

AVALIAÇÃO DE RESSONÂNCIA EM CIRCUITOS COM ELEVADO NÍVEL DE COMPENSAÇÃO

Cesar Augusto Cedrola Junior

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. Antonio Carlos Siqueira de Lima
(Orientador)

Prof. Antonio Carlos Ferreira

Prof. Glauco Nery Taranto

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2010

Ao Professor Alessandro Manzoni, *in
memorian*, pelos ensinamentos
transmitidos. Sua responsabilidade,
incentivo, dedicação e companheirismo
foram pontos dignos de admiração.
Muito obrigado!

Agradecimentos

A Deus pela vida e força para seguir sempre em frente;

Aos meus pais que sempre apoiaram todas as minhas decisões me dando muito amor e incentivo nos momentos difíceis e por toda dedicação que têm por mim;

A minha avó pelo carinho e pela ajuda sempre dedicados a mim;

As minhas irmãs, Samanta e Sabrina, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando nessa jornada;

Ao Prof^o Antonio Carlos Siqueira de Lima que assumiu a orientação desse trabalho devido à prematura perda do professor Manzoni, meus sinceros agradecimentos pela inesgotável paciência e dedicação com que me auxiliou nesse projeto transmitindo seus conhecimentos;

Aos amigos feitos na faculdade, sem vocês ela não teria sido a mesma, tanto nos momentos de divertimento quanto no estresse do dia a dia. Obrigado pela amizade e companheirismo nesses 5 anos;

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ por todos os ensinamentos transmitidos durante a graduação;

A Iberdrola pela compreensão e apoio oferecidos durante a realização deste trabalho, especialmente a Laura, Liu e Ricardo pelo incentivo.

Índice

1 – Introdução.....	1
1.1 - Visão Geral do Texto.....	3
2 – Modelos de Linhas de Transmissão.....	4
2.1 - Modelo II.....	6
2.2 – Modelos com Parâmetros Distribuídos.....	8
2.3 – Modelo com parâmetros distribuídos e variantes na frequência.....	12
3 – Componentes de Sequência e Rede Elétrica.....	17
3.1 – Operadores.....	18
3.3 – Redes Elétricas.....	20
3.3.1 – Elementos série.....	22
3.3.2 – Elementos Derivativos.....	23
3.3.3 – Representação das Redes Elétricas.....	23
3.3.4 – Representação da Rede com 6 fases.....	23
4 - Simulações e Resultados.....	26
4.1 – Análise do trecho Imperatriz - Colinas.....	28
4.2 – Caso Norte-Sul: Comparação entre o modelo II e o J. Marti.....	30
4.3 – Caso Norte-Sul: Análise da ressonância do sistema.....	41
4.4 – Caso Norte-Sul: Comparação entre transposição ideal e por circuitos.....	47
5 – Conclusões.....	51
6 – Apêndice.....	52
A – Caso 1 – Comparação entre os modelos de linha J. Marti e II.....	52

A.1- ATP.....	52
A.2 - Matlab.....	54
B – Caso 2 – Análise da ressonância do sistema Norte-Sul.....	56
Referências Bibliográficas.....	63

Capítulo 1 – Introdução

O trabalho proposto consistia na análise de um sistema de potência considerando a ressonância sub-síncrona e a partir disso seriam feitos estudos de máquinas síncronas e da estabilidade do sistema. Contudo, com a perda do Professor e Orientador Alessandro Manzoni, o sistema proposto inicialmente foi mantido, porém o objetivo passou a ser considerar o comportamento do circuito, não considerando a variação dos parâmetros dos geradores.

Todo o trabalho foi desenvolvido considerando o trecho de transmissão do SIN, Sistema Interligado Nacional, conhecido como Norte-Sul, que liga as subestações de Imperatriz a Serra da Mesa, com tensão de 500 kV.

A primeira etapa consiste em analisar um trecho de circuito da Norte-Sul, ligando as subestações de Imperatriz e Colinas, com objetivo de comparar as matrizes de admitâncias de sequências, considerando o circuito idealmente transposto e transposto por circuitos, atribuindo para tal estudo, uma ampla faixa de frequência. Esta análise foi realizada no domínio da frequência utilizando uma estrutura computacional elaborado programa Mathematica, [1].

A análise seguinte consiste em analisar todo o sistema Norte-Sul através da comparação da matriz de admitância de sequência obtida através de dois modelos de linhas diferentes. Para tanto foi utilizado o programa ATP, [2], através da interface gráfica ATPDraw. É um programa baseado na resolução no domínio do tempo das equações diferenciais envolvendo os circuitos elétricos. Este tipo de programa é classificado como EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*).

Os programas do tipo EMTP possuem uma subrotina capaz de realizar a varredura na frequência da parte linear do circuito. Este procedimento é comumente conhecido como *Frequency Scan*. Nessas análises foram consideradas diferentes representações de linhas de transmissão, a saber: o modelo Π (com parâmetros concentrados e invariantes na frequência – similar ao adotado na análise de transitórios eletromecânicos e estudos de

fluxo de carga) e o modelo J. Marti, [3], onde se considera os parâmetros da linha de transmissão variantes na frequência e distribuídos.

Os programas do tipo EMTP determinam a resposta do sistema no tempo, podendo ser utilizados em transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Conforme mencionado acima, no projeto foram utilizados os programas *ATPDraw* para os estudos do sistema de potência pois este facilita as simulações, já que, o esforço computacional resume-se em ter que *desenhar* toda a configuração do sistema e atribuir os valores de cada parâmetro, sendo mais fácil fazer as simulações nele do que se fizer em programas, tais como Mathematica e Matlab, nos quais teria que se fazer os estudos através de associações em cascata de quadripólos, demandando mais tempo. No presente trabalho esses programas, Mathematica e o Matlab, foram utilizados mais como ferramentas matemáticas.

A terceira análise consiste na alimentação de cada uma das 6 fases, 3 fases da subestação Imperatriz, emissora, e 3 da subestação Serra da Mesa, receptora, com uma tensão do tipo degrau, isoladamente em cada fase, enquanto as demais ficam abertas. O objetivo dessa etapa é observar a ressonância do sistema Norte-Sul e determinar para qual frequência de ressonância ocorre o maior pico de tensão.

Determinada a frequência de máxima ressonância, aplica-se um degrau multiplicado por uma cossenóide nessa frequência de ressonância para observar o comportamento do Sistema de Potência. Com esse terceiro caso é possível observar o acoplamento existente entre componentes de sequência mútuas e concluir se o sistema é transposto e simétrico.

A última análise considera um trecho de circuito da Norte-Sul que conecta as subestações de Imperatriz a Colinas com o objetivo de comparar as matrizes de admitância de sequência resultantes de duas análises, considerando transposição ideal da linha de transmissão e a transposição através de circuitos, agora simuladas no programa *ATPDraw*.

Assim observa-se que o objetivo maior do trabalho é comparar diferentes formulações da representação dos circuitos de transmissão de forma a identificar o impacto dessas aproximações no comportamento do circuito propriamente dito.

1.1 - Visão Geral do Texto

O capítulo 2 apresenta os diferentes modelos de linha de transmissão: Π , parâmetros distribuídos e o modelo variante na frequência com parâmetros distribuídos.

No Capítulo 3 se tem uma breve explicação de componentes de sequência, apresentando a matriz de transformação de parâmetros de fase para de sequência, além de fazer uma revisão de matriz de quadripólos e de admitância e como ambas são úteis na representação de redes elétricas.

O capítulo 4 mostra as simulações e resultados obtidos nos três diferentes casos estudados nesse trabalho.

No capítulo 5, são feitas as últimas considerações e as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Modelos de Linhas de Transmissão

Consistem no meio utilizado para transmitir energia elétrica produzida nas centrais geradoras até seus consumidores, basicamente, residências e indústrias. No presente trabalho, a escolha do modelo de linha foi um parâmetro de análise, através dos resultados obtidos por dois modelos distintos.

Os sistemas de transmissão são projetados de modo a atender demandas atuais e futuras, de modo que a energia seja transmitida com alto grau de confiabilidade gerando os menores impactos ambientais e custos possíveis.

Para representar as perdas da linha utiliza-se o resistor no modelo de linha de transmissão. Para um condutor feito de material uniforme, (2.1) descreve como é feito o cálculo da resistência em corrente contínua. Esses geralmente são expressos por unidade de comprimento.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.1)$$

A interação do campo elétrico (E) e magnético (H) em um condutor de comprimento (l), que possui um fluxo eletromagnético (ϕ), faz com que seja necessário introduzir um elemento no modelo de linha que signifique essa interação, isso é feito com a introdução de indutâncias.

Dessa forma, através da Lei de Faraday, é possível calcular o valor da reatância por (2.2) mostrada abaixo:

$$x = \omega l = \frac{\omega \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{l}{d}\right) \quad (2.2)$$

Após o estudo dos parâmetros que compõem uma linha de transmissão, o próximo passo é considerá-la como um elemento do sistema de potência, já que um sistema elétrico pode ser equacionado considerando-se como parâmetros a matriz Y_{Barra} e os vetores corrente e tensão.

O objetivo deste capítulo é formular o cálculo da Y_{Barra} para diferentes modelos de linha de transmissão, uma vez que, dependendo do tamanho da linha, pode-se considerar os parâmetros concentrados resultando em boa precisão para linhas curtas (extensão de até 80 km). Nesses casos, a capacitância em derivação é tão pequena que pode ser considerada desprezível, sendo somente considerado o efeito da impedância série, composta pelo resistor R e a indutância L .

Para casos reais, nos quais se tem sistemas de grande porte, passa a ser necessário considerar o comportamento do sistema, principalmente frente a perturbações, onde se analisa a resposta do modelo e estuda se existe uma dinâmica significativa à análise requerida, ou se ela é rápida demais ao ponto de não ser representativa ao estudo que se quer fazer.

Os modelos indicados para estudos dependem, em geral, do tamanho da linha de transmissão. Uma linha média (extensão de 80 a 240 km) pode ser representada com precisão pelos elementos resistivos R e indutivos L , e com metade da capacitância ao neutro ligada a cada extremidade do circuito equivalente, são comumente denominadas modelo II.

Em linhas com comprimento superior a 240 km, linhas longas, os cálculos passam a ser realizados considerando-se os parâmetros distribuídos, para garantir a exatidão no estudo realizado. Nesses casos, utiliza-se a associação de modelos II ou pelo modelo a parâmetros distribuídos.

As linhas de transmissão são trifásicas, e apesar de não possuírem espaçamentos equidistantes e não serem idealmente transpostas, a assimetria resultante é pequeno e, dessa forma, podem ser consideradas equilibradas. Isso se torna importante para simplificar o estudo de transitórios eletromecânicos, já que, somente se torna necessário

considerar os parâmetros de sequência positiva. Os modelos que são apresentados a seguir consideram o cálculo apenas para uma sequência.

2.1 - Modelo II

É o modelo mais conhecido, e para esse caso, consideram-se a soma das admitâncias totais derivativas dividida em partes idênticas e inserida próxima a barra transmissora e a receptora da linha, esse circuito é mostrado na Figura 2.1.1.

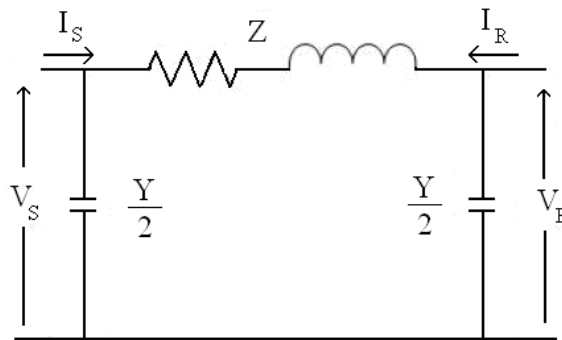


Figura 2.1.1: Circuito representativo do modelo II de uma linha de transmissão.

A primeira etapa da modelagem desse circuito é definir os parâmetros resistivos e indutivos que compõem a impedância longitudinal da linha (Z) e o capacitivo, a admitância transversal (Y), usualmente todos são expressos por unidade de comprimento.

$$Z = (r + j\omega l)d \quad (2.1.1)$$

$$Y = j\omega cd \quad (2.1.2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.1.3)$$

Onde:

- r - Resistência por unidade de comprimento [Ω/km];
- l - Indutância por unidade de comprimento [H/km];
- c - Capacitância por unidade de comprimento [F/km];
- d - Comprimento considerado [km];
- f - Frequência do sinal [Hz].

Utilizam-se as leis de circuito para deduzir as equações de injeções de corrente, em função das injeções de tensão e dos parâmetros da linha. Assim, pelo circuito mostrado na Figura 2.1.1 é possível obter, através da Lei de Ohm ($V = RI$), os valores das correntes nos ramos derivativos ($I_c = V_s Y/2$ e $I_c' = V_r Y/2$) próximos a barra transmissora e receptora, respectivamente.

