2.2.2 <i>Modelo Universal de Linha</i>	15

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE CASO	23
-----------------------------	-----------

3.1 APRESENTAÇÃO E MODELAGEM DO SISTEMA	24
3.1.1 <i>Modelagem da Linha de Transmissão</i>	24
3.1.2 <i>Modelagem dos Reatores</i>	27
3.2 ENERGIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	30
3.2.1 <i>Energização com Disjuntor Equipado com Resistor de Pré-Inserção</i>	31
3.2.2 <i>Energização de Linha Equipada com Pára-Raios de Óxido Metálico</i>	34
3.2.3 <i>Energização da Linha com Fechamento Sincronizado dos pólos do Disjuntor</i>	40
3.2.4 <i>Energização da Linha com a Utilização Combinada dos Métodos</i>	42

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
---	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
---	-----------

Capítulo 1

Introdução

A energização de uma linha de transmissão é uma manobra efetuada com relativa frequência em sistemas de potência. Os níveis de tensão alcançados durante essa manobra são determinados pela configuração do sistema e pelas características dos seus equipamentos. Quando realizada, a energização impõe sobretensões transitórias à linha, podendo causar danos aos equipamentos conectados à mesma, fazendo com que seja necessário o emprego de métodos que minimizam essas elevações de tensão.

É impossível obter a eliminação total desses picos de tensão, porém alguns métodos já foram testados e implementados de forma a reduzir essas sobretensões para valores compatíveis com o nível de isolamento dos equipamentos do sistema.

Para linhas longas, o método mais tradicional é a utilização de disjuntores equipados com resistores de pré-inserção. Porém este método, que é utilizado na maioria das linhas de transmissão brasileiras, vem sendo descartado devido ao seu alto custo de implantação e manutenção [1].

Os pára-raios são utilizados para reduzir tanto as sobretensões de surto atmosférico quanto as sobretensões de surto de manobra. A instalação de pára-raios de óxido metálico nas linhas tem se mostrado um método bastante eficiente quando utilizado para o controle de sobretensões transitórias da manobra de energização. Uma redução maior dessas sobretensões é alcançada por meio da inserção desses pára-raios não só nos terminais da linha, como também em pontos intermediários da mesma, permitindo uma redução efetiva de tensão nesses locais [1,2].

Um outro método utilizado para reduzir as sobretensões é o fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor. O instante da operação do disjuntor na energização de uma linha possui influência direta nas elevações transitórias de tensão. Portanto, esse método consiste em comandar o fechamento dos 3 pólos simultaneamente no instante em que a tensão fase-terra é nula sobre um deles ou fechar cada pólo individualmente nos instantes em que a tensão fase-terra é nula sobre cada um deles [1,3].

O objetivo deste trabalho é comparar as sobretensões fase-terra máximas registradas em 7 pontos dispostos ao longo de uma das quatro seções de uma linha de 950 km, quando a mesma é energizada em vazio. Os testes de energização da linha foram realizados utilizando cada método de controle apresentado anteriormente, permitindo comparar a eficácia da utilização individual ou combinada desses métodos de forma a obter redução máxima de sobretensões a níveis compatíveis com o nível de isolamento dos equipamentos do sistema. Todos os testes foram feitos para dois diferentes graus de compensação *shunt* da linha, permitindo a avaliação da influência do mesmo nas sobretensões transitórias.

No capítulo 2 é apresentada uma breve teoria sobre a propagação de ondas em linhas de transmissão, considerando os parâmetros distribuídos independentes e dependentes da frequência. Em seguida é apresentada a modelagem da linha para ondas trafegantes no domínio de fases e o modelo universal de linhas, que é o modelo empregado pelo programa de simulação de transitórios eletromagnéticos *PSCAD/EMTDC* utilizado para os testes no estudo de caso.

No capítulo 3 é apresentado o estudo de caso, onde os testes da energização da linha utilizando métodos de controle de sobretensões são realizados. Nele inicialmente é feita a apresentação do sistema utilizado para o estudo, bem como a modelagem de seus componentes. Depois é descrito o processo de energização da linha. Por último, os métodos de controle e os resultados obtidos nas simulações são apresentados.

Capítulo 2

Propagação de Ondas em Linhas de Transmissão

2.1 Alguns Aspectos da Propagação de Ondas

2.1.1 Linhas com Parâmetros Invariantes com a Frequência

Inicialmente consideremos uma linha de transmissão polifásica com parâmetros distribuídos, invariantes com a frequência, de resistência, indutância, capacitância, condutância, todos por unidade de comprimento. Sejam R , L , C e G matrizes que representam respectivamente esses parâmetros. Essas matrizes possuem dimensão $n \times n$, onde n é o número de fases da linha.

Seja um trecho de comprimento Δx da linha, modelada com parâmetros distribuídos R' , L' , C' e G' por fase, como apresentado na figura 1.

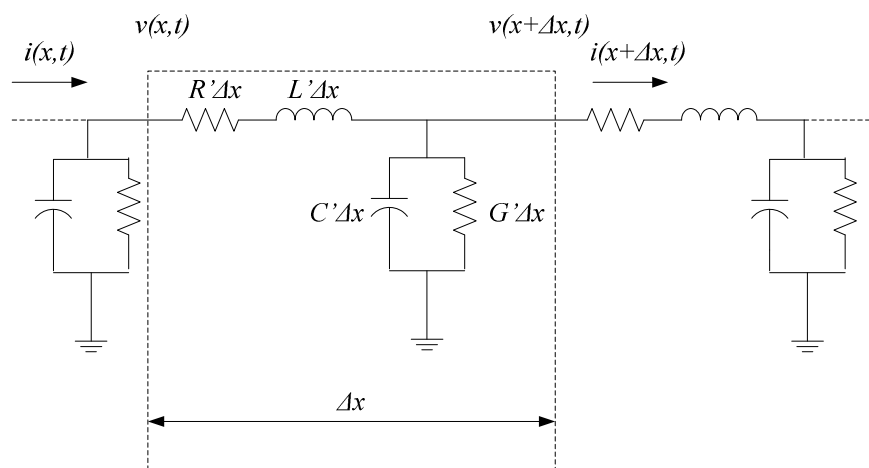


Figura 1: Trecho da linha modelada por parâmetros distribuídos

Podemos então escrever para tensões e correntes:

$$\underline{v}(x,t) - \underline{v}(x + \Delta x,t) = R\Delta x \underline{i}(x,t) + L\Delta x \frac{\partial}{\partial t} \underline{i}(x,t), \quad (2.1)$$

$$\underline{i}(x,t) - \underline{i}(x + \Delta x,t) = G\Delta x \underline{v}(x + \Delta x,t) + C\Delta x \frac{\partial}{\partial t} \underline{v}(x + \Delta x,t). \quad (2.2)$$

Onde $\underline{v}(x,t)$ e $\underline{i}(x,t)$ são vetores coluna de tensões e correntes na linha em função da posição e do tempo com dimensão é $n \times 1$, onde n é o número de fases.

Aplicando-se a transformada de Laplace em (2.1) e (2.2), temos:

$$\underline{V}(x,s) - \underline{V}(x + \Delta x,s) = R\Delta x \underline{I}(x,s) + sL\Delta x \underline{I}(x,s), \quad (2.3)$$

$$\underline{I}(x,s) - \underline{I}(x + \Delta x,s) = G\Delta x \underline{V}(x + \Delta x,s) + sC\Delta x \underline{V}(x + \Delta x,s). \quad (2.4)$$

Dividindo-se (2.3) e (2.4) por $-\Delta x$:

$$\frac{\underline{V}(x + \Delta x,s) - \underline{V}(x,s)}{\Delta x} = -(R + sL)\underline{I}(x,s), \quad (2.5)$$

$$\frac{\underline{I}(x + \Delta x,s) - \underline{I}(x,s)}{\Delta x} = -(G + sC)\underline{V}(x + \Delta x,s). \quad (2.6)$$

Fazendo Δx tender a zero e utilizando-se a definição de derivada, obtêm-se:

$$\frac{\partial \underline{V}(x, s)}{\partial x} = -(R + sL)\underline{I}(x, s), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \underline{I}(x, s)}{\partial x} = -(G + sC)\underline{V}(x, s). \quad (2.8)$$

Derivando-se (2.7) e (2.8) com relação à x e substituindo-se (2.8) na derivada de (2.7) e (2.7) na derivada de (2.8):

$$\frac{\partial^2 \underline{V}(x, s)}{\partial x^2} = (R + sL)(G + sC)\underline{V}(x, s), \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}(x, s)}{\partial x^2} = (G + sC)(R + sL)\underline{I}(x, s). \quad (2.10)$$

Fazendo:

$$Z(s) = R + sL, \quad (2.11)$$

$$Y(s) = G + sC, \quad (2.12)$$

onde $Z(s)$ é a matriz de impedâncias série e $Y(s)$ é a matriz de admitâncias *shunt*, por unidade de comprimento, vem:

$$\frac{\partial^2 \underline{V}(x, s)}{\partial x^2} = Z(s)Y(s)\underline{V}(x, s), \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}(x, s)}{\partial x^2} = Y(s)Z(s)\underline{I}(x, s). \quad (2.14)$$

Segundo [4], uma matriz simétrica e balanceada A , com dimensão 3 x 3, é uma matriz da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Para linhas não transpostas, as matrizes de parâmetros distribuídos são simétricas, porém não balanceadas [4]. Nessas condições, $Z(s)Y(s) \neq Y(s)Z(s)$.

As soluções gerais para (2.13) e (2.14) são:

$$\underline{V}(x, s) = e^{-\Gamma_v(s)x} \underline{V}^+(0, s) + e^{\Gamma_v(s)x} \underline{V}^-(0, s), \quad (2.16)$$

$$\underline{I}(x, s) = e^{-\Gamma_i(s)x} \underline{I}^+(0, s) + e^{\Gamma_i(s)x} \underline{I}^-(0, s), \quad (2.17)$$

onde $\underline{V}^+(0,s)$ e $\underline{I}^+(0,s)$ são as condições de contorno na origem ($x = 0$) para a componente progressiva da onda. Já $\underline{V}^-(0,s)$ e $\underline{I}^-(0,s)$ são as condições de contorno para as componentes regressivas. Vale lembrar que as componentes da onda, quando utilizadas separadamente, também são soluções de (2.13) e (2.14).

Derivando-se (2.16) e (2.17) duas vezes com relação a x :

$$\frac{\partial^2 \underline{V}(x,s)}{\partial x^2} = \Gamma_v^2(s) \underline{V}(x,s), \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}(x,s)}{\partial x^2} = \Gamma_i^2(s) \underline{I}(x,s). \quad (2.19)$$

Comparando-se (2.18) e (2.19) com (2.13) e (2.14), temos:

$$\Gamma_v(s) = \sqrt{Z(s)Y(s)}, \quad (2.20)$$

$$\Gamma_i(s) = \sqrt{Y(s)Z(s)}. \quad (2.21)$$

onde $\Gamma_v(s)$ e $\Gamma_i(s)$ são respectivamente, as matrizes de funções de propagação das ondas de tensão e corrente, que podem ser determinadas a partir dos parâmetros distribuídos da linha calculados em determinadas frequências. Os elementos dessas matrizes são os modos de propagação das ondas.