Através da 1ª Lei de Kirchhoff (Lei das Correntes ou Lei dos Nós) e de posse dos valores das correntes nos ramos shunt, calcula-se a corrente longitudinal (I_l) que passa pela impedância como sendo:

$$I_l = \frac{V_r Y}{2} - I_r \quad (2.1.4)$$

E a corrente da barra transmissora (I_s) pode ser expressa por:

$$I_s = \frac{V_r Y}{2} - I_r + \frac{V_s Y}{2} \quad (2.1.5)$$

Para se obter (2.1.5) em função somente das injeções de tensão e dos componentes da linha de transmissão, utiliza-se a 2ª Lei de Kirchhoff (Lei das Tensões ou Lei das Malhas).

$$V_s - V_r = \left(V_r \frac{Y}{2} - I_r \right) Z \quad (2.1.6)$$

Após algumas manipulações algébricas de (2.1.6), tem-se que:

$$I_r = V_s \left(\frac{-1}{Z} \right) + V_r \left(\frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \right) \quad (2.1.7)$$

Substituindo-se (2.1.7) em (2.1.5):

$$I_s = V_s \left(\frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \right) + V_r \left(\frac{-1}{Z} \right) \quad (2.1.8)$$

Observa-se que (2.1.7) e (2.1.8), equações que descrevem as injeções de corrente nas duas barras, podem ser expressas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

Como o efeito dos comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo ocorre de forma distribuída ao longo da linha, e nesse modelo os parâmetros são considerados concentrados, acaba acrescentando um erro ao modelo, sendo essa a principal desvantagem do modelo Π e dessa forma, torna-se necessário obter outro modelo que considera o comportamento distribuído dos elementos ao longo da linha, ou então usar a combinação de modelos Π para representar de forma mais realista o circuito.

2.2 – Modelos com Parâmetros Distribuídos

Os parâmetros são considerados de forma distribuída ao longo da linha quando se necessita de uma solução mais exata e precisa, isso ocorre para comprimentos acima de 240 km. Essas linhas também são comumente chamadas de Linhas de Transmissão Longas [5].

Considerando um trecho pequeno da extensão da linha (Δx , onde x é o comprimento total da mesma) e aplicando-se a lei de Ohm para calcular a queda de tensão e a diferença de corrente entre as duas extremidades do segmento de linha. Dessa forma, $z \cdot \Delta x$ e $y \cdot \Delta x$ correspondem respectivamente à impedância série e a admitância derivativa do trecho

observado, o circuito simplificado ilustrando essas informações é mostrado na Figura 2.2.1.

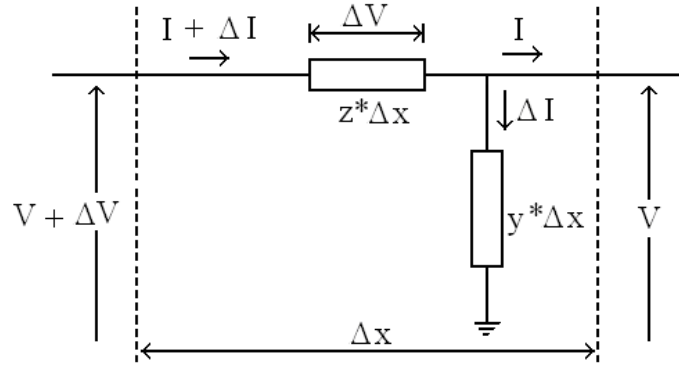


Figura 2.2.1: Circuito representativo de um trecho Δx do modelo a Parâmetros Distribuídos de uma linha de transmissão.

Onde, através da análise do circuito acima:

$$\Delta I = V(y\Delta x) \quad (2.2.1)$$

$$\Delta V = (z\Delta x)(I + \Delta I) \quad (2.2.2)$$

No limite em que Δx tende a zero, (2.2.1) e (2.2.2) assumem a seguinte forma:

$$\frac{dV}{dx} = -Iz \quad (2.2.3)$$

$$\frac{dI}{dx} = -Vy \quad (2.2.4)$$

Derivando (2.2.3) e (2.2.4), tem-se que:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad (2.2.5)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad (2.2.6)$$

Substituindo-se (2.2.3) e (2.2.4) nas equações (2.2.6) e (2.2.5), respectivamente:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = zVy \quad (2.2.7)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yIz \quad (2.2.8)$$

As equações resultantes são chamadas equações características que definem a propagação da corrente e da tensão ao longo da linha. Na solução de ambas, a primeira condição feita é que suas segundas derivadas em relação à x sejam iguais as funções originais multiplicadas pela constante yz, isso indica uma solução do tipo exponencial.

Supondo:

$$V = A_1 e^{x\sqrt{yz}} + A_2 e^{-x\sqrt{yz}} \quad (2.2.9)$$

Aplicando a segunda derivada em (2.2.9):

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yz(A_1 e^{x\sqrt{yz}} + A_2 e^{-x\sqrt{yz}}) \quad (2.2.10)$$

Observa-se que (2.2.10) é a própria solução admitida para V multiplicada pelo fator (yz). Dessa forma, (2.2.9) é a solução de (2.2.7). Substituindo (2.2.9) em (2.2.3):

$$I = \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_1 e^{x\sqrt{yz}} - \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_2 e^{-x\sqrt{yz}} \quad (2.2.11)$$

As constantes A_1 e A_2 podem ser calculadas a partir das condições de contorno na barra receptora da linha, ou seja, quando $x=0$ a tensão e a corrente na fonte são iguais aos seus valores de carga, logo, $V=V_r$ e $I=I_r$.

$$\begin{cases} V_r = A_1 + A_2 \\ I_r = \frac{1}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2) \end{cases} \quad (2.2.12)$$

Substituindo $Z_c = \sqrt{z/y}$ (chamada de impedância característica) e $\gamma = \sqrt{yz}$ (constante de propagação) obtêm valores para A_1 e A_2 :

$$A_1 = \frac{V_r + I_r Z_c}{2} \quad (2.2.13)$$

$$A_2 = \frac{V_r - I_r Z_c}{2} \quad (2.2.14)$$

Substituindo-se os valores obtidos para as constantes, mostrados acima:

$$V = \frac{V_r + I_r Z_c}{2} e^{x\gamma} + \frac{V_r - I_r Z_c}{2} e^{-x\gamma} \quad (2.2.15)$$

$$I = \frac{V_r/Z_c + I_r}{2} e^{x\gamma} + \frac{V_r/Z_c - I_r}{2} e^{-x\gamma} \quad (2.2.16)$$

As equações acima resultam os valores eficazes de V e I e seus respectivos ângulos de fase, para qualquer ponto da linha de transmissão em função da distância entre barras receptora e o ponto onde se quer calcular, desde que sejam conhecidos os parâmetros da linha e a tensão V_r e a corrente I_r .

As equações (2.2.15) e (2.2.16) podem ser simplificadas através do uso de funções hiperbólicas, sabendo-se que:

$$\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2} \quad (2.2.17)$$

$$\cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2} \quad (2.2.18)$$

Assim, tanto (2.2.15) quanto (2.2.16) podem ser reescritas na forma:

$$V_s = V_r \cosh \gamma x + I_r Z_c \sinh \gamma x \quad (2.2.19)$$

$$I_s = I_r \cosh \gamma x + \frac{V_r}{Z_c} \sinh \gamma x \quad (2.2.20)$$

Reescrevendo as duas equações acima na forma matricial $[I]=[Y_{\text{BARRA}}]*[V]$:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_c}{\tanh(\gamma d)} & \frac{-Y_c}{\sinh(\gamma d)} \\ \frac{-Y_c}{\sinh(\gamma d)} & \frac{Y_c}{\tanh(\gamma d)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.2.21)$$

O modelo com Parâmetros Distribuídos representa a linha adequadamente para qualquer comprimento, porém, considerando a resposta dinâmica que pode entrar na faixa de tempo das respostas dos controles dos geradores, é interessante discutir um modelo no qual se possa estudar a resposta das linhas de transmissão nessa faixa de tempo.

2.3 – Modelo com parâmetros distribuídos e variantes na frequência

Na simulação de um dado sistema de potência, a resposta a excitação e às condições iniciais é chamada de resposta completa, e, portanto, está implícito tanto o comportamento em regime permanente quanto em regime transitório. O modelo matemático que descreve esse comportamento dinâmico do sistema de potência é fundamentado por equações diferenciais.

Este tópico apresenta um método rápido e robusto para a montagem racional de respostas no domínio da frequência, para os vetores da função de transferência. A aplicação do método resulta em aumento da eficiência computacional para os modelos de linha de transmissão utilizando decomposição modal com matrizes de transformação dependentes da frequência. Isto é devido ao fato de que o método permite a montagem dos elementos de cada autovetor para compartilhar o mesmo conjunto de pólos, e que a montagem precisa da matriz representativa da linha pode ser conseguida com um número relativamente baixo de pólos [6].

O cálculo exato de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência requer que seja levado em consideração o efeito da dependência da frequência das linhas de transmissão. Modelos de linha dependente da frequência podem, em princípio, ser

facilmente formulados no domínio do tempo através de convolução numérica, mas o modelo resultante é computacionalmente ineficiente.

A eficiência melhora consideravelmente se as respostas de impulso para a linha são montadas com funções racionais no domínio da frequência ou aproximada no domínio do tempo. No caso de sistemas a cabo, várias linhas aéreas do circuito e sobrecarga de linhas assimétricas, a matriz de transformação pode ser dependente da frequência. Isso aumenta o número de convoluções para $4n^2 + 4n$, onde n é o número de condutores, fazendo a abordagem de domínio modal um pouco mais demorada do que a abordagem de domínio de fase.

A função de propagação H pode em alguns casos de sistemas de cabos conterem atrasos de tempo muito diferentes para os modos individuais, sendo necessário um ajuste com funções racionais de ordens muito altas, no domínio de fase. No entanto, este problema é facilmente superado com modelos de domínio modal, porque existe apenas um atraso associado a cada modo de propagação. Dessa forma, os componentes modais de H podem ser eliminados, produzindo funções que podem ser montadas com polinômios racionais de ordem baixa.

A seguir é apresentada uma técnica utilizada na modelagem de linhas de transmissão que permite ajustar a matriz de transformação de coluna por coluna, resultando em economias substanciais no tempo computacional para o passo de tempo utilizado, em relação ao modo tradicional no qual a montagem é feita elemento por elemento. O método também é utilizado para ajustar as respostas de propagação modal e admitância característica modal. Ao contrário do tradicional Marti, a aproximação resultante das funções racionais não se restringe aos pólos reais e zeros, o que se mostra vantajosa quando se monta a matriz de transformação e admitância característica modal.

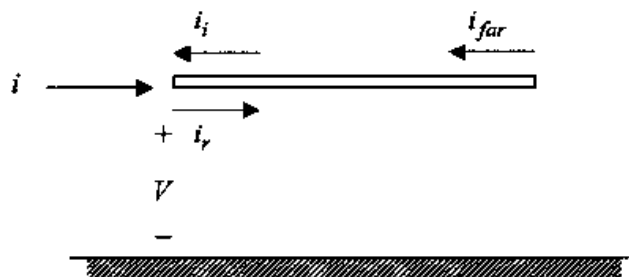


Figura 2.3.1: Representação das ondas na extremidade da linha de transmissão

A solução no domínio da frequência da equação de onda em cada extremidade de uma linha de transmissão pode ser expressa pelo vetor mostrado abaixo:

$$Y_c v - i = 2i_i = 2H i_{far} \quad (2.3.1)$$

Onde a função de propagação H e a admitância característica Y_c são dados por:

$$H = e^{-\sqrt{YZ}l} \quad (2.3.2)$$

$$Y_c = Z^{-1} \sqrt{ZY} \quad (2.3.3)$$

Onde

Z – impedância serie por unidade de comprimento da linha de transmissão;

Y – admitância *shunt* por unidade de comprimento da linha de transmissão.

(2.3.1) representa n equações escalares acopladas, mas pode ser substituído por n equações desacoplada através da introdução de quantidades modais

$$i = T_I i^m \quad (2.3.4)$$

$$v = T_V v^m \quad (2.3.5)$$

Aqui, T_I e T_V são as matrizes de auto vetores de ZY e YZ , respectivamente. Sobrescrito m denota quantidades modais. Substituindo (2.3.4) e (2.3.5) em (2.3.1) resulta:

$$Y_c^m v^m - i^m = 2H^m i_{far}^m \quad (2.3.6)$$

As matrizes diagonais H_m e Y_c^m estão relacionados com suas respectivas matrizes no domínio fase por:

$$H = T_I H^m T_I^{-1} \quad (2.3.7)$$

$$Y_c = T_I Y_c^m T_I^T \quad (2.3.8)$$

Onde:

$$T_V = T_I^{-T} \quad (2.3.9)$$

Em cálculos práticos, o domínio modal do modelo de linha de transmissão está relacionado com o domínio de fase pelas relações

$$v^m = T_V^{-1} v = T_I^T v \quad (2.3.10)$$

$$i = T_I i^m \quad (2.3.11)$$

Assim, os cálculos modais foram manipulados para envolver somente as matrizes T_I , T_I^T , Y_C^m e H^m .

O modelo de linha conforme definido pela equação de onda (2.3.1) e (2.3.6) é transformado no domínio da frequência para o domínio do tempo pela aplicação do teorema da convolução. Uma convolução entre uma matriz arbitrária G e u um vetor de entrada pode ser expressa:

$$y = G * u = G_0 u + h \quad (2.3.12)$$

Onde $*$ denota o operador de convolução. $G_0 u$ é um termo instantâneo e h resíduo. Considerando-se um terminal da linha, equação de onda (2.3.6) no domínio modal torna-se no domínio do tempo.

$$Y_c^m * v^m - i^m = 2H^m * i_{far}^m \quad (2.3.13)$$

Aplicando (2.3.12) em (2.3.13)

$$(Y_{c0}^m v^m + h_1) - i^m = 2h_2 \quad (2.3.14)$$

H_0^m é igual a 0, devido ao intervalo de tempo entre os terminais da linha. As correntes e voltagens no domínio modal (2.3.14) são transformados no domínio de fase utilizando (2.3.10), (2.3.11) e (2.3.12)

$$v^m = T_{I0}^T v + h_3, \quad i = T_{I0} i^m + h_4 \quad (2.3.15)$$

Substituindo (2.3.15) em (2.3.14) e multiplicando por T_{I0} resulta em:

$$(T_{I0} Y_{c0}^m T_{I0}^T) v - i = T_{I0} [2h_2 - h_1 - Y_{c0}^m h_3] - h_4 \quad (2.3.16)$$

Que é convenientemente representado pelo equivalente de Norton.

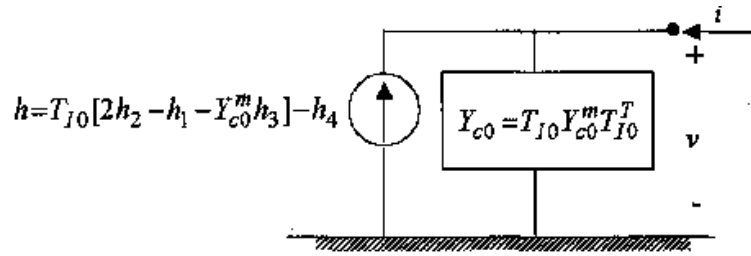


Figura 2.3.2: Representação das extremidades da linha

Os resíduos h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e os termos instantâneos Y_{c0}^m , T_{I0} e T_{I0}^T são calculados a partir das respectivas equações de estado assumindo integração trapezoidal.

Esse método permite montar vetores e escalares com funções racionais com pólos e zeros complexos, além de reais. O processo de montagem é muito robusto e não há nenhum problema em especificar uma ordem muito elevada para a instalação, caso seja necessário. Sendo aplicado com sucesso para sistemas de cabos utilizando decomposição modal e matrizes de transformação dependentes da frequência. Neste modelo, é preciso ajustar a matriz de transformação e as matrizes diagonais para propagação e admitância característica. O modelo do cabo resultante é computacionalmente eficiente pelas seguintes razões:

- Montagem rigorosa pode ser conseguida com um número relativamente baixo de pólos. Uma ordem de 50-10 é geralmente suficiente
- O método de Marti de ajuste permite que cada vetor da matriz de transformação é montado com o mesmo conjunto de pólos. Isso dá aproximadamente um aumento de 3 vezes na eficiência computacional no tempo de simulação para todos as convoluções envolvendo a matriz de transformação.

No caso das linhas aéreas nem sempre é possível obter um ajuste preciso com pólos estáveis quando depender de decomposição modal com uma matriz de transformação dependente da frequência.

Capítulo 3 – Componentes de Sequência e Rede Elétrica

O método de componentes simétricos foi desenvolvido para análises de circuitos polifásicos desequilibrado, facilitando estudos e cálculos de faltas assimétricas em Sistemas de Potência, curto-circuito, impedância entre linhas, impedância entre linha e a terra.

Desenvolvido em 1918 por C. O. Fortescue, o método por componentes simétricos estabelece que um sistema desequilibrado com n fasores dependentes entre si, pode ser dividido em n sistemas de fasores equilibrados. O teorema proposto por Fortescue determina que três fasores desequilibrados de um dado sistema trifásico podem ser divididos em três sistemas equilibrados de fasores. Esses conjuntos de fasores equilibrados são denominados [5]:

Componente de sequência positiva – Definido por três fasores que possuem módulos iguais e defasados entre si por 120° , possuindo a mesma sequência de fase dos fasores iniciais.

Componente de Sequência Negativa - Definido por três fasores que possuem módulos iguais e defasados entre si por 120° , possuindo sequência de fase oposta à dos fasores iniciais.

Componentes de Sequência Zero - Definido por três fasores que possuem módulos iguais e sem defasagens entre si.

Assim, quando se estabelece que a componente de fase de tensões e correntes de um sistema elétrico é abc, as componentes de sequência positiva também serão abc, e os componentes de sequência negativa possuem fase inversa, ou seja, acb. Os índices em componentes de fase são abc, e os índices dos parâmetros de sequência são 012, onde 0 é aplicado para parâmetros de sequência zero, 1, sequência positiva e 2 para parâmetros de sequência negativa.

Dessa forma, três fasores de fase, V_a , V_b e V_c , por exemplo, em componentes de sequência seria escrito por:

$$\begin{cases} V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{cases} \quad (3.1)$$

A análise de um distúrbio em um sistema simétrico é feita determinando as componentes simétricas das correntes desequilibradas circulantes. As correntes de sequência somente causam queda de tensão de mesma sequência, sendo independentes de outras sequências.

Os circuitos equivalentes monofásicos compostos pelas impedâncias de sequência são denominados redes de sequência. As redes de sequência são interligadas de forma a representar os diversos tipos de faltas que podem ocorrer no sistema.

3.1 – Operadores

Fortescue observou que um sistema de três fasores desequilibrados pode ser dividido em dois conjuntos de fasores equilibrados, mais um conjunto adicional de fasores monofásica. Se a tensão e as correntes do problema são representadas desta forma, uma representação por fase é adequada para cada componente e com a simplificação pretendida foi alcançada. Dessa forma, utiliza-se o operador “a” que determina a defasagem entre as fases em sistemas equilibrados, simplificando assim a equação (3.1).

$$\begin{cases} a = 1 \angle 120^\circ \\ a^2 = 1 \angle -120^\circ \\ a^3 = 1 \angle 0^\circ \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Conhecendo os operadores se torna mais simples a transformação de parâmetros de fase para parâmetros de sequência. Isso é feito, reescrevendo as equações de V_b e V_c , mostradas em (3.1) pelo produto da componente V_a por um operador “a” correspondente, resultando em:

$$\begin{cases} V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{cases} \quad (3.1.2)$$

Reescrevendo a equação acima na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

Para simplificar a visualização, atribui-se a matriz A como sendo a matriz de transformação, onde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.1.4)$$

Assim, para fazer o caminho oposto, ou seja, obter o vetor de componentes de fase a partir do vetor de componente de sequência, basta multiplicar o lado direito e o esquerdo de (3.1.3) pelo inverso da matriz de transformação, mostrada em (3.1.5), resultando em (3.1.6):

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.1.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

Pela primeira linha da matriz, mostrada em (3.1.6), observa-se a não existência da componente de sequência zero se a soma dos fasores desequilibrados for nula. Para tensões de linha a soma dos fasores de fase é sempre nula, e dessa forma, não existe

componente de sequência zero. Já para tensões fase terra a soma dos fasores de fase não é necessariamente nula, logo para esses casos pode haver componentes de sequência zero.

Se o parâmetro considerado fosse corrente ao invés da tensão, a soma das correntes de linha é a corrente que passa pelo retorno ao neutro, denominada I_n . Dessa forma:

$$\begin{cases} I_n = I_a + I_b + I_c \\ I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \end{cases} \rightarrow I_n = 3I_{a0} \quad (3.1.7)$$

No caso de não haver retorno ao neutro (carga conectada em triângulo, por exemplo) as correntes de linha não possuiriam componentes de sequência zero.

Para o caso de uma matriz de admitância, a transformação também seria da mesma forma, resultando em:

$$\begin{bmatrix} Y_0 & Y_{01} & Y_{02} \\ Y_{01} & Y_1 & Y_{12} \\ Y_{02} & Y_{12} & Y_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ca} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.1.8)$$

Onde os elementos da diagonal principal da matriz Y_{012} são respectivamente as admitâncias de sequência zero, elemento 1,1, sequência positiva, elemento 2,2 e de sequência negativa, o elemento 3,3. Os demais elementos são admitâncias mútuas entre as seqüências.

3.3 – Redes Elétricas

As redes elétricas podem ser representadas por equações na forma matricial que relacionam as correntes de injeção, entrada e saída, com as respectivas tensões de entrada e saída. Uma dessas representações é pela matriz de quadripólos [P] e outra, através da matriz admitância $[Y_{\text{barra}}]$.

Para efeito de simplificar o entendimento da matriz de admitância $[Y_{\text{barra}}]$ tem-se que:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = [Y_{\text{barra}}] \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

No caso de quadripólos, a representação simplificada em geral é feita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

A principal característica da associação em quadripólos é que todo elemento do sistema, tais como impedâncias série, admitâncias em paralelo e linhas de transmissão, podem ser associadas em cascata, ou seja, basta multiplicar a matriz quadripólo representativa de cada elemento de acordo com a ordem em que elas aparecem no sistema, essa informação é ilustrada na Figura 3.3.1, mostrada abaixo.

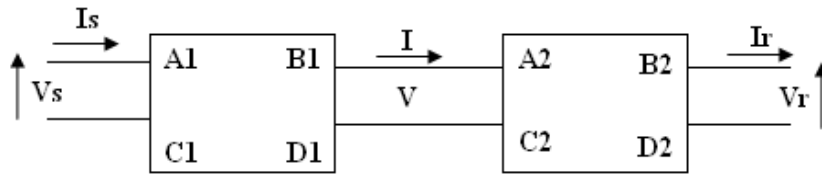


Figura 3.3.1: Associação em cascata de quadripólos.

Representando de forma matricial o sistema mostrado na Figura 3.3.1 tem-se como resultado o seguinte quadripólo.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.3.3)$$

Caso os elementos estivessem em paralelo, a associação correspondente dos quadripólos é mostrada na Figura 3.3.2.

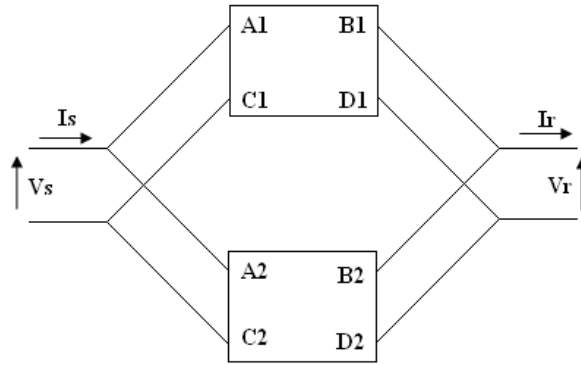


Figura 3.3.2: Associação de quadripólos em paralelo.

Para essa associação, a operação envolve muitas operações matriciais, sendo nesse caso mais fácil transformar a representação de quadripólo para a forma de matriz de admitância, já que, para esse segundo caso, a associação em paralelo corresponderia à soma das duas matrizes de admitância de cada elemento do sistema. Essa conversão é mostrada nas duas equações abaixo, onde pode ser visto a transformada de $[P]$ para $[Y_{barra}]$ e vice-versa em termos dos elementos das matrizes mostradas em (3.3.1) e (3.3.2).

$$[Y_{barra}] = \begin{bmatrix} \frac{D}{B} & C - \frac{DA}{B} \\ -\frac{1}{B} & \frac{A}{B} \end{bmatrix} \quad (3.3.4)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} \frac{-Y_4}{Y_3} & \frac{-1}{Y_3} \\ Y_2 - \frac{Y_1 Y_4}{Y_3} & \frac{-Y_1}{Y_3} \end{bmatrix} \quad (3.3.5)$$

3.3.1 – Elementos série

Em sistemas elétricos é comum encontrar reatores série, limitadores de curto-circuitos para redes de média tensão, ou bancos de capacitores série.

O modelo de quadripólo é o mesmo do utilizado para linha curta e resulta em:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.3.1.1)$$

3.3.2 – Elementos Derivativos

Esses elementos podem ser representativos de cargas, capacitores ou reatores de compensação da potência reativa da linha. O quadripólo representativo para um elemento derivativo (shunt) é definido pela seguinte equação [7]:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.3.2.1)$$

3.3.3 – Representação das Redes Elétricas

Dessa forma, um dado sistema elétrico de potência com n geradores e m barras de carga, considerando as cargas como impedâncias conectadas as barras do sistema tal como representado na Figura 3.3.3 pode ser representado através da aplicação da teoria de quadripólo apresentada.

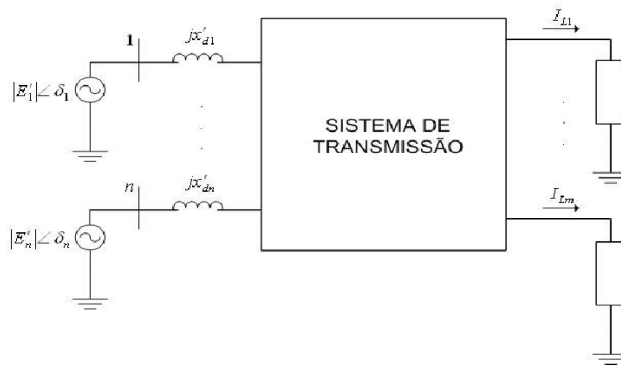


Figura 3.3.3: Representação de um sistema com n geradores e n barramentos.

Considerando ainda um grupo de máquinas síncronas, compondo parte de um sistema elétrico, que estejam sob as mesmas condições operativas e fortemente acopladas eletricamente, é possível representar todo esse sistema por um equivalente a partir da redução das máquinas síncronas a um modelo de somente uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito.

3.4 – Representação da Rede com 6 fases:

Para um caso com 6 fases, a Y_{nodal} tem dimensão de 6 linhas e 6 colunas e é da forma:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} \quad (3.4.1)$$

Para obter a representação da Y_{nodal} em termos de componente de sequência faz-se uso da matriz de transformação mostrada em (3.4.2):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I'_0 \\ I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

Dessa forma, a forma da matriz Y_{nodal} resultante é mostrada em (3.4.3)

$$\begin{bmatrix} I_{012} \\ I'_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{012} & Y_{012/012'} \\ Y_{012'/012} & Y'_{012} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{012} \\ V'_{012} \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

Onde:

I_{012} – Representa o vetor corrente, 3x1, de sequência para as fases “a” “b” e “c”.