Fazendo:

$$H_v(x, s) = e^{-\Gamma_v(s)x}, \quad (2.22)$$

$$H_i(x, s) = e^{-\Gamma_i(s)x}, \quad (2.23)$$

onde $H_v(x, s)$ e $H_i(x, s)$ são matrizes de funções exponenciais dos elementos das matrizes de funções de propagação $\Gamma_v(s)$ e $\Gamma_i(s)$. Para simplificar a nomenclatura, denominou-se essas matrizes por matrizes de propagação.

Tensões e correntes podem ser relacionadas em um ponto qualquer da linha por uma matriz de admitâncias características, como mostrado na equação (2.24).

$$\underline{I}(x, s) = Y_c(s)\underline{V}(x, s), \quad (2.24)$$

onde Y_c é a matriz admitância característica.

Substituindo-se a componente progressiva de (2.16) em (2.8) temos:

$$\Gamma_i(s)\underline{I}(x, s) = Y(s)\underline{V}(x, s). \quad (2.25)$$

Substituindo (2.21) e (2.24) em (2.25):

$$\sqrt{Y(s)Z(s)}Y_c\underline{V}(x, s) = Y(s)\underline{V}(x, s). \quad (2.26)$$

Podemos tirar que:

$$\sqrt{Y(s)Z(s)}Y_c(s) = Y(s). \quad (2.27)$$

E, finalmente:

$$Y_c(s) = \sqrt{[Y(s)Z(s)]^{-1}}Y(s). \quad (2.28)$$

Apesar do desenvolvimento da equação (2.28) ter sido feito utilizando-se a componente progressiva da onda de tensão, vale informar que o mesmo resultado seria obtido se fosse utilizada a componente regressiva.

Se considerarmos a linha idealmente transposta, as matrizes de impedâncias série e admitâncias *shunt* passam a ser simétricas e balanceadas. Assim temos que:

$$Y(s)Z(s) = Z(s)Y(s). \quad (2.29)$$

Conseqüentemente:

$$\Gamma(s) = \Gamma_v(s) = \Gamma_i(s), \quad (2.30)$$

e

$$H(x,s) = H_v(x,s) = H_i(x,s) = e^{-\Gamma(s)x}. \quad (2.31)$$

2.1.2 Linhas com Parâmetros Variantes com a Freqüência

Em uma linha de transmissão, a resistência longitudinal total é dada pelas contribuições da resistência interna dos condutores e da resistência do caminho de retorno pelo solo. A indutância longitudinal pode ser expressa pela contribuição dos condutores, pelo caminho de retorno pelo solo e pelas indutâncias mútuas entre fases. A capacitância é influenciada somente pela geometria da linha.

A inclusão do efeito pelicular e das correções de Carson [5] no cálculo dos parâmetros da linha revela que a resistência e a indutância variam com a freqüência, permanecendo a capacitância aproximadamente constante [6]. Portanto, para se obter um modelo mais preciso podemos escrever, no domínio da freqüência:

$$Z(\omega) = Z_{int}(\omega) + Z_{ext}(\omega) + Z_{solo}(\omega), \quad (2.32)$$

$$Y(\omega) = Y_{ext}(\omega). \quad (2.33)$$

Onde:

$Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega)$ é a matriz de impedâncias série;

$Y(\omega) = G + j\omega C$ é a matriz de admitâncias *shunt*;

$Z_{int}(\omega)$ é a matriz de impedâncias internas dos condutores;

$Z_{ext}(\omega)$ é a matriz de impedâncias externas dadas pela geometria da linha;

$Y_{ext}(\omega)$ é a matriz de admitâncias externas, também dadas pela geometria da linha.

Assim podemos reescrever (2.13) e (2.14) como:

$$\frac{\partial^2 \underline{V}(x, \omega)}{\partial x^2} = Z(\omega)Y(\omega)\underline{V}(x, \omega), \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}(x, \omega)}{\partial x^2} = Y(\omega)Z(\omega)\underline{I}(x, \omega). \quad (2.35)$$

Na modelagem no domínio modal os sistemas de equações acopladas dados por (2.34) e (2.35) são transformados em sistemas de equações independentes, permitindo uma solução imediata. Esta transformação é obtida fazendo-se a decomposição espectral de $Y(\omega)Z(\omega)$, obtendo-a na forma diagonalizada.

Considerando a linha idealmente transposta, temos:

$$T^{-1}(\omega)Y(\omega)Z(\omega)T(\omega) = \Lambda(\omega), \quad (2.36)$$

onde $\Lambda(\omega)$ é a matriz diagonal dos autovalores e $T(\omega)$ é a matriz de autovetores associados aos autovalores de $Y(\omega)Z(\omega)$, denominada matriz de transformação. Dessa forma é possível obter a matriz de admitâncias características modais e a matriz das funções modais de propagação.

Note que, no desenvolvimento das equações do modelo modal, a matriz de transformação é dependente da frequência. Porém, a implementação do modelo modal em programas computacionais de simulação de transitórios eletromagnéticos considera essas matrizes constantes, com o intuito de evitar convoluções numéricas nas transições entre os domínios da

freqüência e do tempo. Esta consideração permite uma sensível redução no tempo de simulação, porém só é adequada para linhas de transmissão com configuração simétrica dos condutores [6].

Quando a linha possui configuração assimétrica, matrizes de transformação dependentes da freqüência devem ser utilizadas pois a aproximação por matrizes constantes introduz um erro considerável nos cálculos, limitando a aplicação do modelo modal. Neste caso, a modelagem direta no domínio de fases deve ser empregada, eliminando o problema com as matrizes de transformação. Esta modelagem é apresentada na seção seguinte, bem como sua implementação no PSCAD/EMTDC.

2.2 Modelagem no Domínio de Fases

A inclusão da matriz de transformação dependente da freqüência na solução de transitórios eletromagnéticos pode ser evitada pela formulação direta das equações no domínio de fases. Porém, este método também torna necessário o ajuste dos elementos das matrizes $H(\omega)$ e $Y_c(\omega)$ no mesmo domínio.

Os elementos de $Y_c(\omega)$ são de fácil ajuste no domínio de fases, pois seus elementos são funções denominadas pelo termo em inglês *smooth*, que significa dizer que essas funções variam relativamente pouco com a variação da freqüência. No entanto, ajustar $H(\omega)$ é uma tarefa mais difícil, pois seus elementos possuem contribuições modais com diferentes tempos de trânsito [7].

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos da modelagem direta no domínio de fases. Como o estudo de caso deste trabalho é feito utilizando o PSCAD/EMTDC, será apresentado também um resumo da teoria do modelo universal de linhas utilizado pelo programa.

2.2.1 Equacionamento Básico da Modelagem no Domínio de Fases

Podemos reescrever as equações que regem o comportamento das ondas de tensão e corrente no domínio da frequência por:

$$\frac{\partial^2 \underline{V}(x, \omega)}{\partial x^2} = Z(\omega)Y(\omega)\underline{V}(x, \omega), \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}(x, \omega)}{\partial x^2} = Y(\omega)Z(\omega)\underline{I}(x, \omega). \quad (2.38)$$

Vimos também que a solução completa para (2.38), considerando a linha idealmente transposta é:

$$\underline{I}(x, \omega) = e^{-\Gamma(\omega)x} \underline{I}^+(0, \omega) + e^{\Gamma(\omega)x} \underline{I}^-(0, \omega). \quad (2.39)$$

A equação (2.8) pode ser reescrita, utilizando (2.12), como:

$$\underline{V}(x, \omega) = -Y^{-1}(\omega) \frac{d}{dx} \underline{I}(x, \omega) = Y_c^{-1}(\omega) [e^{-\Gamma(\omega)x} \underline{I}^+(0, \omega) - e^{\Gamma(\omega)x} \underline{I}^-(0, \omega)]. \quad (2.40)$$

Multiplicando (2.40) por $Y_c(\omega)$ pela esquerda e somando com (2.39):

$$Y_c(\omega)\underline{V}(x, \omega) + \underline{I}(x, \omega) = 2e^{-\Gamma(\omega)x} \underline{I}^+(0, \omega). \quad (2.41)$$

Seja l o comprimento da linha. Portanto, para o nó k ($x = 0$), temos:

$$Y_c(\omega)\underline{V}_k(\omega) + \underline{I}_k(\omega) = 2\underline{I}^+(0, \omega). \quad (2.42)$$

E para o nó m ($x = l$):

$$Y_c(\omega)\underline{V}_m(\omega) + \underline{I}_m(\omega) = 2e^{-\Gamma(\omega)l}\underline{I}^+(0, \omega), \quad (2.43)$$

Substituindo (2.42) em (2.43):

$$Y_c(\omega)\underline{V}_m(\omega) + \underline{I}_m(\omega) = H(\omega)[Y_c(\omega)\underline{V}_k(\omega) + \underline{I}_k(\omega)], \quad (2.44)$$

onde,

$$H(\omega) = e^{-\Gamma(\omega)l} = e^{-\sqrt{Y(\omega)Z(\omega)}l}, \quad (2.45)$$

$$Y_c(\omega) = \sqrt{Y(\omega)Z(\omega)Z^{-1}(\omega)}. \quad (2.46)$$

Definindo-se o sentido da corrente no nó m entrando na linha:

$$Y_c(\omega)\underline{V}_m(\omega) - \underline{I}_m(\omega) = H(\omega)[Y_c(\omega)\underline{V}_k(\omega) + \underline{I}_k(\omega)]. \quad (2.47)$$

Analogamente:

$$Y_c(\omega)\underline{V}_k(\omega) - \underline{I}_k(\omega) = H(\omega)[Y_c(\omega)\underline{V}_m(\omega) + \underline{I}_m(\omega)]. \quad (2.48)$$

As equações (2.47) e (2.48) relacionam tensões e correntes nos dois terminais da linha. Elas podem ser representadas pelo equivalente Norton mostrado na figura 2.2.

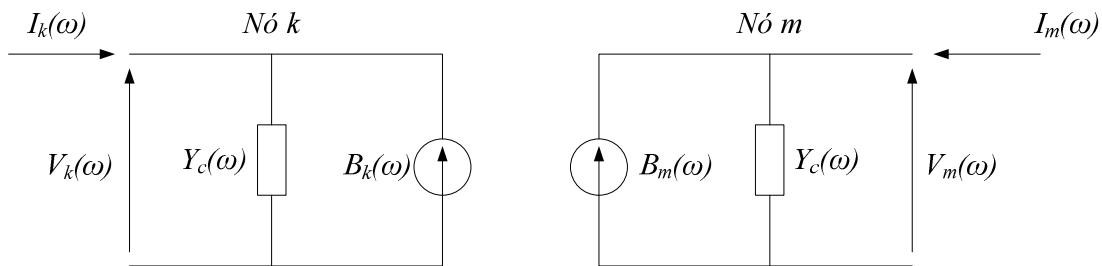


Figura 2.2: Equivalente Norton

$B_k(\omega)$ e $B_m(\omega)$ são determinadas pela aplicação do método dos nós em k e m respectivamente.

2.2.2 Modelo Universal de Linha

O modelo universal desenvolvido em [7] é aplicável a todas as configurações de linha de transmissão. Essa aplicabilidade é obtida pela formulação direta no domínio de fases utilizando características modais na aproximação da matriz de propagação.

Sabe-se que uma linha de transmissão pode ser caracterizada por duas matrizes: a matriz propagação H e a matriz admitância característica Y_c . A simulação da propagação de ondas em uma linha no domínio do tempo pode ser feita utilizando convoluções numéricas com as funções

H e Y_c nas suas formas no domínio do tempo. Porém, este procedimento exige um longo tempo de simulação. Uma formulação mais eficiente é aproximar os elementos de H e Y_c por funções racionais no domínio da frequência, permitindo a implementação de um método de solução recursivo para as convoluções. Portanto, a maior dificuldade da utilização deste modelo está em ajustar os elementos de H e Y_c por funções racionais.