I'_{012} – Representa o vetor corrente, 3x1, de sequência para as fases “d” “e” e “f”.

V_{012} – Representa o vetor tensão, 3x1, de sequência para as fases “a” “b” e “c”.

V'_{012} – Representa o vetor tensão, 3x1, de sequência para as fases “d” “e” e “f”.

Y_{012} e $Y_{012'}$ – São matrizes 3x3 e representam componentes de admitância de sequência obtidas das fases abc e def.

$Y_{012/012'}$ e $Y_{012'/012}$ – São matrizes 3×3 e representam componentes de admitância de sequência das mútuas entre as fases abc e def, e vice-versa.

Assim, observa-se que o elemento 2,2 da matriz de admitância de sequência, que é uma matriz 6×6 , corresponde ao valor de sequência positiva da parte emissora, fases “a”, “b” e “c”, enquanto que o elemento 5,5 corresponde ao parâmetro de sequência positiva da parte receptora, fases “d”, “e” e “f”. E dessa forma, o elemento 2,5, corresponde a admitância mútua entre as seqüências positivas da parte emissora e receptora.

Capítulo 4 - Simulações e Resultados

Os programas computacionais tipo EMTP (Eletromagnetic Transients Program) são mais indicados para simulações de sistemas de potência envolvendo a rede em abc, pois permitem soluções diretas no domínio do tempo, permitindo que o usuário considere mudanças súbitas na configuração do sistema, tais como abertura de chaves, faltas, e a não linearidade de elementos [8].

De acordo com a faixa de frequência atribuída em um estudo, o sistema pode ser representado por um circuito a parâmetros concentrados (resistores, capacitores e indutores) ou por um modelo matemático mais complexo. As linhas de transmissão são modeladas de acordo com a precisão necessária em cada análise. Devido à natureza distribuída de seus parâmetros, elas podem ser representadas considerando ou não esta característica. De mesma forma, o modelo de linha pode vir a considerar ou não o efeito pelicular na impedância série.

As linhas de transmissão devido a característica de possuir seus parâmetros distribuídos ao longo de seu comprimento e pela sua dependência da frequência, possibilitam análises com modelos que consideram os parâmetros constantes na frequência e outros estudos que consideram a dependência dos parâmetros com a frequência.

O sistema estudado foi a o trecho de Linha de Transmissão do SIN (Sistema Interligado Nacional) que liga as subestações Imperatriz a Serra da Mesa, conhecido como Norte – Sul.

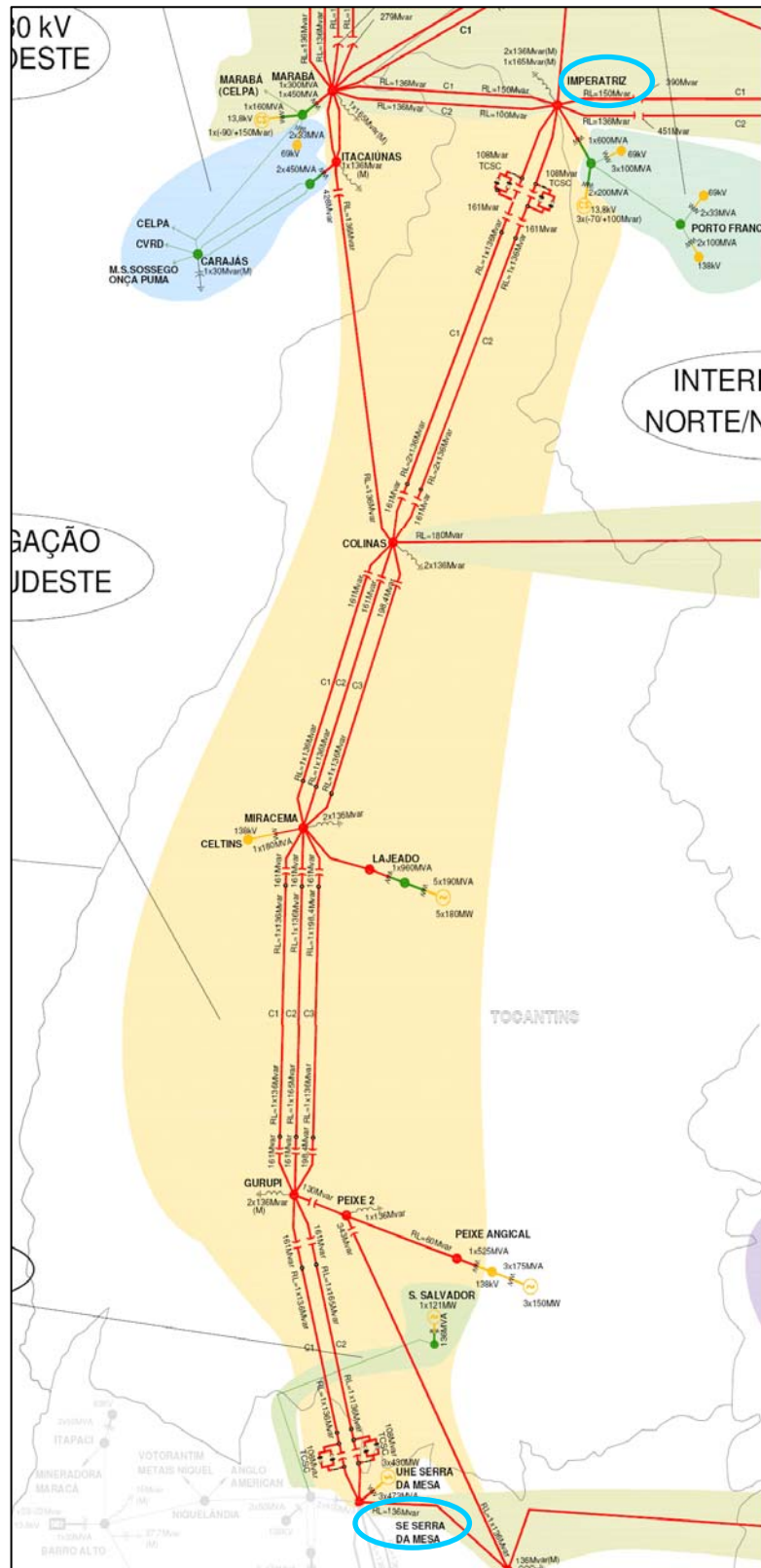


Figura 4.1: Circuito representativo do trecho Imperatriz-Serra da Mesa – Fonte: site do ONS.

4.1 – Análise do Trecho Imperatriz – Colinas

O primeiro caso consistiu na análise do trecho do sistema Norte – Sul que liga as subestações de Imperatriz e Colinas, analisando as admitâncias de sequência obtidas considerando a transposição ideal e por circuitos.

Para a execução dessa simulação foi considerado o programa computacional Mathematica, representando cada elemento que compõe as 2 linhas de transmissão que ligam Imperatriz a Colinas por quadripólos, e após isso foi feita a associação entre os elementos de forma a obter um quadripólo representativo de todo o trecho. Resultando nos gráficos mostrados nas Figuras 4.1.1 e 4.1.2, no domínio da frequência.

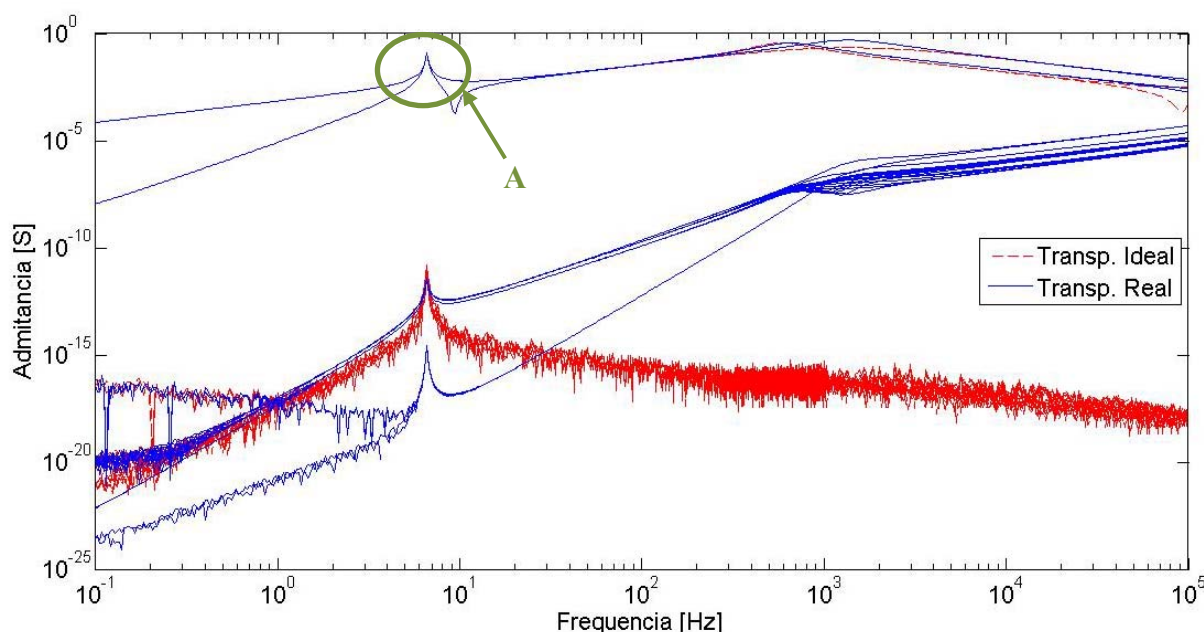


Figura 4.1.1: Admitâncias de sequência obtidas para o primeiro caso - logaritmo.

É possível concluir com o gráfico acima que até a frequência de 100 Hz, os circuitos resultam no mesmo valor de admitância independente da hipótese acerca da transposição adotada, ideal ou por circuitos, no qual se considera a transposição em intervalos de $L/3$, $L/6$, $L/6$ e $L/3$, sucessivamente.

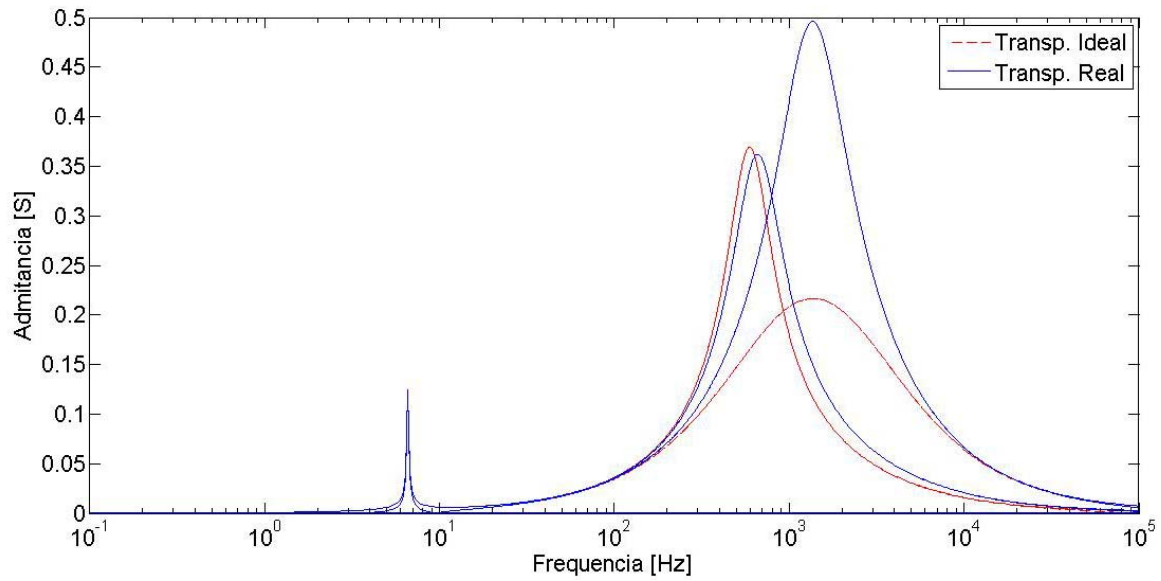


Figura 4.2.1: Admitâncias de sequência obtidas para o primeiro caso, gráfico semi log.

A Figura 4.2.1 mostra a curva semi-log das admitâncias próprias de sequência positiva e zero. A partir da frequência de 100 Hz deve-se utilizar o modelo de transposição por circuitos, modelo real, já que nota-se pelos dois gráficos que os valores de admitâncias possuem diferenças notáveis, não sendo possível considerar a transposição ideal.

Da teoria [9] sabe-se que a ressonância desse sistema, depende do comprimento e da compensação da linha de transmissão conforme pode ser visto em 4.1.1:

$$f_0 = \frac{1}{4\tau} = \frac{v}{4l} \quad (4.1.1)$$

Onde:

F – frequência de ressonância;

τ – Constante de tempo do sistema;

v – velocidade da luz no espaço, aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s;

l – comprimento da linha de transmissão.