A matriz de propagação H é primeiramente ajustada no domínio modal. Os pólos e os tempos de trânsito obtidos são então utilizados para ajustar H no domínio de fases, assumindo que todos os pólos contribuem para todos os seus elementos. Os resíduos das funções racionais obtidas pelo ajuste são determinados pela solução de uma equação linear utilizando-se o método dos mínimos quadrados.

A matriz admitância característica é ajustada diretamente no domínio de fases, pois possui elementos que variam relativamente pouco com a variação da frequência, além de não possuírem tempos de trânsito.

A precisão obtida por esse modelo fez com que o mesmo fosse empregado no programa de simulação de transitórios PSCAD/EMTDC.

Os modos de $H(\omega)$ são os elementos da matriz diagonal $H^m(\omega)$, obtida pela decomposição modal apresentada na equação (2.48):

$$H(\omega) = T(\omega)H^m(\omega)T^{-1}(\omega). \quad (2.49)$$

A matriz de autovetores $T(\omega)$ é determinada pelo método de Newton-Raphon proposto em [9], que consiste na solução do problema de autovalores e autovetores dado pela equação (2.50):

$$[Y(\omega)Z(\omega) - \lambda_{kk}(\omega)I]T_{ck}(\omega) = 0, \quad (2.50)$$

onde,

$\lambda_{kk}(\omega)$ é o autovalor genérico da matriz $Y(\omega)Z(\omega)$;

I é a matriz identidade;

$T_{ck}(\omega)$ é a k -ésima coluna de $T(\omega)$.

Determinada a matriz $T(\omega)$, podemos escrever (2.50):

$$H(\omega) = T(\omega)e^{-\Lambda(\omega)l}T^{-1}(\omega) = \sum_{k=1}^n M_k(\omega)e^{-\Lambda_{kk}(\omega)l} = \sum_{k=1}^n H_k(\omega), \quad (2.51)$$

onde,

$A(\omega)$ é a forma diagonalizada de $\sqrt{Y(\omega)Z(\omega)}$;

$M_k(\omega)$ é a matriz resultante do produto da k -ésima coluna de $T(\omega)$ com a k -ésima linha de $T^{-1}(\omega)$;

$A_{kk}(\omega)$ é o k -ésimo elemento da matriz diagonal $A(\omega)$;

$H_k(\omega)$ é a k -ésima parcela de $H(\omega)$, referente ao k -ésimo modo de propagação.

A contribuição de cada modo de $H(\omega)$ pode ser expressa pela equação (2.52):

$$H_k(\omega) = M_k(\omega)e^{-\Lambda_{kk}(\omega)l} = M_k(\omega)e^{-\Lambda_{kk}(\omega)l}e^{-j\omega\tau_k}, \quad (2.52)$$

onde,

τ_k é o tempo de trânsito do k -ésimo modo de propagação;

$\Lambda'_{kk}(\omega)$ é a parte real de $\Lambda_{kk}(\omega)$.

Inicialmente podemos observar que para ajustar cada elemento $H_k(\omega)$ por funções racionais é preciso ajustar cada fator $M_k(\omega)$ e $e^{-\Lambda'_{kk}(\omega)l}$ separadamente. Porém, de acordo com [8], é possível obter uma boa aproximação para $H_k(\omega)$ calculando somente os pólos de $e^{-\Lambda'_{kk}(\omega)l}$.

A técnica de aproximação desenvolvida em [10], chamada *Vector Fitting*, é utilizada para ajustar os fatores $e^{-\Lambda'_{kk}(\omega)l}$ por funções racionais e para calcular o tempo de trânsito τ_k de cada modo.

De posse dos pólos ajustados de $e^{-\Lambda'_{kk}(\omega)l}$ e dos tempos de trânsito, é possível determinar cada elemento da matriz de propagação $H(\omega)$ no domínio de fases por meio da equação (2.53):

$$H_{ij}(j\omega_1) = \sum_{k=1}^n \left[\sum_{m=1}^{N_k} \frac{c_{mkij}}{j\omega_1 - p_{mk}} \right] e^{-j\omega_1 \tau_k}, \quad (2.53)$$

onde,

N_k é o número de pólos do modo ajustado k ;

n é o número de modos;

ω_1 é uma frequência angular qualquer;

p_{mk} é o m -ésimo pólo do k -ésimo modo ajustado.

Escrevendo (2.53) para várias frequências, obtemos uma equação do tipo:

$$BX = C, \quad (2.54)$$

onde os resíduos a serem determinados estão em X . Cada linha de B e C corresponde à uma frequência e cada coluna de X e C corresponde à um elemento da matriz $H(\omega)$. A equação (2.54) pode ser resolvida utilizando o método dos mínimos quadrados.

O ajuste de $Y_c(\omega)$ no domínio de fases pode ser obtido pelo mesmo método empregado para $H(\omega)$. Como $Y_c(\omega)$ não possui tempos de trânsito, um conjunto de pólos pode ser obtido pelo ajuste da soma de todos os seus modos.

Da álgebra linear temos que para uma matriz quadrada D , de dimensão $n \times n$ e com autovalores λ_i , vale a relação (2.55):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n D_{ii}, \quad (2.55)$$

Portanto, o ajuste da matriz de impedâncias características pode ser feito ajustando a soma dos elementos de sua diagonal.

Utilizando novamente o *Vector Fitting*, obtemos uma aproximação para $Y_c(\omega)$ na forma apresentada em (2.56):

$$f(s) = \sum_{m=1}^n \frac{c_m}{s - a_m} + d. \quad (2.56)$$

Os resíduos e o termo independente de (2.56) são determinados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando os mesmo pólos obtidos no ajuste de $H(\omega)$.

Obtidas as matrizes $H(\omega)$ e $Y_c(\omega)$ no domínio de fases, é possível relacionar as funções das ondas trafegantes no domínio do tempo. Para tanto, definamos as equações (2.57), (2.58), (2.59) e (2.60):

$$F_k(\omega) = Y_c(\omega)V_k(\omega) + I_k(\omega), \quad (2.57)$$

$$B_k(\omega) = Y_c(\omega)V_k(\omega) - I_k(\omega), \quad (2.58)$$

$$F_m(\omega) = Y_c(\omega)V_m(\omega) + I_m(\omega), \quad (2.59)$$

$$B_m(\omega) = Y_c(\omega)V_m(\omega) - I_m(\omega). \quad (2.60)$$

Utilizando (2.47) e (2.48) obtemos (2.61) e (2.62):

$$B_m(\omega) = H(\omega)F_k(\omega), \quad (2.61)$$

$$B_k(\omega) = H(\omega)F_m(\omega). \quad (2.62)$$

Passando (2.47) e (2.48) para o domínio do tempo, aplicando a transformada inversa de Fourier, e utilizando (2.57) e (2.59) temos:

$$i_k(t) = y_c(t) * v_k(t) - h(t) * f_m(t), \quad (2.63)$$

$$i_m(t) = y_c(t) * v_m(t) - h(t) * f_k(t). \quad (2.64)$$

onde,

$$f_m(t) = y_c(t) * v_m(t) + i_m(t), \quad (2.65)$$

$$f_k(t) = y_c(t) * v_k(t) + i_k(t), \quad (2.66)$$

e * denota integral de convolução entre matriz e vetor.

Como foi visto anteriormente, os elementos das matrizes $H(\omega)$ e $Y_c(\omega)$ são aproximados por funções racionais. Portanto, suas respectivas funções no domínio do tempo, $h(t)$ e $y_c(t)$, são matrizes cujos elementos são somatórios de funções exponenciais. Em [7] são apresentados métodos de solução para as integrais de convolução em (2.63) e (2.64).

Passando (2.58) e (2.60) para o domínio do tempo, obtemos:

$$b_k(t) = y_c(t) * v_k(t) - i_k(t), \quad (2.66)$$

$$b_m(t) = y_c(t) * v_m(t) - i_m(t), \quad (2.67)$$

onde * indica integral de convolução.

As equações (2.66) e (2.67) são implementadas nos programas de simulação por meio do circuito equivalente apresentado na figura 2.3.

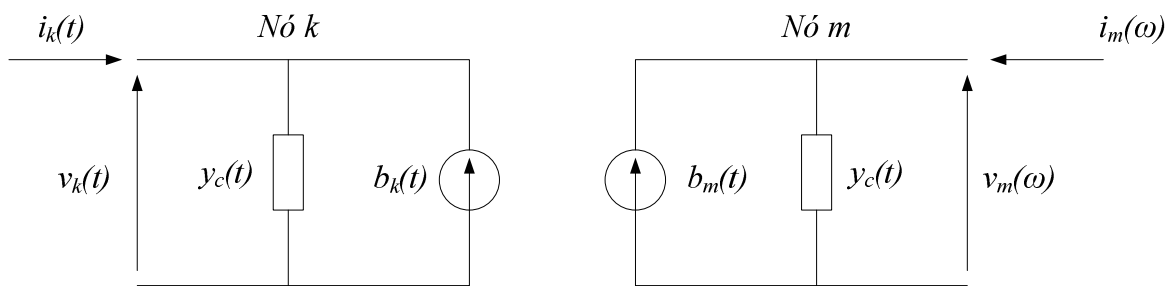


Figura 2.3: Circuito equivalente Norton para implementação do modelo de linha em programas de simulação.

As funções $b_k(t)$ e $b_m(t)$ armazenam informações do passado das correntes nos nós k e m , permitindo a atualização das funções e a simulação computacional, no domínio do tempo, do comportamento das ondas de tensão e corrente.

Capítulo 3

Estudo de Caso

Quando uma manobra é efetuada em um sistema de potência, grandes elevações de tensão podem ocorrer na rede, com duração determinada pelo tempo de acomodação da transição de uma condição de equilíbrio pré-manobra para uma condição de equilíbrio pós-manobra. Essas sobretensões são resultadas de alguma alteração introduzida no sistema pela operação de disjuntores, e são elas que determinam o nível de isolamento dos equipamentos [4].

Uma manobra bastante comum é a energização de linhas de transmissão, sendo efetuada pelo fechamento de disjuntores.

Neste capítulo analisaremos a eficiência dos métodos de controle de sobretensões na energização de uma linha de transmissão. Para isto utilizaremos um sistema como caso base, no qual faremos os testes com cada método.

3.1 Apresentação e Modelagem do Sistema

O estudo dos métodos de controle de sobretensão foi realizado em um sistema real de 500kV, composto por cinco barras, radial e com configuração apresentada na figura 5.1.