Dessa forma para o caso apresentado, ligando as subestações de Imperatriz e Colinas a frequência de ressonância, para o circuito não compensado:

$$f_0 = \frac{3 * 10^8}{4 * 343000} = 218,66 \text{ Hz} \quad (4.1.1)$$

Sabe-se que para frequência de 60 Hz, o sistema estaria 100 % compensado, se o valor obtido nas Figuras 4.1.1 e 4.1.2 fosse dentro da faixa de 60 a 218,65 Hz, a conclusão seria de que a linha tem uma compensação entre zero e cem por cento. No caso estudado, conclui-se então que o sistema de potência está com uma compensação superior a 100%.

Pelos gráficos, observou-se também que as ressonâncias de sequência positiva e de sequência zero ocorrem na mesma frequência, conforme pode ser visto pela letra A na Figura 4.1.1, na ordem de 10 Hz, o que se torna um fator importante a ser analisado ao se estudar o comportamento e a dinâmica de máquinas síncronas e de transformadores e suas ligações, uma vez que dependendo da excitação pode gerar conjugado de sequência zero no sistema.

Os estudos que se seguem considerarão valores de frequência menores ou iguais a 100 Hz, baixa frequência.

4.2 – Caso Norte-Sul: Comparação entre o modelo II e o J. Marti

O segundo caso passo foi representar o sistema conforme dados extraídos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e então “montar” o sistema de acordo com suas especificações, resultando no Diagrama mostrado abaixo, obtido no programa computacional ATPDraw:

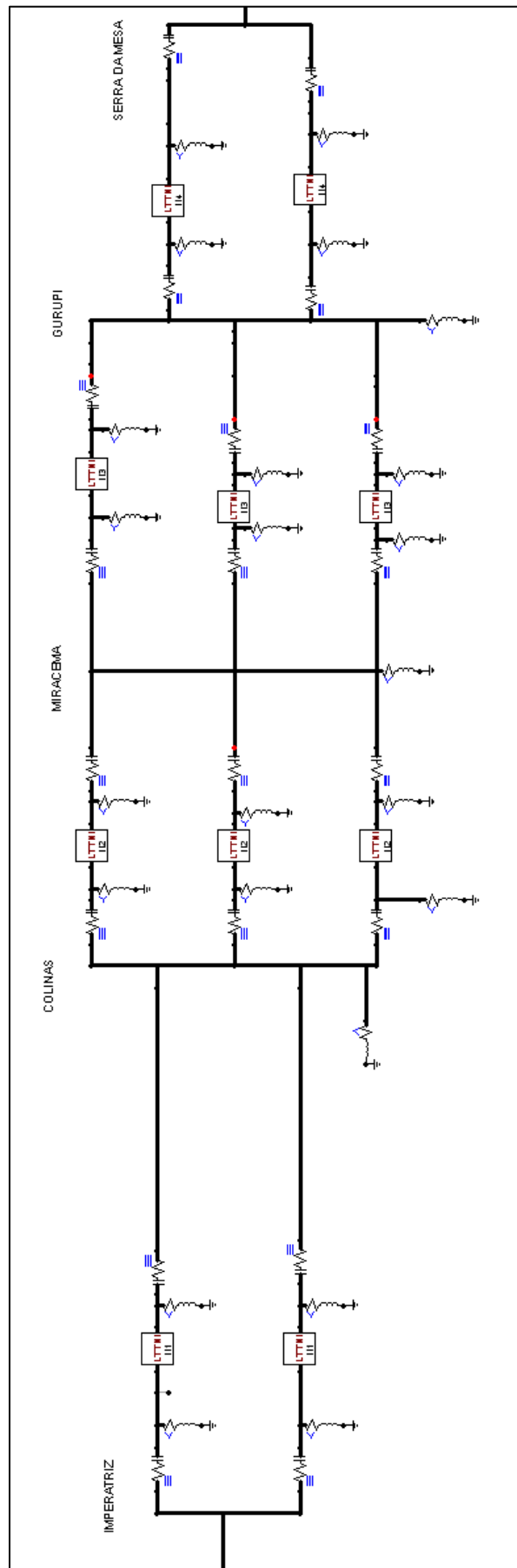


Figura 4.2.1: Circuito representativo do trecho Imperatriz-Serra da Mesa.

Vale ressaltar que cada elemento LCC mostrado na Figura 4.2.1 representa a transposição por circuitos de cada linha de transmissão, conforme pode ser visto na Figura 4.2.2, onde o primeiro elemento corresponde o trecho de linha de comprimento $L/3$, o segundo e terceiro trecho de comprimentos $L/6$ e o quarto trecho de $L/3$, onde L é o comprimento total da linha, dado em km, garantindo, assim, a transposição por circuitos da linha.

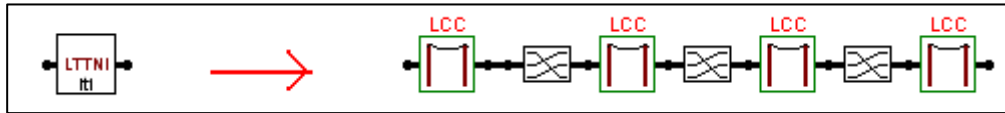


Figura 4.2.2: Circuito Representação de cada linha de transmissão.

A partir dos dados das Linhas de transmissão e dos elementos do sistema (capacitores série e indutores shunt), obtidos do arquivo do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), e os parâmetros da linha a partir da geometria da torre mostrada no Apêndice A.1. Então, o sistema foi desenhado, e a Tabela 4.2.1 mostra um resumo com a quantidade de elementos que compõe cada trecho.

Tabela 4.2.1: Componentes do Sistema Norte – Sul.

Trecho	Ligação	Nº de Linhas	Nº de Capacitores série por LT	Nº de Indutores Shunt por LT
1	Imperatriz - Colinas	2	2	2
2	Colinas - Miracema	3	1	1
3	Miracema - Gurupi	3	2	2
4	Gurupi - Serra da Mesa	2	1	2

A primeira etapa do trabalho foi configurar as Linhas de Transmissão, para comparar os parâmetros de sequência obtidos a partir do ATP, considerando o modelo Π e o J. Marti, o objetivo é, com o auxílio do Matlab, analisar se o modelo Π , que é um modelo aproximado e muito utilizado, é satisfatório, ou seja, se ele se aproxima de um modelo mais realista, variante com a frequência, que é o caso do modelo J. Marti.

O modelo Π é um modelo mais aproximado, utilizado para obter representações Π -nominal (ou equivalente, para uma linha de transmissão curta, válido para simulações de transitórios) ou de um Π -equivalente (para uma linha de transmissão longa, em regime

permanente). Já o modelo J. Marti é utilizado para se obter um modelo de linha com os parâmetros variando com a frequência, adequado para estudos de transitórios onde o modelo a parâmetros constantes não é adequado [9].

Para esse caso, a Y_{nodal} tem dimensão de 6 linhas e 6 colunas e é da forma:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

É possível se obter os parâmetros do sistema equivalente aplicando-se fontes de tensão nas entradas (“a”, “b” e “c”), subestação de Imperatriz, e nas saídas (“d”, “e” e “f”), subestação de Serra da Mesa, do sistema trifásico. Esse estudo é feito aplicando-se um sinal de tensão unitária de 1 V em cada uma das entradas e saídas isoladamente, e aplicando um curto-circuito nos demais terminais.

Exemplo, considerando uma fonte de tensão na entrada “a”, curto-circuitando os outros terminais e medindo-se a corrente que passa pelas 3 entradas e pelas 3 saídas, obtêm-se a primeira coluna da Y_{nodal} conforme é mostrado nas duas equações abaixo:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & V_a \\ Y_{21} & V_a \\ Y_{31} & V_a \\ Y_{41} & V_a \\ Y_{51} & V_a \\ Y_{61} & V_a \end{bmatrix} \rightarrow V_a = 1V \quad (4.2.2)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{21} \\ Y_{31} \\ Y_{41} \\ Y_{51} \\ Y_{61} \end{bmatrix} \quad (4.2.3)$$

Realizando esse procedimento para todas as 3 entradas e as 3 saídas, e exportando esses 6 resultados para o Matlab, é possível montar a Y_{nodal} equivalente do sistema Norte-Sul com os comandos do Matlab, mostrados no Apêndice A.2. O tempo de duração de cada simulação foi de aproximadamente 15 minutos.

Como os resultados obtidos no ATPdraw são parâmetros de fase, e a comparação entre os modelos de linha é feita considerando parâmetros de sequência, foi necessário aplicar a teoria de transformação da Y_{nodal} de fase para a de sequência. Isso é feito considerando a transformação mostrada em (4.2.4).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}; a = 1\epsilon^{j2\pi/3} \quad (4.2.4)$$

Como o caso estudado apresenta 3 entradas e 3 saídas, a matriz de transformação passa a ser a mostrada em (4.2.5):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ V'_0 \\ V'_1 \\ V'_2 \end{bmatrix} \quad (4.2.5)$$

Essa transformação de parâmetros de fase para de sequência também foi feita no Matlab, e o comando é mostrado no Apêndice A.2

Dessa forma, a forma da matriz Y_{nodal} resultante é mostrada em (4.2.6),

$$\begin{bmatrix} I_{012} \\ I'_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{012} & Y_{012/012'} \\ Y_{012'/012} & Y'_{012} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{012} \\ V'_{012} \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

Onde:

I_{012} – Representa o vetor corrente, 3x1, de sequência para as fases “a” “b” e “c”.

I'_{012} – Representa o vetor corrente, 3x1, de sequência para as fases “d” “e” e “f”.

V_{012} – Representa o vetor tensão, 3x1, de sequência para as fases “a” “b” e “c”.

V'_{012} – Representa o vetor tensão, 3x1, de sequência para as fases “d” “e” e “f”.

Y_{012} e $Y_{012'}$ – São matrizes 3x3 e representam componentes de admitância de sequência obtidas das fases abc e def.

$Y_{012/012'}$ e $Y_{012'/012}$ – São matrizes 3x3 e representam componentes de admitância de sequência das mútuas entre as fases abc e def, e vice-versa.

Assim, observa-se que o elemento 2,2 da matriz de admitância de sequência, que é uma matriz 6x6, corresponde ao valor de sequência positiva da parte emissora (Imperatriz), fases “a”, “b” e “c”, enquanto que o elemento 5,5 corresponde ao parâmetro de sequência positiva da parte receptora (Serra da Mesa), fases “d”, “e” e “f”. E dessa forma, o elemento 2,5, corresponde a admitância mútua entre as seqüências positivas da parte emissora e receptora.

Esse processo foi todo refeito considerando o modelo de linha de transmissão J. Marti, para que assim fosse possível comparar o resultado de ambos. Os gráficos mostrados nas Figuras 4.2.3 e 4.2.5 são resultados dessas simulações e mostram todos os elementos da matriz de admitância 6x6. As Figuras 4.2.4 e 4.2.6 mostram todos os elementos da matriz de admitância 6x6, associados a admitâncias mútuas.