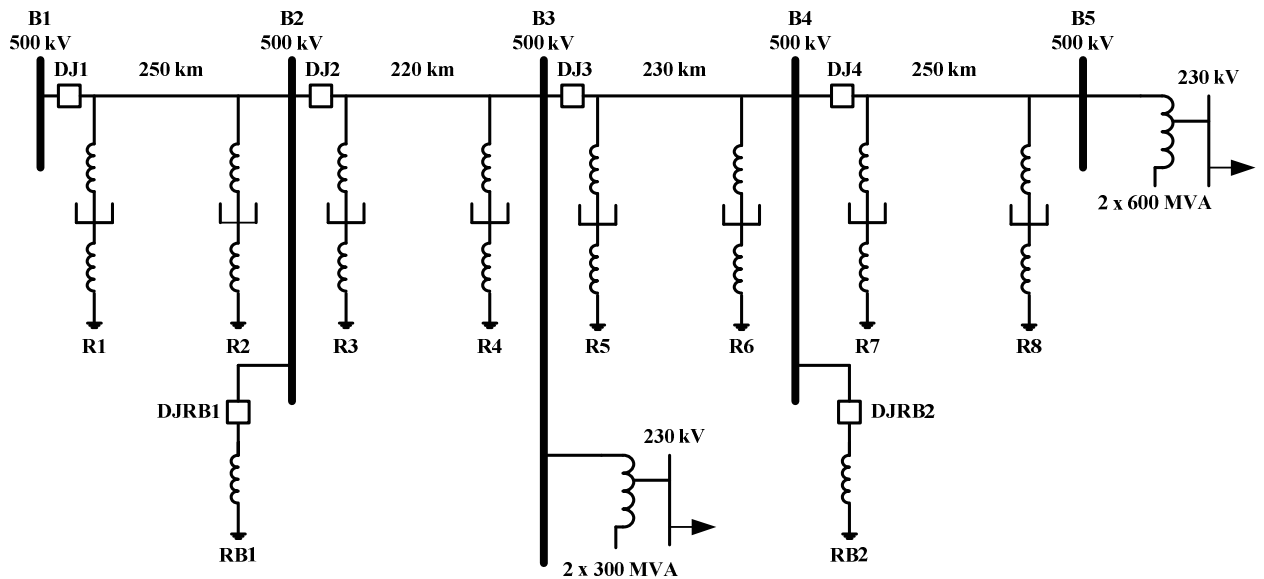


Figura 3.1 Sistema de 500 kV.

Nesta seção serão apresentados os modelos de linha e de reatores utilizados nas simulações. A modelagem dos transformadores e das cargas não será necessária, pois este estudo é feito com o sistema em vazio.

3.1.1 Modelagem da Linha de Transmissão

A linha de transmissão do sistema possui comprimento total de 950 km e é dividida em quatro seções limitadas por cinco barras, conforme apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1.

Comprimento das seções da LT.

Seção	B1 - B2	B2 - B3	B3 - B4	B4 - B5
Comprimento (km)	250	220	230	250

A figura 3.2 apresenta a configuração da torre, bem como dos cabos condutores e pára-raios.

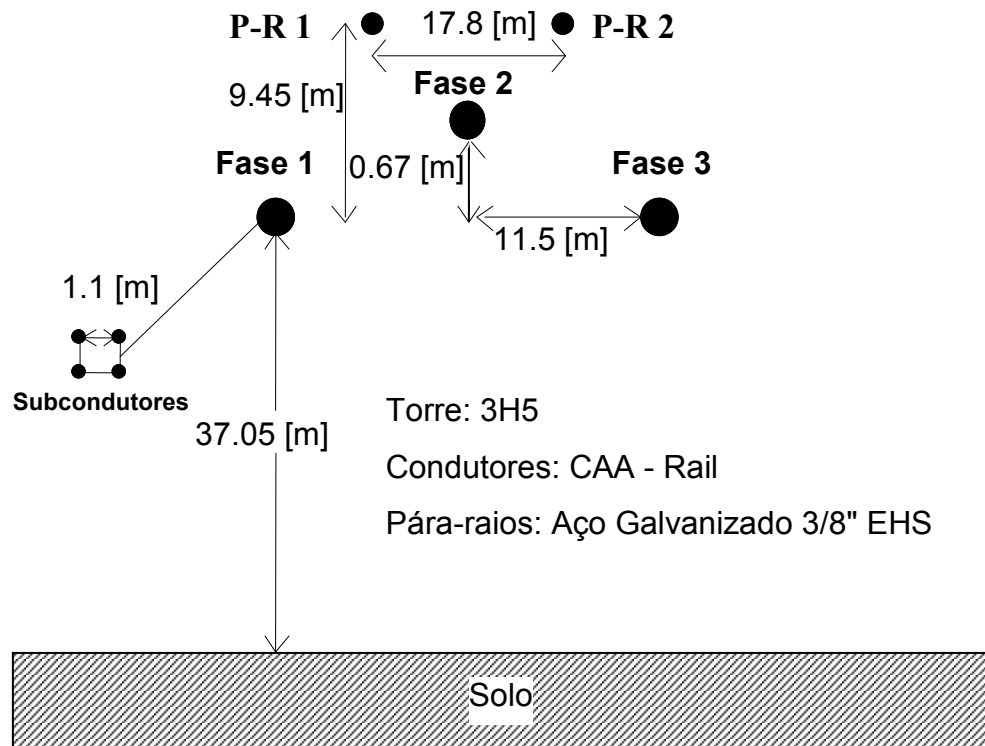


Figura 3.2: Configuração da torre.

O solo foi considerado plano, com resistividade de 4000 Ωm e permeabilidade relativa igual a 1. Sua impedância foi calculada no PSCAD/EMTDC por aproximação analítica, que é a aproximação proposta por Deri-Semlyen para o cálculo da integral de Carson [10].

Considerou-se a linha idealmente transposta, com flecha no meio do vão de 26,11 m para os cabos condutores e 22,42 m para cabos pára-raios. Cada fase é composta de 4 subcondutores dispostos nos vértices de um quadrado de lado igual a 1,1 m. As distâncias e flechas, bem como a configuração da torre, são as mesmas que foram utilizadas em [1].

O modelo de linha utilizado para as simulações no PSCAD/EMTDC foi o *Frequency Dependent (Phase) Model*, que tem sua teoria apresentada no capítulo 2 pelo modelo universal de linha. Este é basicamente um modelo de elementos distribuídos para ondas trafegantes. Ele considera a matriz de autovetores $T(\omega)$ e todos os parâmetros da linha dependentes da frequência. O *Frequency Dependent (Phase) Model* é um modelo que apresenta elevada precisão para simulação computacional de regimes transitórios em linhas de transmissão [11].

Os condutores de fase utilizados são AAC - Rail e os cabos pára-raios são de Aço Galvanizado 3/8'' EHS. As características dos condutores de fase e dos cabos pára-raios estão apresentadas na tabela 3.2:

Tabela 3.2.
Características dos Condutores e dos Cabos Pára-Raios.

Tipo	Nome	Raio (m)	Resistência CC (Ω/km) a 25°C
Condutores de Fase	Rail	0,014795	0,061143
Cabos Pára- Raios	Aço Galvanizado 3/8'' EHS	0,004572	3,510000

Calculando os parâmetros da linha para a frequência fundamental utilizando a rotina *line constant* do PSCAD/EMTDC foram encontrados os seguintes valores apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3.
Parâmetros Básicos Unitários da Linha a 60 Hz.

Componente	Impedância Série (Ω/km)	Admitância Shunt ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Não-Homopolar	0,016086 + j 0,273432	j 6,045770
Homopolar	0,435178 + j 1,442288	j 3,523722

A impedância característica da linha é $\sqrt{\frac{0,273432}{6,04577 \times 10^{-6}}} = 212 \Omega$.

3.1.2 Modelagem dos Reatores

Os reatores são instalados em um sistema com a função de compensar a potência reativa da linha, evitando elevações de tensão ao longo da mesma devido às capacitâncias *shunt*. Este fenômeno é conhecido como efeito Ferranti.

O sistema em estudo possui reatores de linha e reatores de barra. Os modelos utilizados para os reatores de linha e de barra são mostrados nas figuras 3.3 e 3.4 respectivamente:

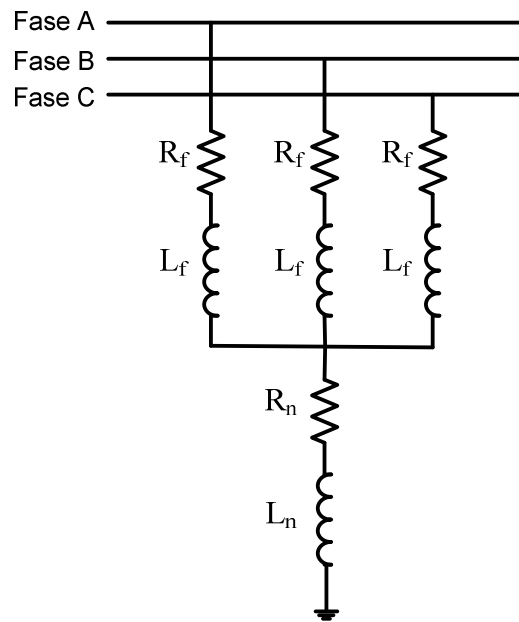


Figura 3.3: Modelo para reator de linha.

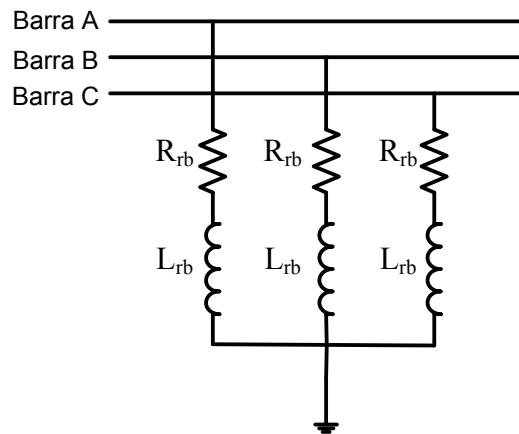


Figura 3.4: Modelo para reator de barra.

Os reatores de linha são diretamente conectados ao sistema, portanto não são manobráveis. Já os reatores de barra são manobráveis por meio de um disjuntor que os conecta as barras da subestação. No nosso caso, os reatores de barra são inseridos durante a energização da linha, permanecendo conectados a ela.

O valor utilizado para indutância de neutro L_n é obtido em [12] e mostrado na tabela 3.4.

Adotaram-se fatores de qualidade de 400 para reatores de fase e 40 para reatores de neutro, que são os mesmos utilizados em [1]. Assim, as resistências dos reatores de fase e de neutro foram determinadas pela equação (3.1):

$$Q = \frac{X}{R}, \quad (3.1)$$

onde X é a reatância em ohms em 60 Hz, R é a resistência em ohms e Q é o fator de qualidade.

Os reatores foram dimensionados para dois casos diferentes de compensação *shunt* para a linha inteira, ou seja, para os 950 km de linha. As compensações foram de 70 % e 95 %. Em ambos os casos considerou-se a compensação dada com os dois reatores de barra conectados à rede. As tabelas 3.4 e 3.5 apresentam as características dos reatores obtidos para cada caso.

Tabela 3.4.

Indutâncias e Resistências por fase dos reatores para 70% de compensação.

Reator	Indutância de fase (H)	Resistência de fase (Ω)	Indutância de neutro (H)	Resistência de neutro (Ω)
R1	6,5991	6,2195	1,1080	10,4430
R2	4,4874	4,2293	1,1080	10,4430
R3	4,4874	4,2293	1,1080	10,4430
R4	5,9832	5,6390	1,1080	10,4430
R5	4,4874	4,2293	1,1080	10,4430
R6	4,4874	4,2293	1,1080	10,4430
R7	4,4874	4,2293	1,1080	10,4430
R8	5,9832	5,6390	1,1080	10,4430
RB1	8,9748	8,4585	-	-
RB2	8,9748	8,4585	-	-

Tabela 3.5.**Indutâncias e Resistências por fase dos reatores para 95% de compensação.**

Reator	Indutância de fase (H)	Resistência de fase (Ω)	Indutância de neutro (H)	Resistência de neutro (Ω)
R1	5,8480	5,5116	1,1080	10,4430
R2	3,9766	3,7479	1,1080	10,4430
R3	3,9766	3,7479	1,1080	10,4430
R4	5,3022	4,9972	1,1080	10,4430
R5	3,9766	3,7479	1,1080	10,4430
R6	3,9766	3,7479	1,1080	10,4430
R7	3,9766	3,7479	1,1080	10,4430
R8	5,3022	4,9972	1,1080	10,4430
RB1	7,9533	7,4958	-	-
RB2	7,9533	7,4958	-	-

3.2 Energização da Linha de Transmissão

A linha de transmissão do sistema apresentado na figura 3.1 é uma linha longa, sendo portanto dividida em seções. Assim, a linha é energizada por seção, na direção da barra B1 para a barra B5. Primeiro, o disjuntor 1 é fechado. Depois, o disjuntor do reator da barra 2. Em seguida são fechados os disjuntores 2 e 3 e o disjuntor do reator da barra 4 nesta seqüência. Por último é fechado o disjuntor 4, energizando a última seção da linha. O fechamento dos disjuntores só é comandado quando as tensões em suas respectivas barras já estão em regime. O objetivo deste estudo é analisar as sobretensões na energização da última seção da linha, dada pelo fechamento do disjuntor 4.

A tensão de pré-energização da barra B4 era de 0.9553 p.u. para linha 95% compensada e de 1.0046 p.u. para linha 70% compensada. Os valores em p.u. têm como tensão base a tensão fase-terra do sistema.

A tensão na barra B1 foi colocada 1.0 p.u. em ambos os casos de compensação *shunt* da linha, utilizando uma fonte de tensão ideal.

O fechamento dos pólos do disjuntor 4 foi efetuado no instante de maior tensão fase terra e no instante de tensão nula sobre eles. Este último procedimento é conhecido como uma variante do fechamento sincronizado. Os testes foram feitos sob essas duas condições, com resistor de pré-inserção e com pára-raios. O fato de se comandar o fechamento no instante de tensão máxima permite a simulação do pior caso de sobretensão de energização.

Foram medidas as tensões fase terra em 7 pontos da linha, sendo dois nas barras terminais e cinco intermediários. As tensões registradas foram as tensões máximas absolutas observadas no período transitório posterior ao fechamento dos pólos do disjuntor.

3.2.1 Energização com Disjuntor Equipado com Resistor de Pré-Inserção

O método de controle de sobretensões mais utilizado é a pré-inserção de um resistor em série com a linha durante o fechamento dos pólos do disjuntor. Esse resistor é instalado junto à câmara do disjuntor e, durante o deslocamento do contato móvel do mesmo, ele é colocado temporariamente em série com a linha, durante um intervalo aproximado de 6 a 10 ms. Esse processo cria um divisor de tensão entre o resistor e a linha, o que reduz as sobretensões durante o transitório. Por fim, o resistor é “by-passado”, sendo retirado da linha [4].

Em geral, o valor do resistor de pré-inserção é da ordem de grandeza da impedância característica da linha. Em uma primeira análise pode-se pensar que aumentando o valor do resistor pode-se reduzir as sobretensões. Porém, quando o resistor é curto-circuitado, são introduzidas novas sobretensões no sistema, que aumentam com o aumento do seu valor de

resistência [13]. O valor do resistor, bem como seu tempo de inserção são determinados em função do outro, de forma a se obterem valores ótimos do ponto de vista da redução de sobretensão transitória.

Para as simulações desse trabalho, utilizou-se um resistor de 400Ω com tempo de pré-inserção de 10 ms. O valor do resistor foi o mesmo utilizado em [1], porém o tempo de inserção de 10 ms foi escolhido por apresentar melhores resultados que os demais, testados com o mesmo valor de resistor. Resultados ainda melhores devem ser obtidos com uma resistência igual à impedância característica da linha e com tempo de inserção menor.

O perfil das sobretensões transitórias máximas absolutas registradas ao longo do último trecho energizado da linha para o casos de 70 e 95% de compensação, com e sem resistor de pré-inserção, são apresentados nas figuras 3.5 e 3.6 respectivamente.

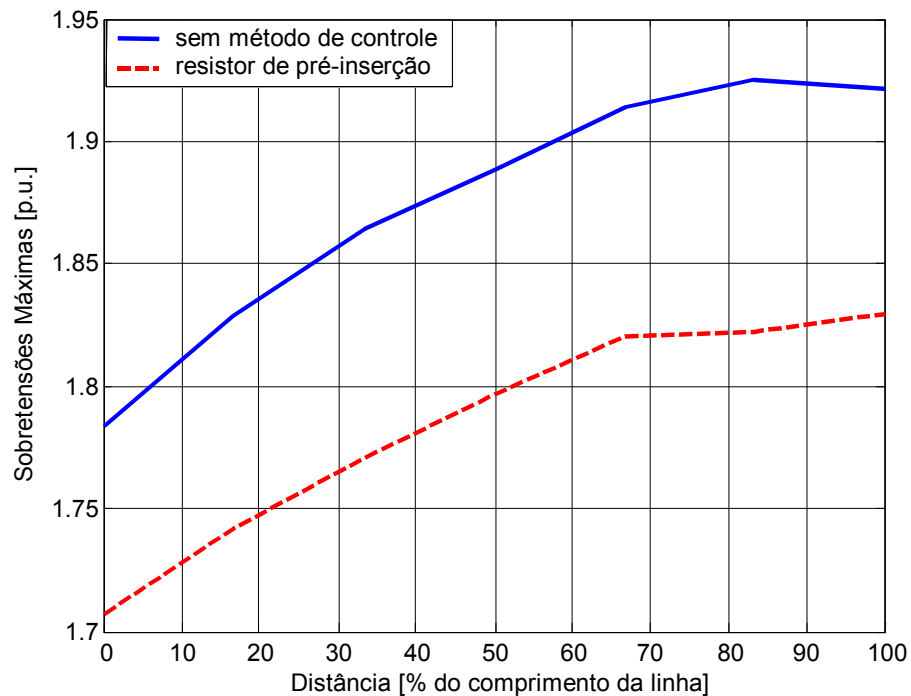


Figura 3.5: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada - resistor de pré-inserção.

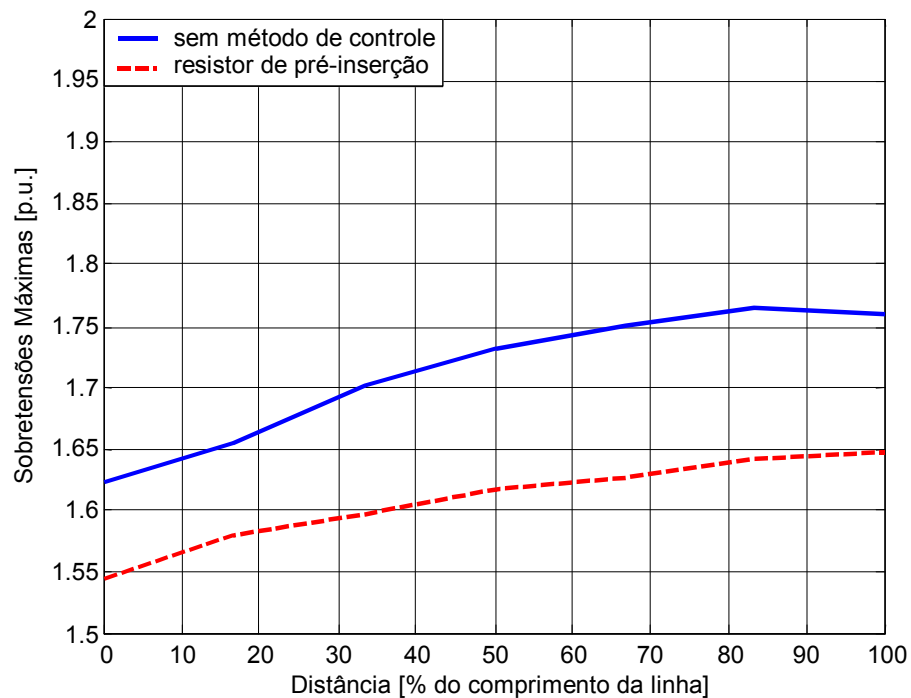


Figura 3.6: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada - resistor de pré-inserção.

Com a utilização deste método, foram alcançadas reduções de 12,48 % e 14,4 % com relação à sobretensão transitória absoluta máxima obtida no terminal receptor da linha, sem a utilização de métodos de redução. As reduções foram, respectivamente, para os casos de 70 % e 95 % de compensação *shunt* da linha.

Pode-se observar que as sobretensões máximas são reduzidas também pelo grau de compensação *shunt* da linha. Além disso, o método apresentou uma redução percentual maior quando empregado na linha com 95 % de compensação.

3.2.2 Energização de Linha Equipada com Pára-Raios de Óxido Metálico

Os sistemas elétricos estão sujeitos a sobretensões tanto de origem interna, que são as sobretensões de manobra, como de origem externa, que são as descargas atmosféricas. A coordenação do isolamento e o projeto econômico dos equipamentos estão diretamente relacionados com a aplicação dos pára-raios, que têm a função de limitar sobretensões [4].

Neste trabalho utilizou-se pára-raios constituídos de óxido metálico, conhecidos também como pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Os modelos mais recentes desse tipo de pára-raio podem apresentar alta capacidade de absorção de energia para classes de tensão mais baixas, podendo ser aplicados como um método econômico de controle de sobretensões [1].

A quantidade, o posicionamento e o tipo dos pára-raios instalados dependem do comprimento da linha e da importância do sistema que se quer proteger.

No *PSCAD/EMTDC*, os pára-raios de óxido metálico são modelados como um resistor não-linear em série com uma fonte de tensão variável. A curva característica de tensão por corrente utilizada para as simulações foi a curva padrão do *PSCAD/EMTDC*. O pára-raio é o ASEA XAP-A e sua curva de tensão por corrente é apresentada na figura 3.7.

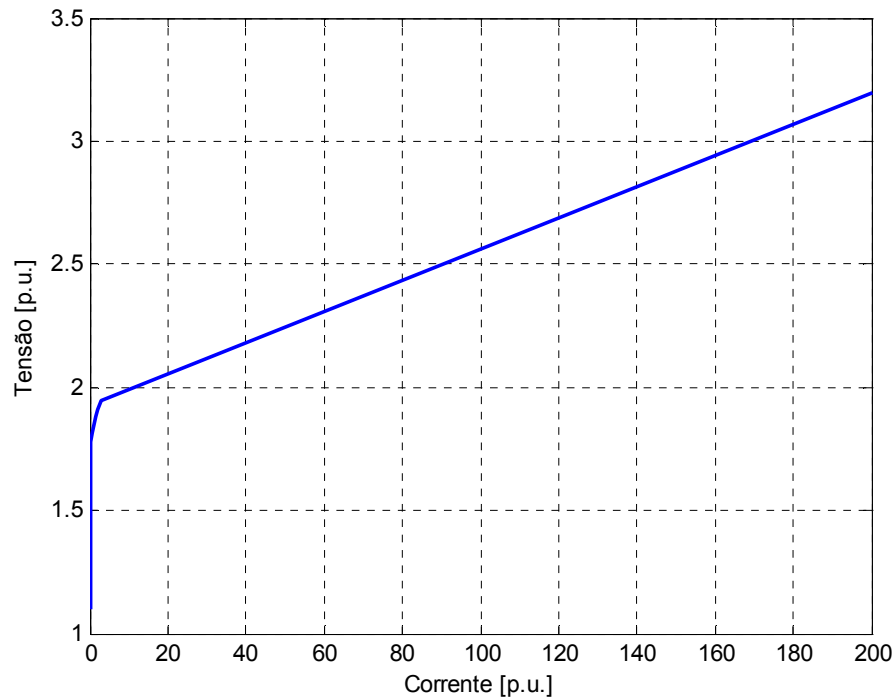


Figura 3.7: Curva tensão x corrente do pára-raio ASEA XAP-A padrão do *PSCAD*.