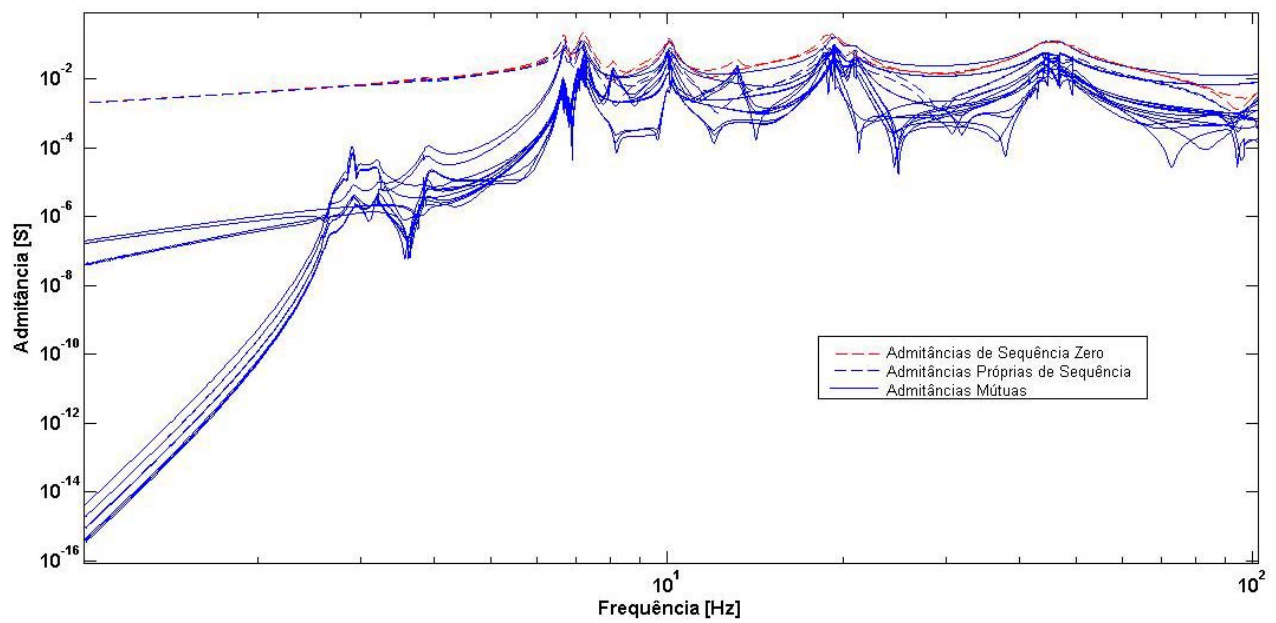


Figura 4.2.3: Y nodal de sequência, 36 elementos, para o modelo II

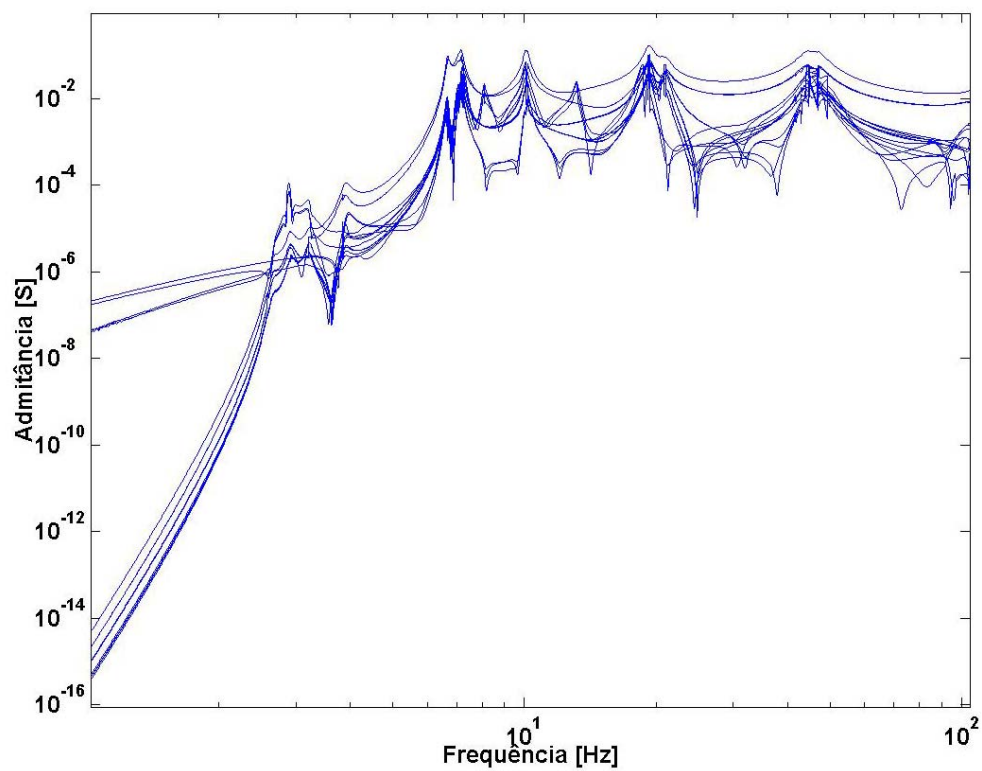


Figura 4.2.4: Y nodal mútuas de sequência para o modelo II

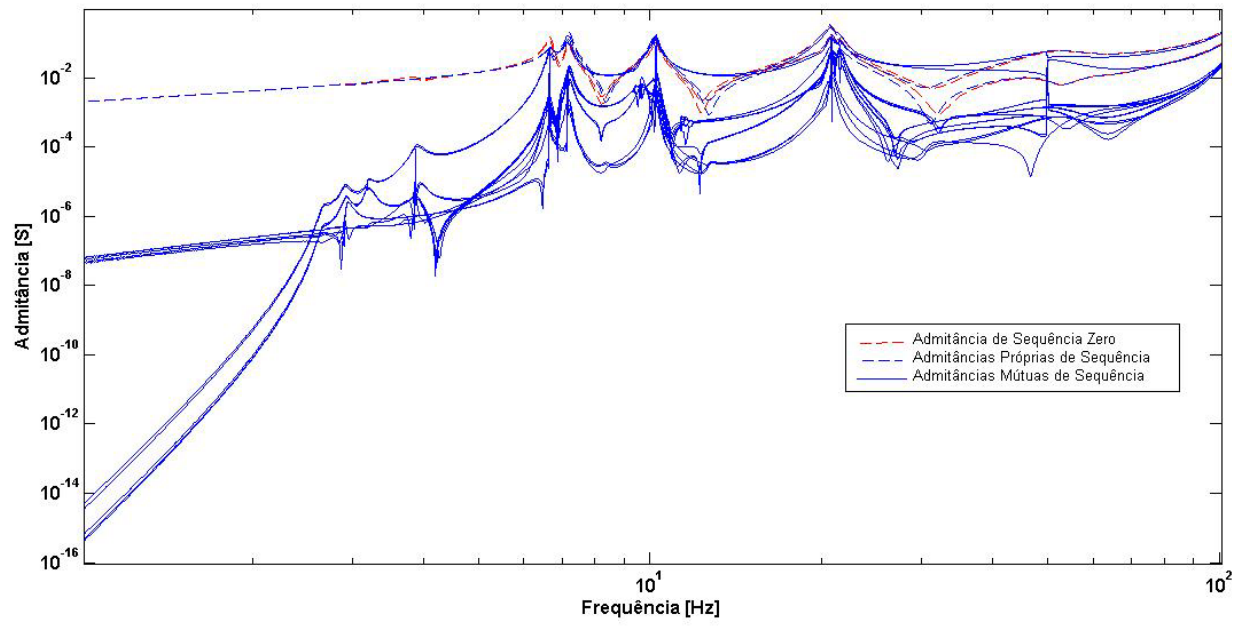


Figura 4.2.5: Y nodal de sequência, 36 elementos, para o modelo J. Marti.

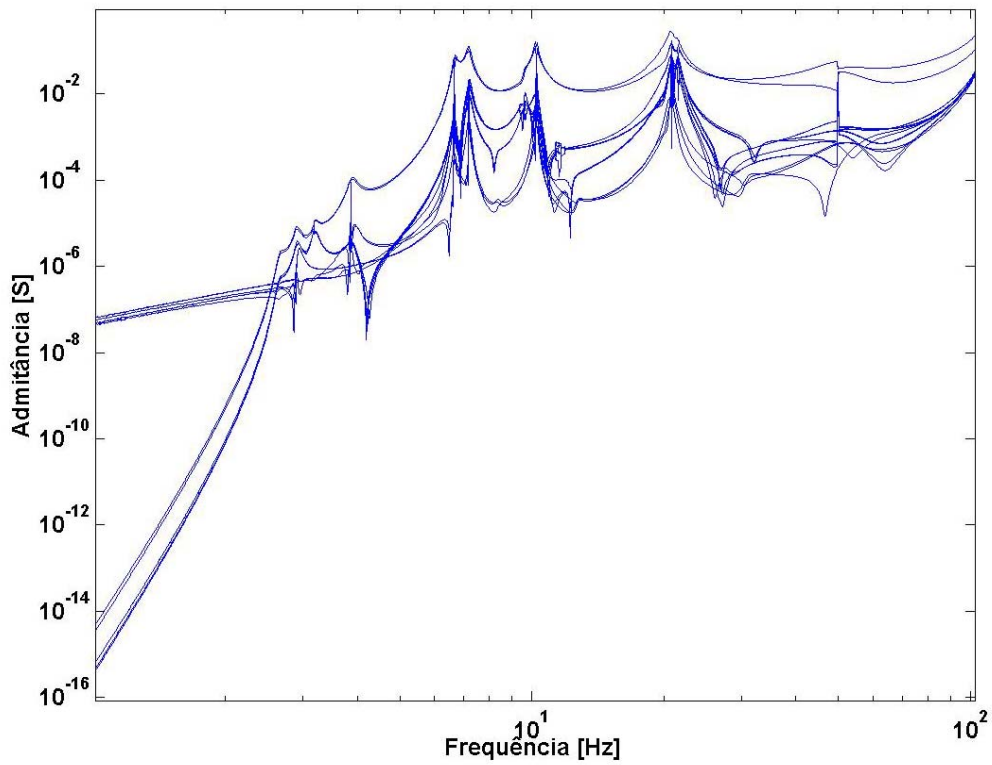


Figura 4.2.6: Y nodal mútuas de sequência para o modelo J. Marti.

A partir desse estágio, fez-se a diferença entre as partes reais e imaginárias dos resultados obtidos para os dois modelos, considerando isoladamente as componentes de sequência positiva (elementos 2,2 da matriz de admitância de sequência e, posteriormente o elemento 5,5) e a componente mútua de sequência positiva (elemento 2,5 da matriz de admitância de sequência). Gerando os seguintes resultados.

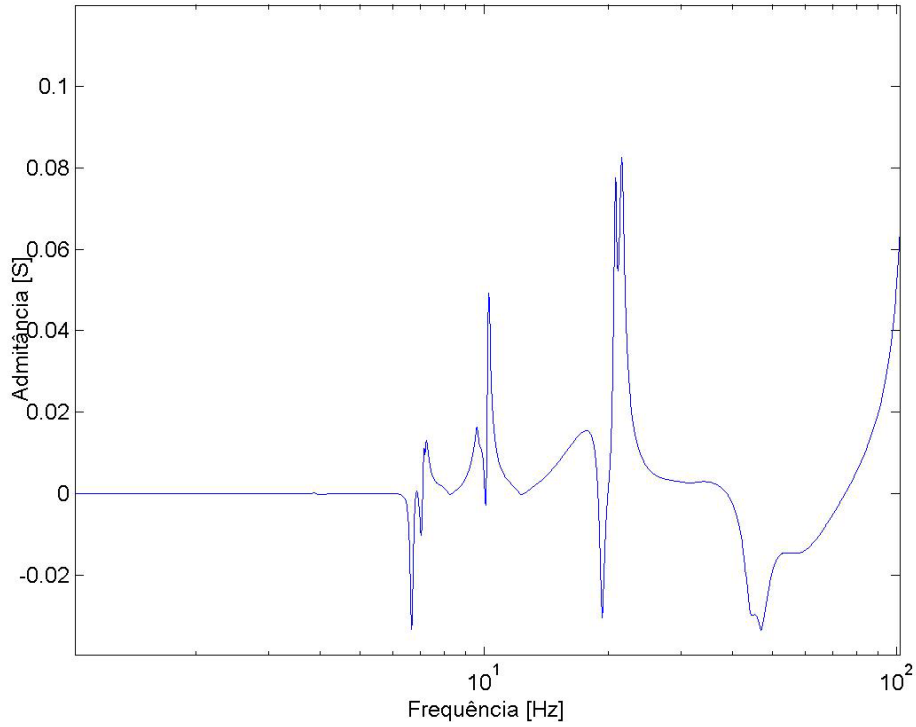


Figura 4.2.7: Diferença da parte real do elemento 2,2 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

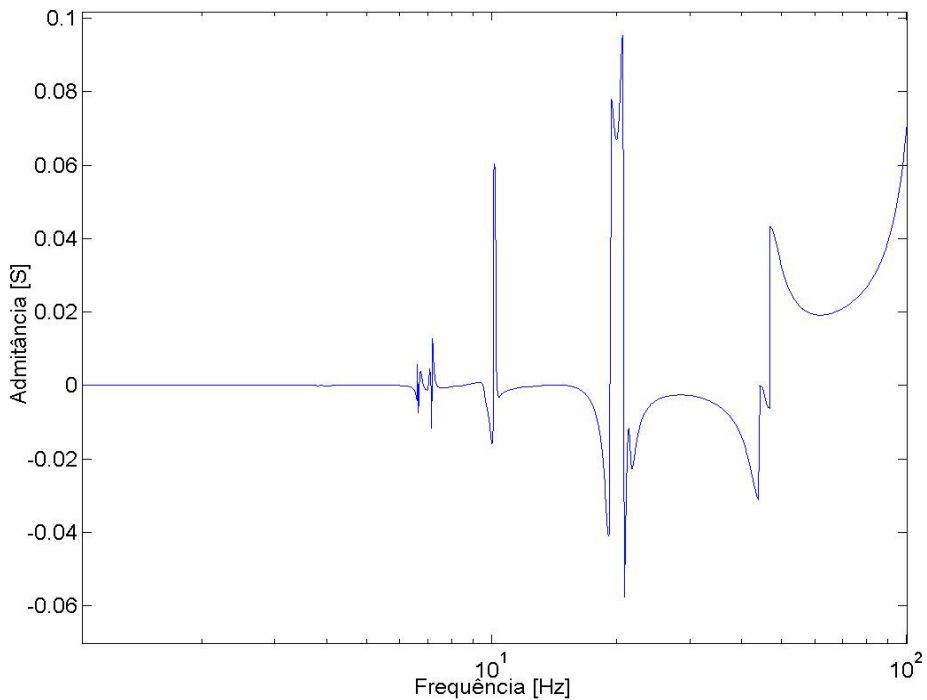


Figura 4.2.8: Diferença da parte imaginária do elemento 2,2 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