As simulações foram feitas com pára-raios de classes de tensão de 420 kV, 396 kV e 360 kV, as mesmas utilizadas em [1]. Além da instalação de pára-raios nos terminais da linha, testamos também a inserção de três pára-raios, sendo um no meio da linha, e quatro pára-raios posicionados de forma equidistante. Todas as simulações foram feitas para os dois casos de compensação da linha. Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 3.8 a 3.13.

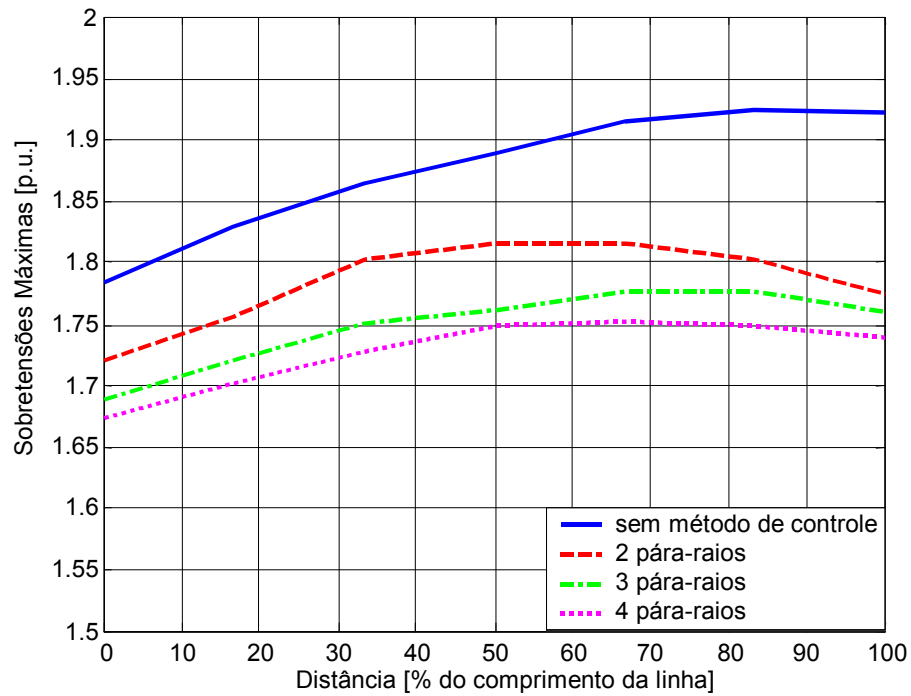


Figura 3.8: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada - pára-raios de 420 kV.

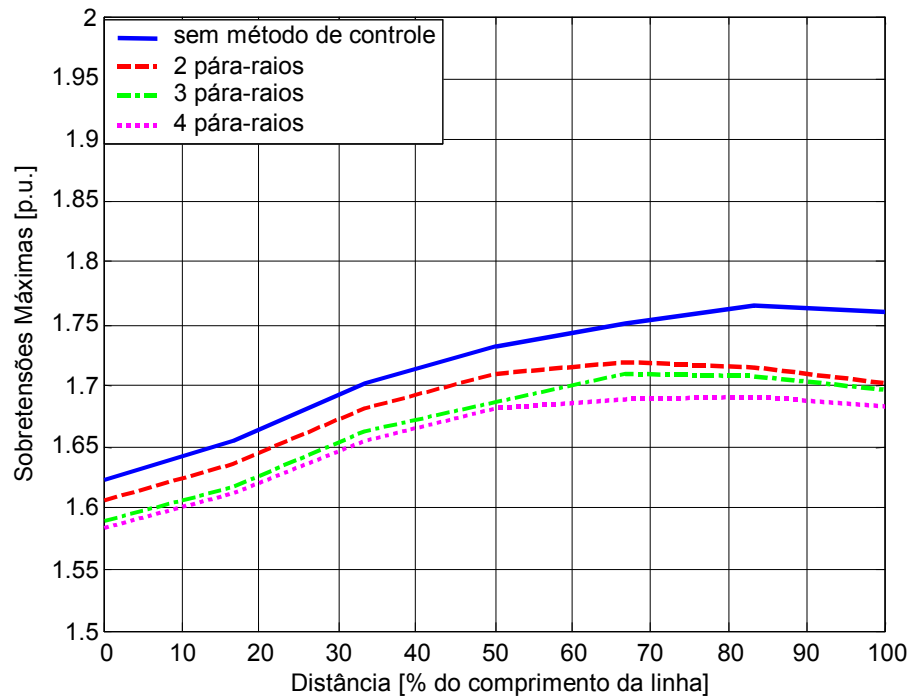


Figura 3.9: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada - pára-raios de 420 kV.

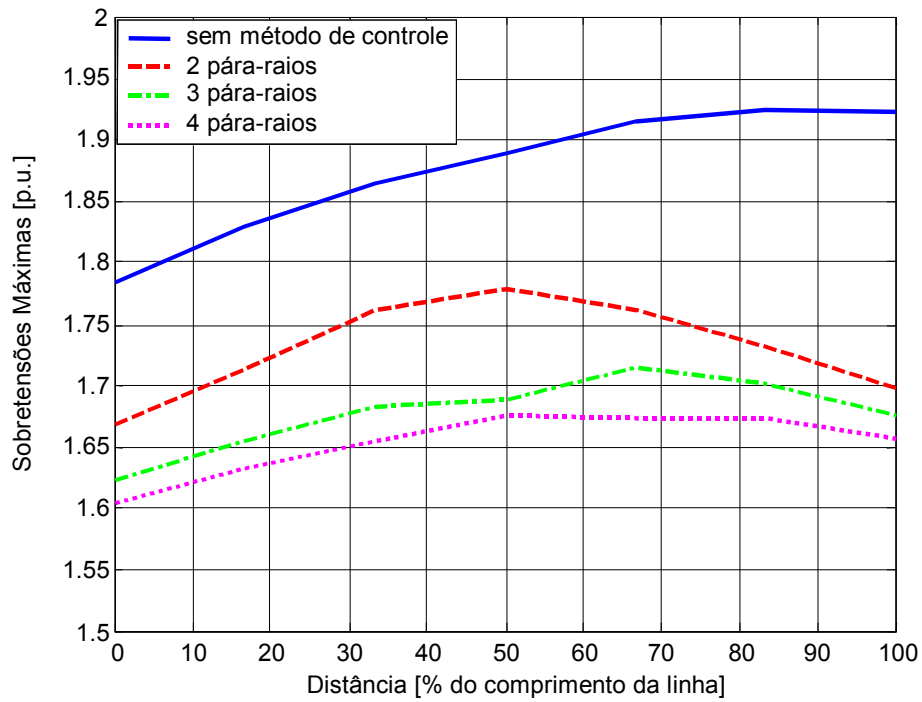


Figura 3.10: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada - pára-raios de 396 kV.

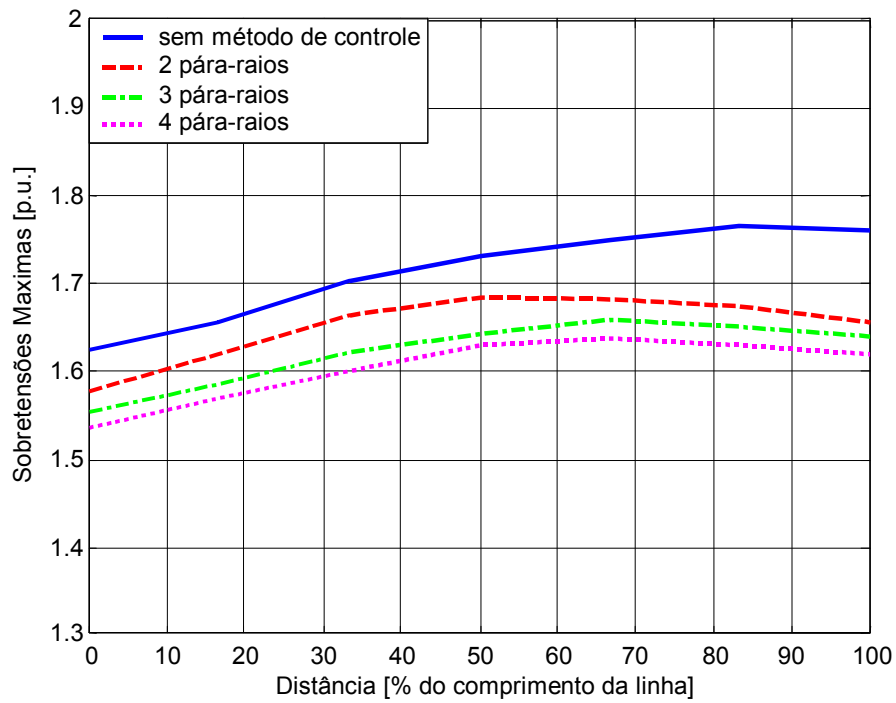


Figura 3.11: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada - pára-raios de 396 kV.

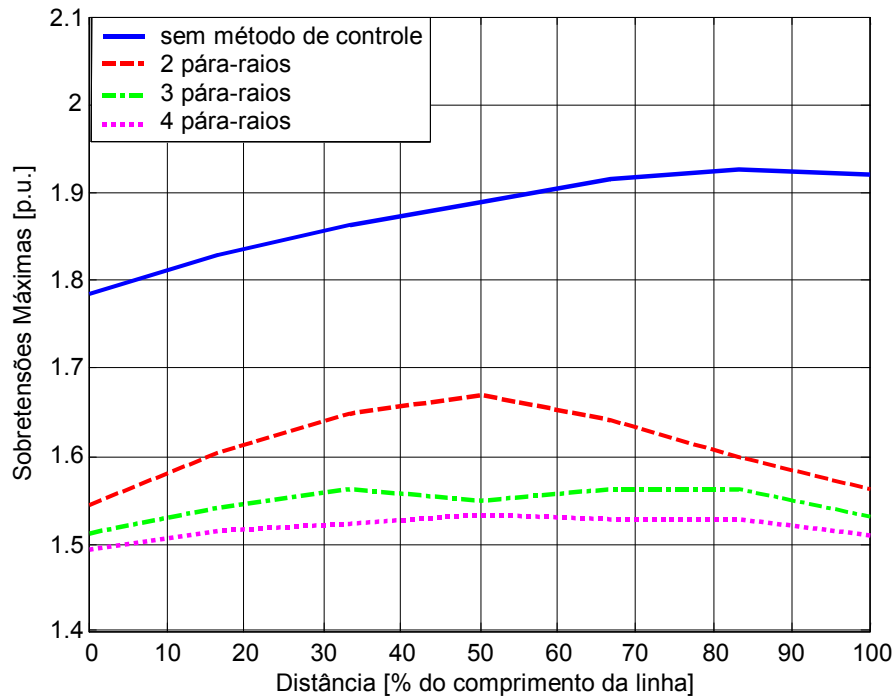


Figura 3.12: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada - pára-raios de 360 kV.

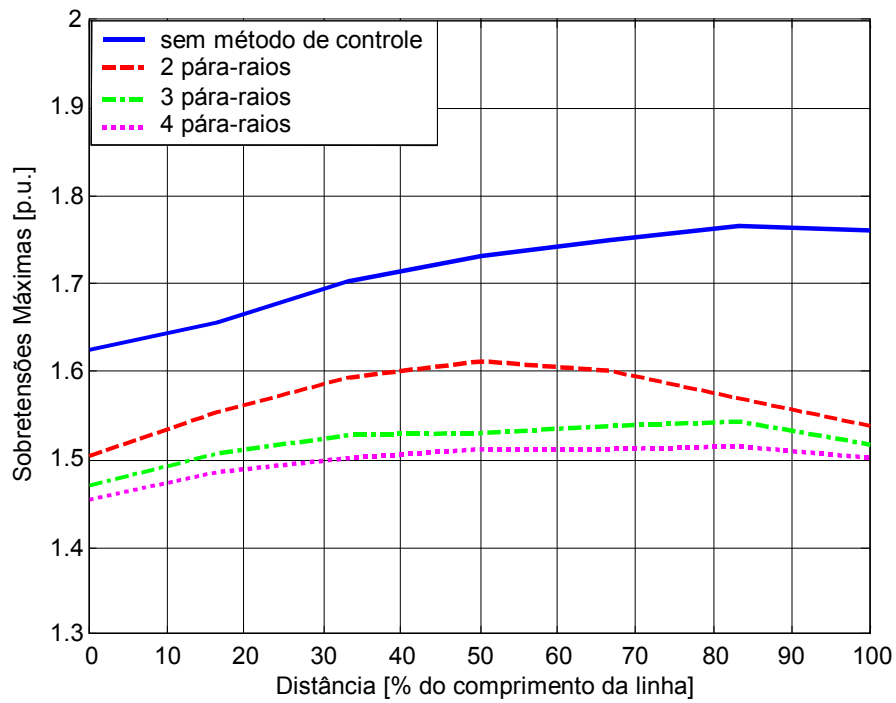


Figura 3.13: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada - pára-raios de 360 kV.

Utilizando pára-raios de 420 kV, as sobretensões transitórias máximas absolutas registradas no terminal receptor da linha tiveram uma redução de 9,55% e 4,34 % com relação às sobretensões registradas no mesmo ponto para a energização sem a utilização de métodos de redução, respectivamente para os casos de 70% e 95% de compensação.

Utilizando pára-raios de 396 kV, as sobretensões máximas no terminal receptor alcançaram uma redução de 13,76% e 8,00%, respectivamente para os casos de 70% e 95% de compensação. A utilização desses pára-raios apresenta uma maior redução de sobretensões, com relação à utilização de resistores de pré-inserção e pára-raios de 420 kV.

Finalmente utilizando pára-raios de 360 kV, as sobretensões máximas no terminal receptor tiveram reduções de 21,49% e 14,73%, respectivamente para os casos de 70 e 95% de compensação *shunt*.

Com os pára-raios de 360 kV foram obtidas as maiores reduções de sobretensões. Porém deve-se atentar ao fato de que, quanto menor a classe de tensão do pára-raio utilizado, mais ele estará sujeito às características operativas do sistema, tal como a tensão máxima de operação e as sobretensões temporárias, podendo ter sua vida útil reduzida.

Deve-se testar se a capacidade de absorção de energia dos pára-raios não é superada. Porém, esse cuidado não foi tomado nesse trabalho.

3.2.3 Energização da Linha com Fechamento Sincronizado dos pólos do Disjuntor

O terceiro método de energização de linhas a ser testado foi o fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor. Este método consiste em fechar os três pólos do disjuntor no instante em que a tensão fase-terra sobre um deles passa pelo zero. Existe também uma variante desse método, que consiste em fechar os pólos do disjuntor individualmente no instante em que a tensão sobre cada um deles é nula. Nesse trabalho testou-se apenas a variante. Porém as duas devem ser testadas e comparadas permitindo-se fazer uma escolha adequada dependendo do caso.

Para simulação desse método, foi desenvolvido um sistema de controle para o fechamento dos pólos do disjuntor no *PSCAD/EMTDC* utilizando blocos denominados *sequencers*, existentes no próprio programa. Esse sistema, que é apresentado na figura 3.14 detecta quando a tensão passa pelo zero em cada pólo, dando o comando de fechamento para o disjuntor.

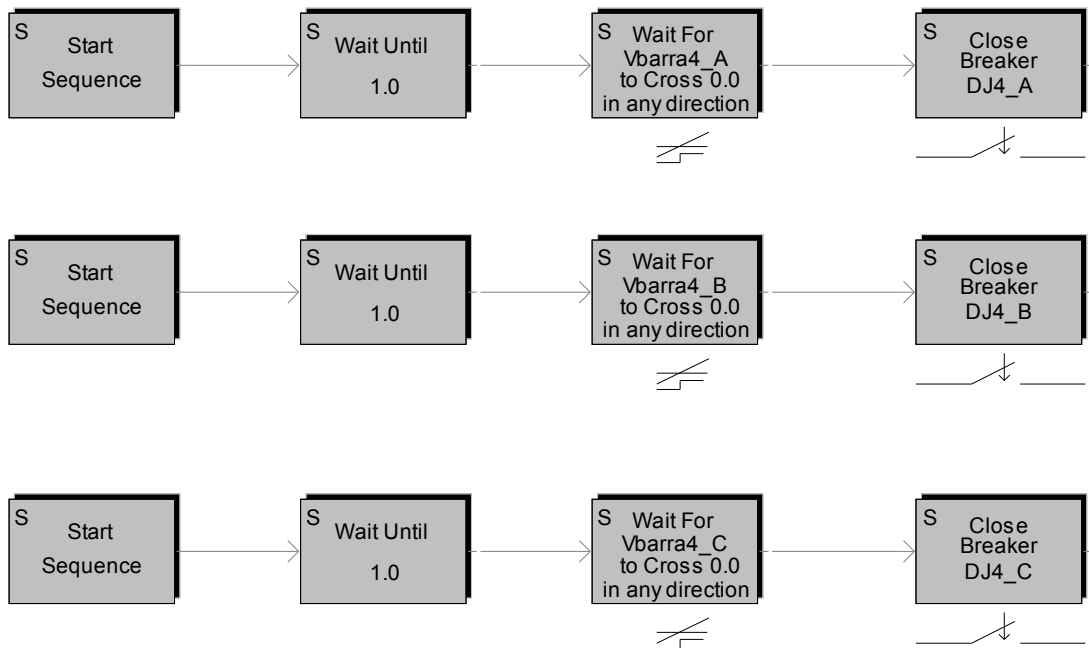


Figura 3.14: Sistema de fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor desenvolvido no *PSCAD*.

As figuras 3.15 e 3.16 apresentam os perfis das sobretensões máximas ao longo da linha para energização com o método em questão.

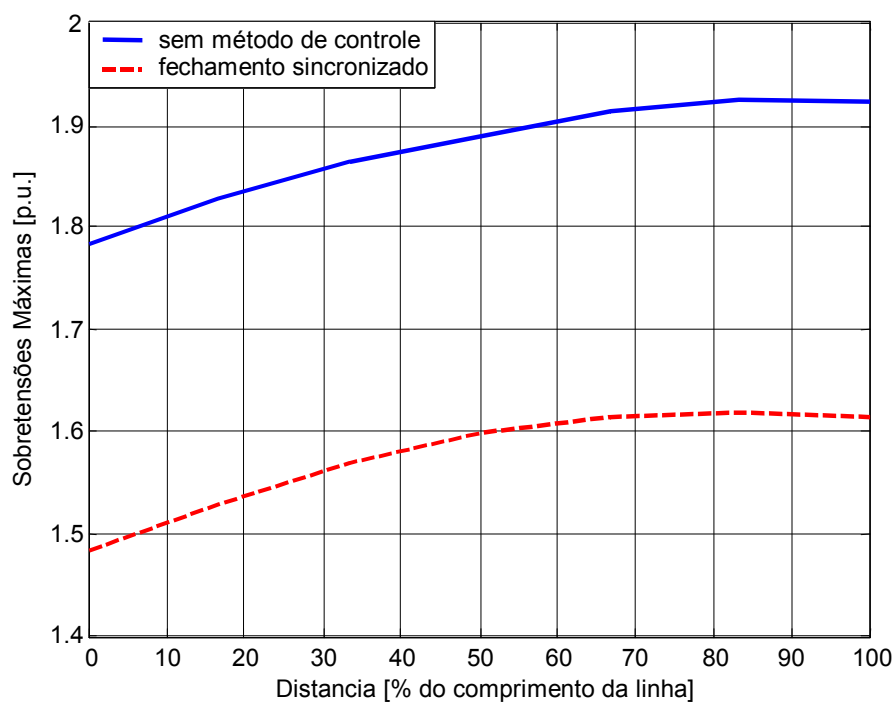


Figura 3.15: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada - fechamento sincronizado do disjuntor.

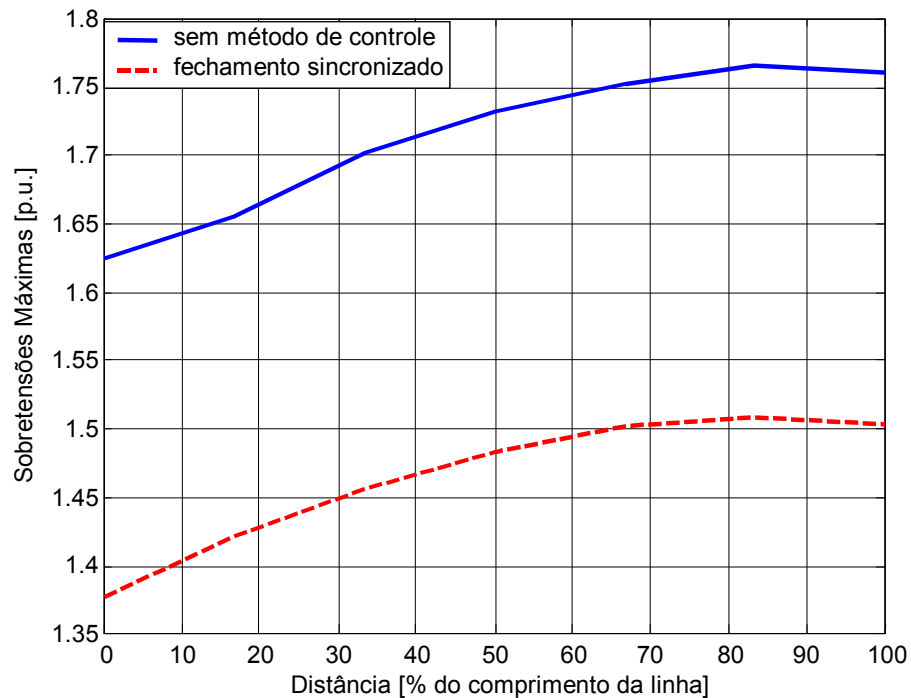


Figura 3.16: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada - fechamento sincronizado do disjuntor.