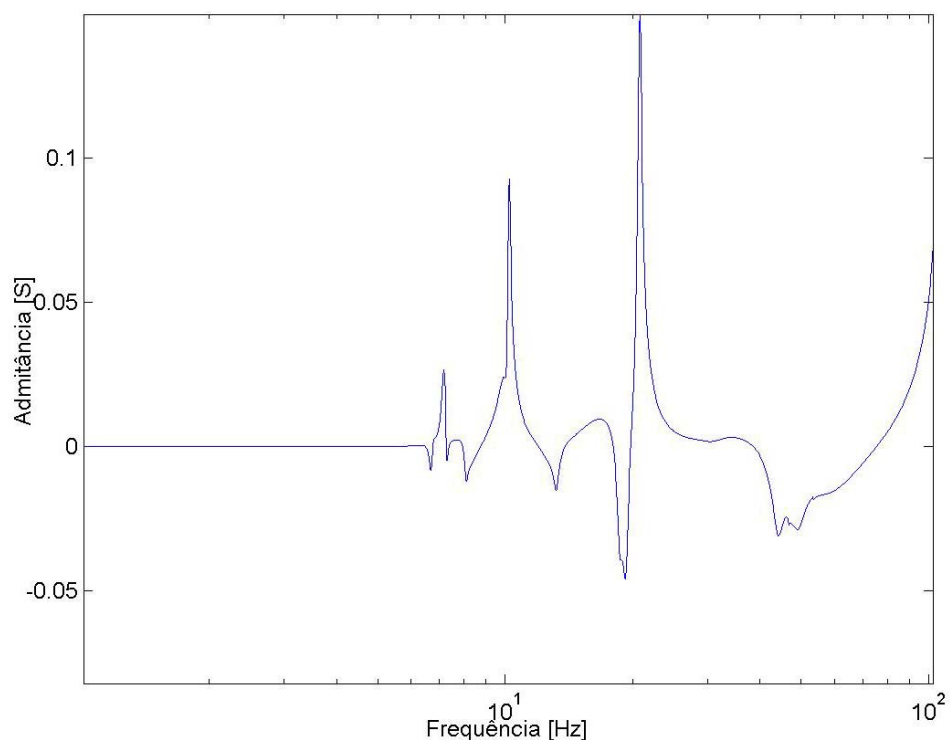


Figura 4.2.9: Diferença da parte real do elemento 5,5 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

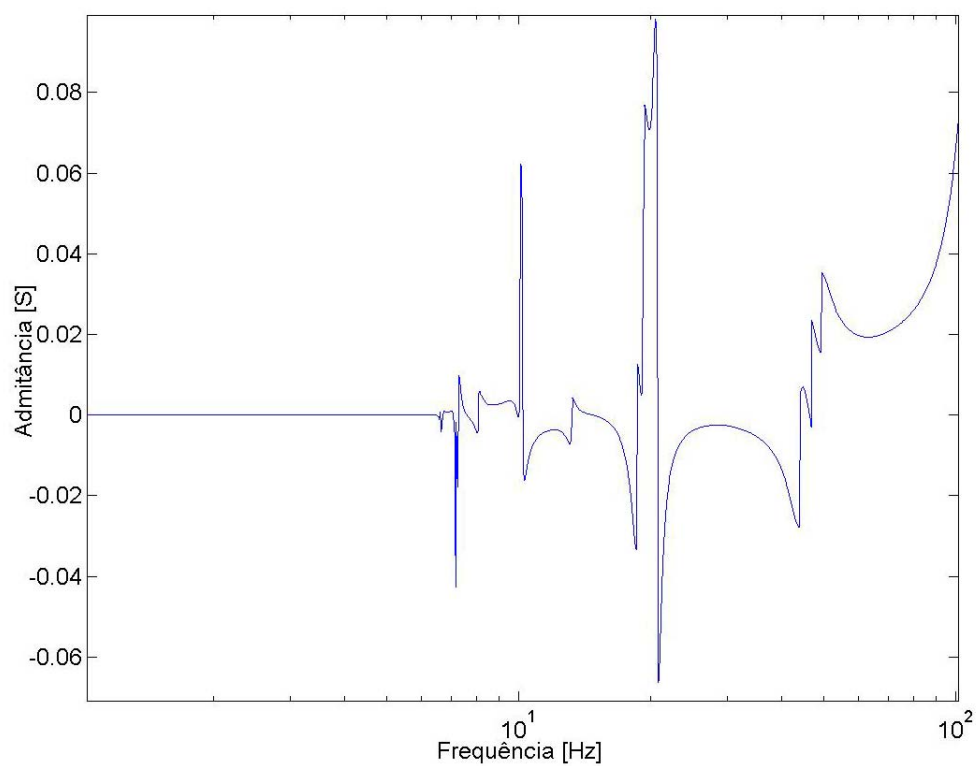


Figura 4.2.10: Diferença da parte imaginária do elemento 5,5 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

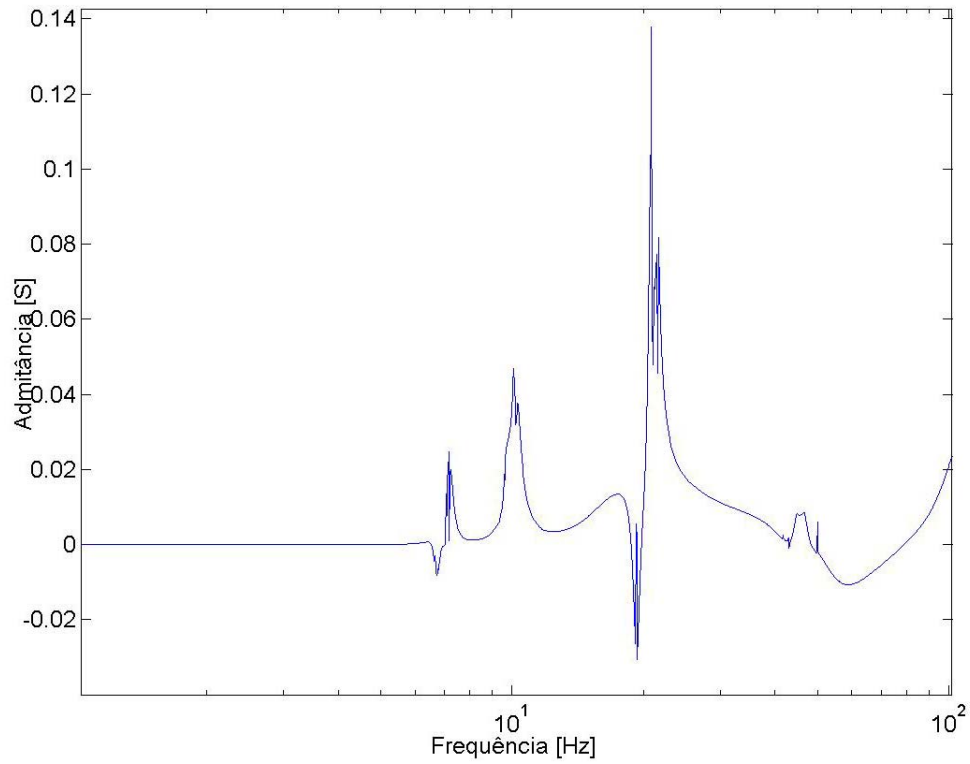


Figura 4.2.11: Diferença da parte real do elemento 2,5 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

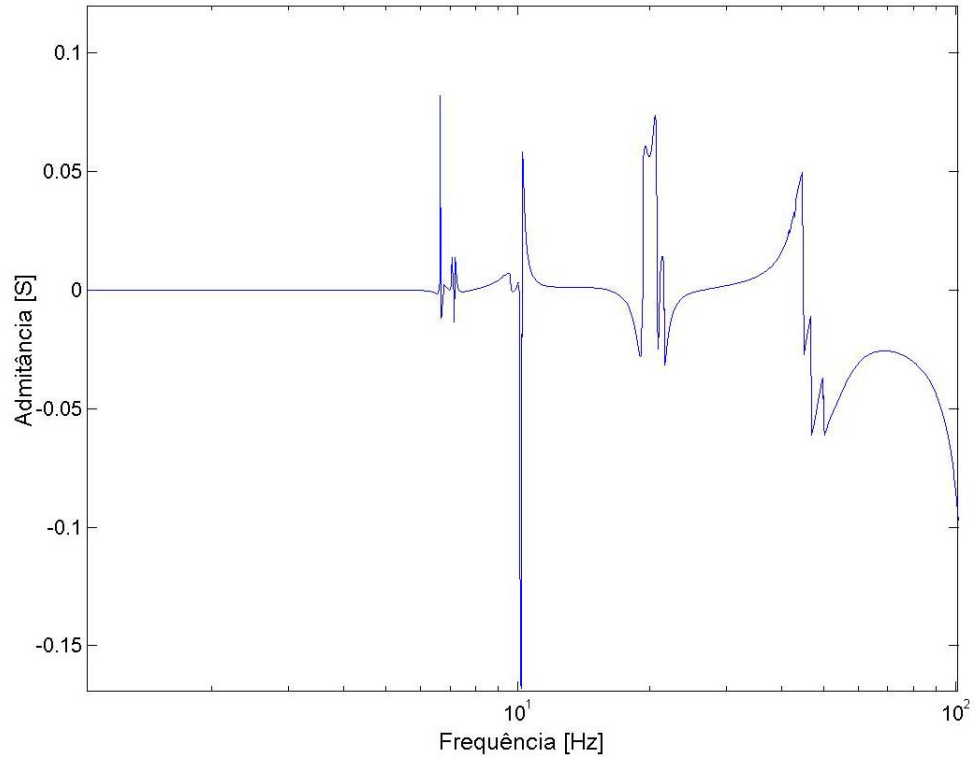


Figura 4.2.12: Diferença da parte imaginária do elemento 2,5 da Y nodal para os modelos J. Marti e II.

Com os resultados obtidos, conclui-se que existem diferenças de ressonância para frequências abaixo de 60 Hz. Observa-se também que apesar de gerarem valores próximos de admitância de sequência positiva e de mútuas, os dois modelos têm uma pequena diferença, considerando que o valor da admitância é de 0,5 S, conforme pode ser visto na Figura 4.2.1. Isso se deve ao fato do modelo II ser mais aproximado enquanto que o J. Marti, que considera os parâmetros distribuídos e variantes na frequência gera resultados mais realistas nos estudos de linhas de transmissão.

4.3 – Caso Norte-Sul: Análise da ressonância do sistema

Nessa etapa foram analisada as respostas de tensão nas 6 fases considerando um degrau de amplitude 1000V em cada uma das fases isoladamente, enquanto que as demais ficaram em aberto. Essa configuração de circuito aberto foi adotada porque para esse caso, o sistema possui maior oscilação de tensão do que o caso de curto-circuito, onde o sistema atinge mais rapidamente o regime permanente. Um exemplo dessa configuração do sistema pode ser visto na Figura (4.3.1).

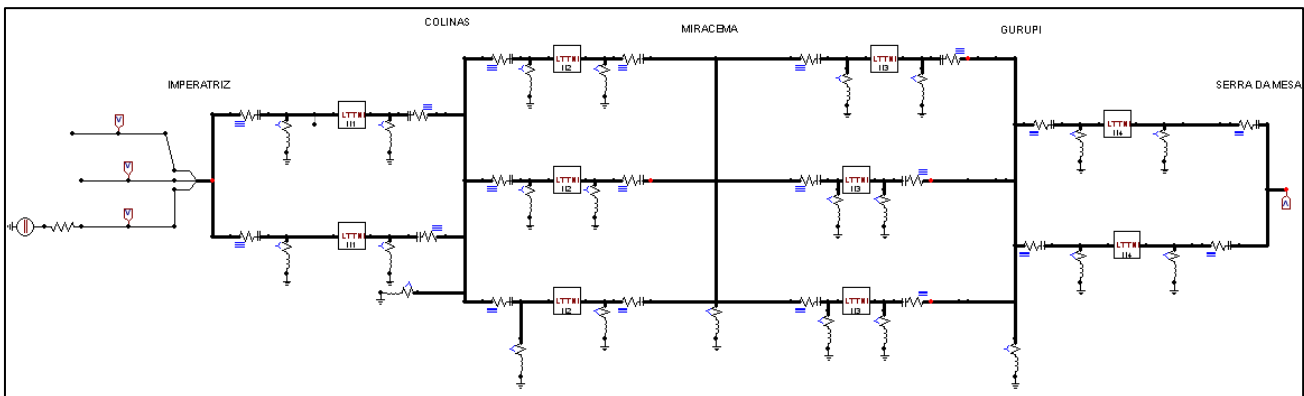


Figura 4.3.1: Circuito representativo do caso 3, considerando um degrau de tensão aplicado na fase A.

O objetivo é analisar qual desses 6 casos apresenta a maior oscilação de tensão, ou seja, qual caso resulta um maior pico de tensão e em que instante de tempo e consequentemente a frequência que esse pico acontece. A partir desse instante, fazer um estudo em cima desse circuito, aplicando uma fonte do tipo degrau de amplitude 1 V multiplicado por uma cossenóide com a frequência da oscilação de tensão e assim

observar o comportamento do sistema. Essas simulações foram feitas considerando um intervalo de tempo de 0 a 1,0 segundos

No caso em que o degrau foi aplicado no lado de Imperatriz (emissora), foram medidas as tensões das fases de Serra da Mesa (receptora) e vice-versa. A análise desses gráficos de tensão foi focada na análise dos instantes de tempo iniciais (da ordem de 0,0 a 0,20 segundos) e finais (da ordem de 0,7 a 1,0 s). O tempo das simulações desse caso durou aproximadamente 90 segundos.

A análise dos gráficos de tensão considerando o instante de tempo final objetivou simplesmente observar se o sistema atingiu o regime, enquanto que a análise dos gráficos nos instantes de tempo iniciais serviu para se observar qual o valor de tensão corresponde à maior oscilação em que tempo, e conseqüentemente, frequência, que o mesmo ocorre.

Os gráficos resultantes dos 6 casos encontram-se no Apêndice B, onde se conclui que os 6 casos geraram o mesmo pico de tensão na máxima frequência de oscilação. A Tabela 4.3.1 apresenta uma síntese dos valores aproximados de cada pico de tensão. Como conclusão tem-se o fato de que gerando os mesmos valores de tensão significa que o sistema é simétrico e transposto.