As reduções das sobretensões no terminal receptor da linha foram de 15,94 % e 14,60 % para compensações de 70% e 95% respectivamente. Isso prova que esse método se mostra bastante eficiente se comparado com os outros métodos, sendo superado apenas pela utilização de pára-raios de 360 kV no caso de linha com 70 % de compensação *shunt*.

3.2.4 Energização da Linha com a Utilização Combinada dos Métodos

Para a obtenção de níveis de sobretensões transitórias que sejam suportáveis pelos equipamentos, é usual a utilização dos métodos de controle de forma combinada. Em uma linha de transmissão são instalados pára-raios com o intuito de limitar sobretensões de manobras ou de

surtos atmosféricos. Portanto, é comum combinar a utilização desses pára-raios com o resistor de pré-inserção ou com o fechamento sincronizado do disjuntor. Além disso, quando o resistor de pré-inserção é empregado, o instante de fechamento do disjuntor também é controlado de forma a obter reduções máximas de sobretensão de energização.

A energização do último trecho da linha foi simulada para três diferentes combinações de métodos de controle de sobretensões: energização com resistor de pré-inserção e pára-raios; energização com fechamento sincronizado do disjuntor e pára-raios; energização com resistor de pré-inserção e fechamento sincronizado do disjuntor.

Para as simulações, os pára-raios utilizados foram de 396 kV devido às suas características efetivas tanto na redução de sobretensões, quanto na suportabilidade às variações de tensão, características da operação do sistema.

A energização com resistores de pré-inserção e pára-raios foi feita no instante de tensão máxima em cada pólo do disjuntor, para que fosse simulado o pior caso de sobretensões.

Os perfis das sobretensões máxima absolutas registradas no último trecho da linha, compreendido entre as barras B4 e B5 , obtidos para 70 e 95% de compensação, são apresentados nas figuras 3.17 e 3.18, respectivamente.

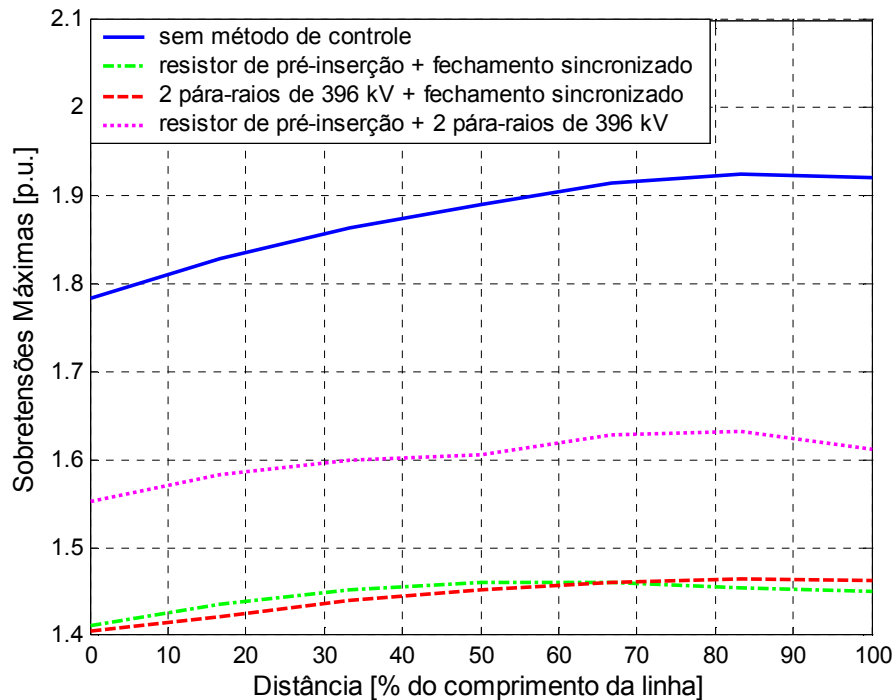


Figura 3.17: Sobretensões na última seção da linha 70% compensada para combinações dos métodos.

Para a linha com 70% de compensação *shunt*, a tensão transitória máxima no terminal receptor do teve redução de 24,56% com a utilização de resistor de pré-inserção e fechamento sincronizado. Com pára-raios e fechamento sincronizado, essa redução foi de 23,94% e, com resistor de pré-inserção e pára-raios, foi de 16,12%.

Podemos notar que, para esse grau de compensação, a combinação mais efetiva foi a utilização do resistor de pré-inserção com fechamento sincronizado do disjuntor. Porém, o emprego simultâneo dessas técnicas exige um estudo técnico-econômico de sua viabilidade, o que foge do escopo deste trabalho. Esse teste foi feito apenas para permitir a observação da utilização dos resistores de pré-inserção sob a condição de fechamento dos pólos do disjuntor em seus instantes ótimos.

Neste caso, a combinação mais apropriada seria a utilização do fechamento sincronizado com os pára-raios nas extremidades da linha. Esse arranjo permite a eliminação da necessidade da instalação de resistores de pré-inserção, que são caros e de difícil manutenção, além de aproveitar os pára-raios, reduzindo as sobretensões a valores inferiores a 1,5 p.u.

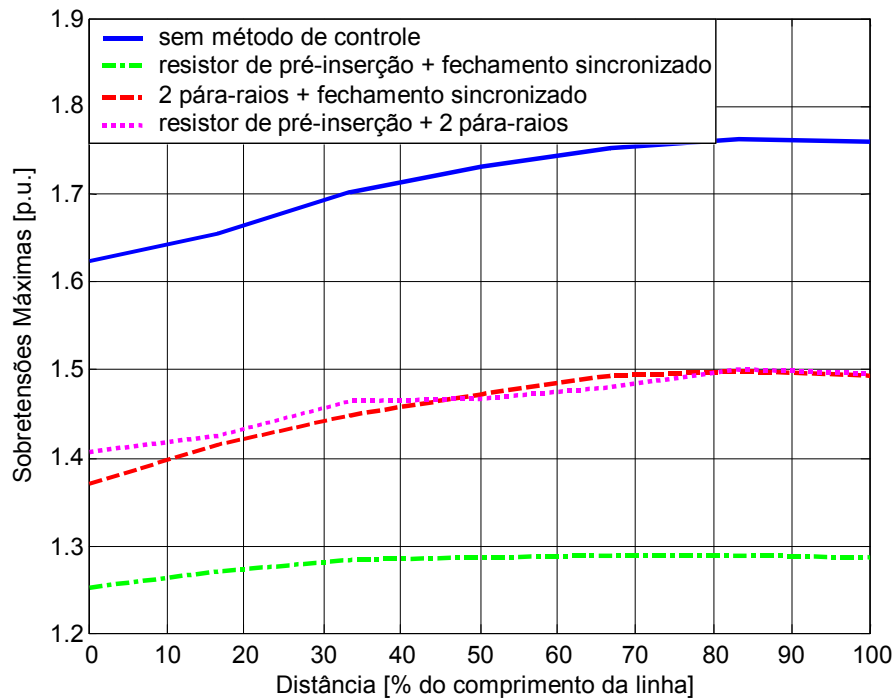


Figura 3.18: Sobretensões na última seção da linha 95% compensada para combinações dos métodos.

Para o caso de linha com 95% de compensação *shunt*, a redução foi de 27,04% com resistor de pré-inserção e fechamento sincronizado, 15,15% com fechamento sincronizado e pára-raios e 15,04% com resistor de pré-inserção e pára-raios. Os pára-raios e os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor foram os mesmo utilizados no caso de 70% de compensação.

Para este caso, a combinação resistor de pré-inserção e fechamento sincronizado se mostrou muito mais eficaz na redução de sobretensões do que as outras combinações.

É possível se observar que o fechamento sincronizado é fundamental para a limitação das sobretensões de energização da linha. Sua utilização combinada com outros métodos apresentou resultados bastante satisfatórios, permitindo reduções percentuais consideráveis.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalhos Futuros

A utilização de pára-raios de óxido metálico conectados à linha assim como o a utilização do fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor se mostraram métodos eficientes para a redução de sobretensões em manobras de energização de linhas de transmissão.

Foi possível observar que no caso da linha com 70 % de compensação *shunt* o tradicional resistor de pré-inserção poderia ser substituído pelo fechamento sincronizado do disjuntor, evitando assim os problemas associados ao primeiro e garantindo reduções ainda maiores das elevações de tensão.

O grau de compensação *shunt* da linha se mostrou um fator bastante influente nos níveis de sobretensão, comprovando a relação dos mesmos com a configuração do sistema.

É possível combinar a utilização dos métodos de controle de forma a reduzir as elevações de tensão a níveis compatíveis com a isolação dos equipamentos ligados ao sistema, porém os testes feitos nesse trabalho não são suficientes para se determinar a melhor combinação a ser utilizada. Uma avaliação técnico-econômica deve ser feita para se determinar a viabilidade da utilização combinada desses métodos.

Os trabalhos futuros são: determinar a resistência e o tempo de inserção ótimos do resistor de pré-inserção, testar a utilização de pára-raios com dados de fabricantes e observar se suas capacidades de absorção de energia não são superadas, testar os métodos apresentados em outros sistemas de forma a obter uma análise mais profunda da eficácia da utilização de cada um deles.

Referências Bibliográficas

[1] P. Mestas, M. C. Tavares, “Comparative Analysis of Control Switching Transient Techniques in Transmission Lines Energization Maneuver”, IPST 2007 Conference Papers, Session 16 - Switching Transients, Lines and Cables.

[2] Legate, A. C., Brunke, J. H., Ray J. J., Yasuda E. J. “Elimination of closing Resistors on EHV circuit breakers”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, N° 1, pp. 223-231-157, Janeiro 1988.

[3] Esmeraldo P. C. V., Amon Filho J., Carvalho F. M. S., Carvalho A. S. S., Morais A. S. “Circuit Breaker Requirements for Alternative Configurations of a 500 kV Transmission System”. IEEE Transactions on Power Delivery, v14, n° 1, Janeiro, 1999, pp 169-175.

[4] Zanetta Júnior, Luiz Cera. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência - 2003. Editora da Universidade de São Paulo.

[5] Carson, J. R. “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return”. Bell Systems Technical Journal, vol. 5, pp. 539-554, 1926.

[6] Fernandes, A. B., Neves, W. L. A., “Frequency-Dependent Transformation Matrices for Phase Domain Transmission Line Models”, IEEE Transactions on Power Delivery. Volume 19, Issue 2, April 2004, pp 708 – 714.

- [7] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, "A Universal Line Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, issue 3, pp 1032-1038, July 1999.
- [8] L. M. Wedepohl, H. V. Nguyen, G. D. Irwin, "Frequency-Dependent Transformation Matrices for Untransposed Transmission Lines using Newton-Raphson Method", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, n° 3, pp. 1032-1038, Aug 1996.
- [9] B. Gustavsen, G. Irwin, R. Mangelrod, D. Brandt, K. Kent, "Transmission Line Models for the Simulation of Interaction Phenomena Between Parallel AC and DC Overhead Lines", IPST '99 Proceedings, pp. 61-67, 1999.
- [10] B. Gustavsen, A. Semlyen, "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", IEEE Trans. PWRS, vol. 11, n° 3, pp. 1538-1546, July 1999.
- [11] PSCAD/EMTDC vs 4 User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre, April 2004.
- [12] M. C. Tavares, C. M. Portela, "Transmission System Parameters Optimization - Sensitivity Analysis of Secondary Arc Current and Recovery Voltage", Power Delivery, IEEE transactions on, vol.19, n.3, pp 1464-1471, July 2004.
- [13] Greenwood A., Electrical Transients in Power Systems, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991.