Outra conclusão que se tem, ao analisar os gráficos do Apêndice B, é que quando o degrau foi aplicado na fase A de Imperatriz, a máxima oscilação ressonância ocorreu na fase D, ou seja, fase A de Serra da Mesa, e assim sucessivamente, como mostra a segunda coluna da Tabela 4.3.1. Isso significa que não existem acoplamentos entre as componentes de sequência.

A Figura 4.3.2 mostra o gráfico para o caso em que se aplica o degrau na fase A de Imperatriz, sendo possível ver o comportamento das tensões nas 3 fases da subestação Serra da Mesa, considerando os instantes iniciais, a Figura 4.3.3 considera os instantes de tempo finais dessas mesmas tensões, com o objetivo de observar o regime permanente do sistema, enquanto que a Figura 4.3.4 mostra o comportamento das tensões na subestação de Imperatriz.

Tabela 4.3.1: Resultados do Caso 2:

Fase de aplicação da fonte de tensão de grau	Tensão correspondente de ressonância	Fase onde ocorreu a máxima ressonância
A	920 V	D
B	920 V	E
C	920 V	F
D	920 V	A
E	920 V	B
F	920 V	C

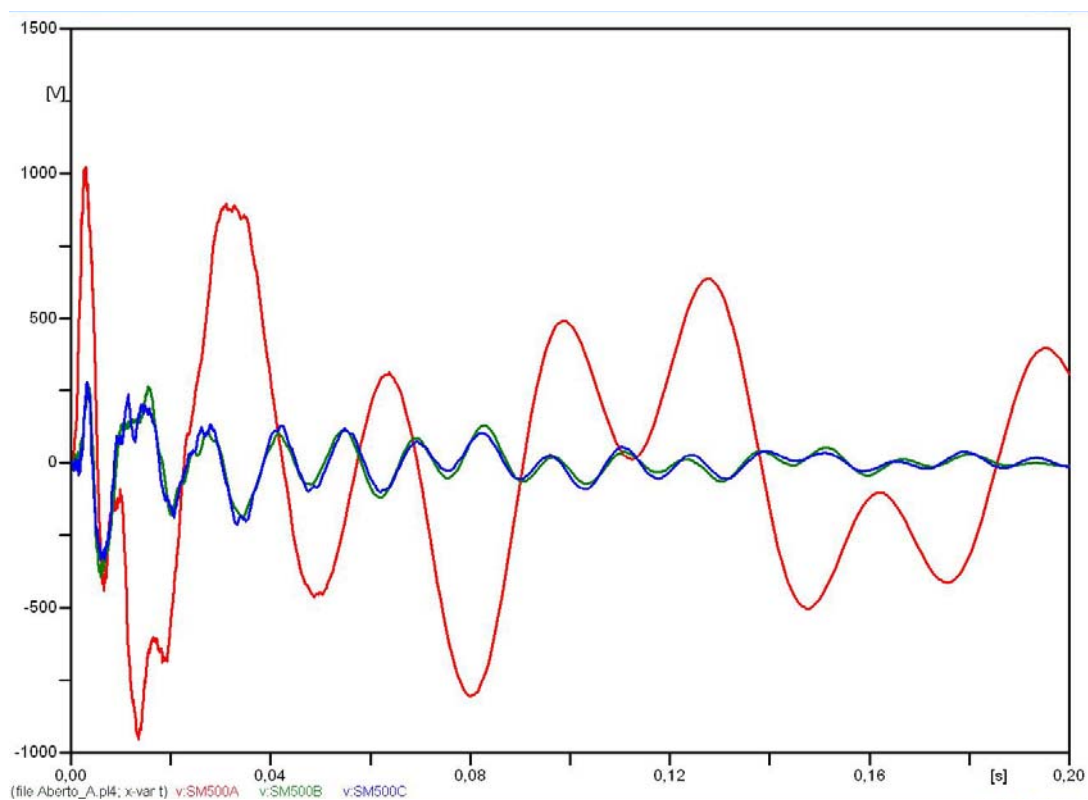


Figura 4.3.2: Instantes iniciais - Tensões das 3 fases de Serra da Mesa.

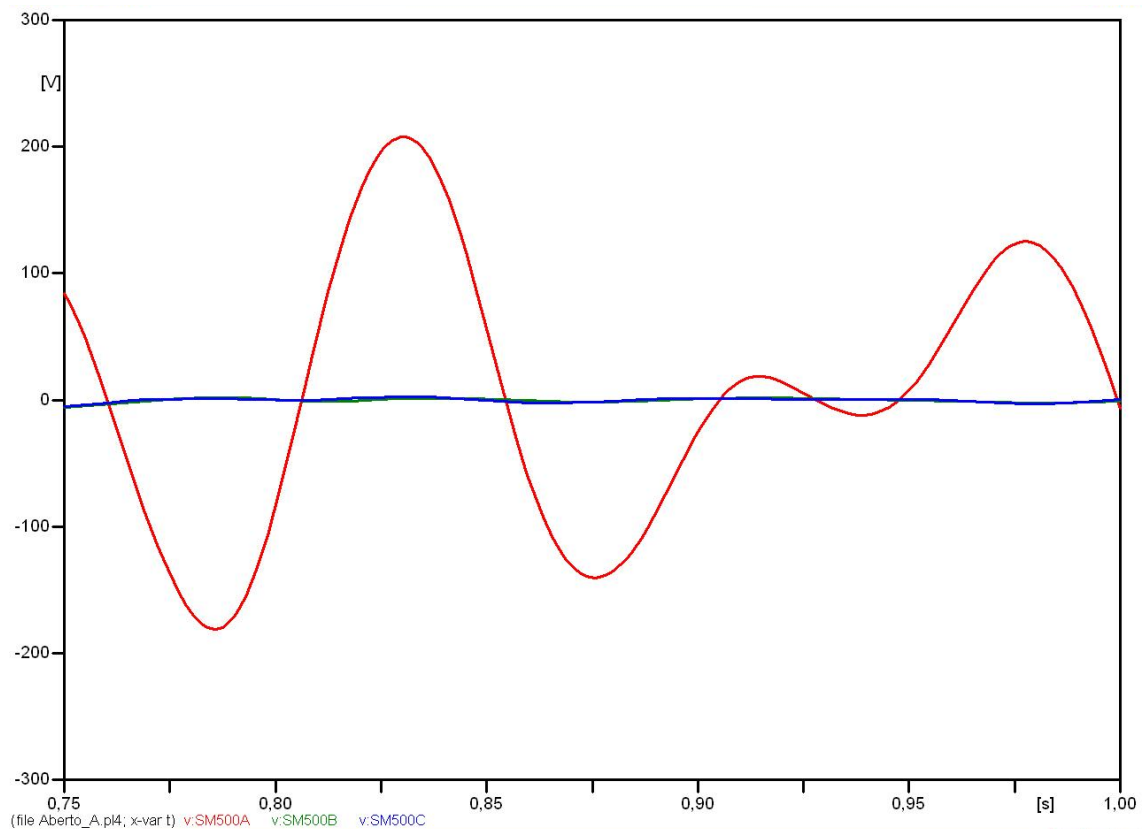


Figura 4.3.3: Instantes finais – Tensões das 3 fases de Serra da Mesa.

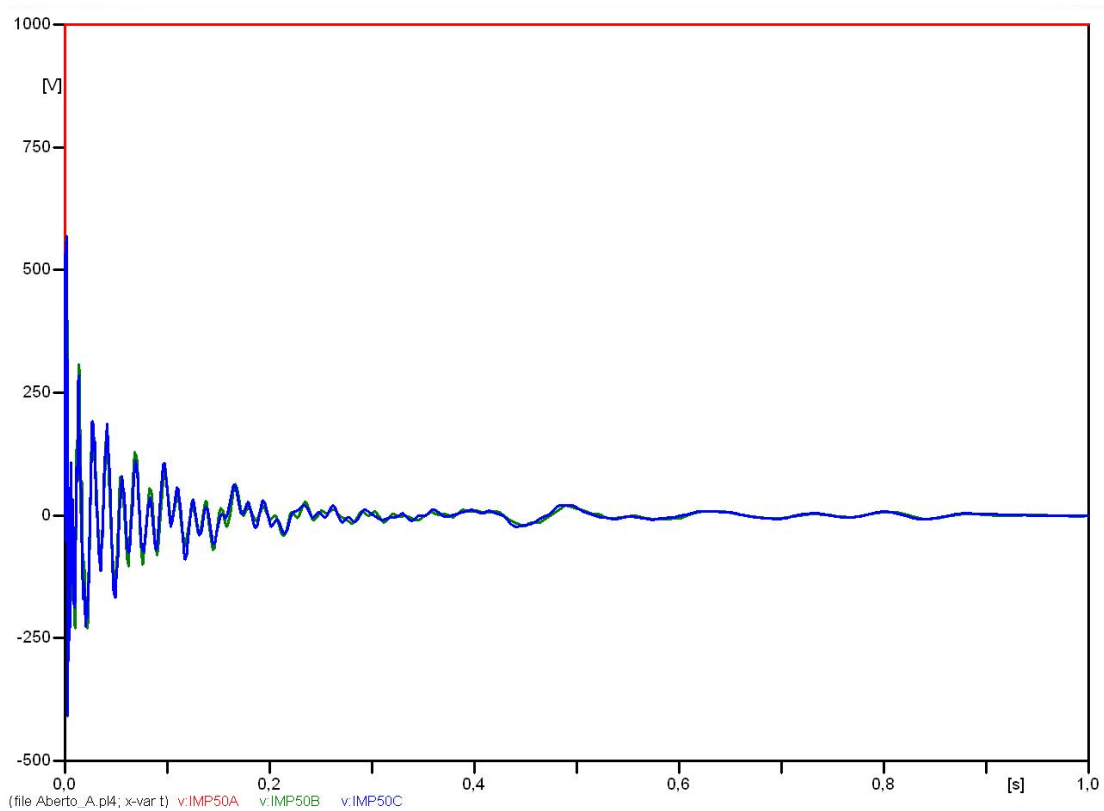


Figura 4.3.4: Comportamento das tensões das 3 fases de Imperatriz.

Como resultado dessa etapa da simulação, concluiu-se que o transitório a altas frequências tem amplitude aproximada ao do valor de pico de tensão correspondente a

maior oscilação, isso pode ser visto na Figura 4.3.3, onde se tem valor de transitório da ordem de 1000 V, enquanto que o valor da maior amplitude de oscilação foi de 920 V. Outra consideração é que para esse estudo, o transitório inicial não possui grande importância uma vez que a energização da rede não é feita de uma única vez.

Percebe-se na Figura 4.3.2 que o tempo correspondente a maior amplitude de oscilação é de 0,0333 segundos, o que corresponde a uma frequência de aproximadamente 30,30 Hz. Com esse resultado, substitui-se em algum dos 6 circuitos a fonte de tensão do tipo degrau por uma fonte de degrau multiplicado por uma cossenóide de frequência 30,30 Hz.

O circuito considerado é a fonte sendo aplicada na fase “c” da subestação Imperatriz, conforme mostra a Figura 4.3.1. A Figura 4.3.6 mostra como resultado da simulação, o comportamento das tensões nas 3 fases da parte receptora de Serra da Mesa.

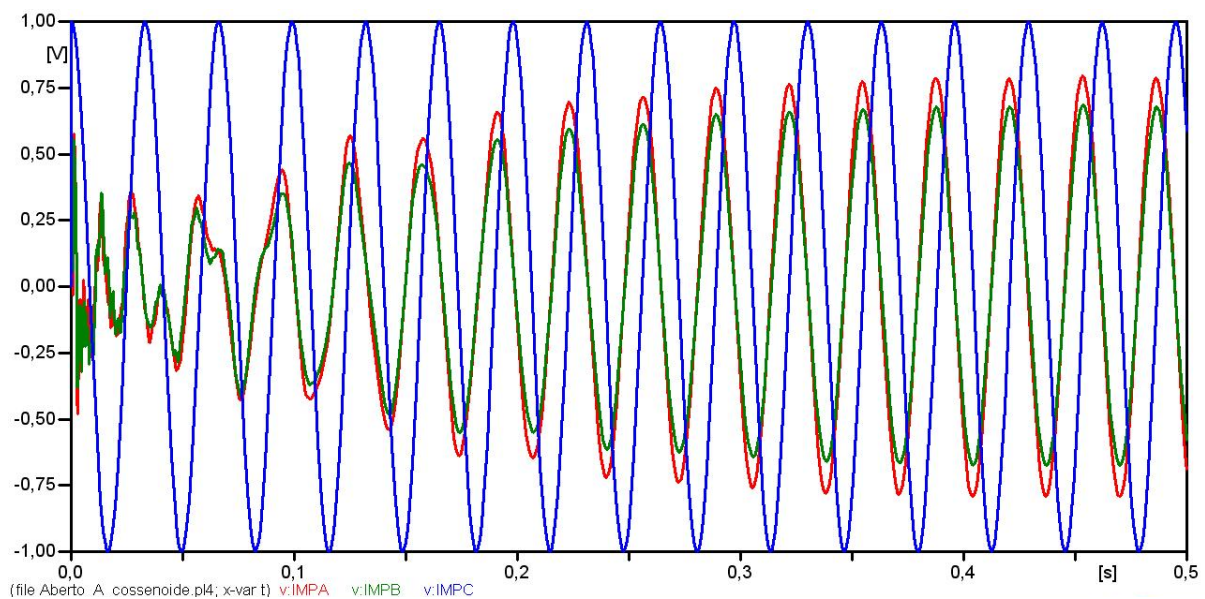


Figura 4.3.5: Comportamento das tensões de Imperatriz para frequência de máxima ressonância.

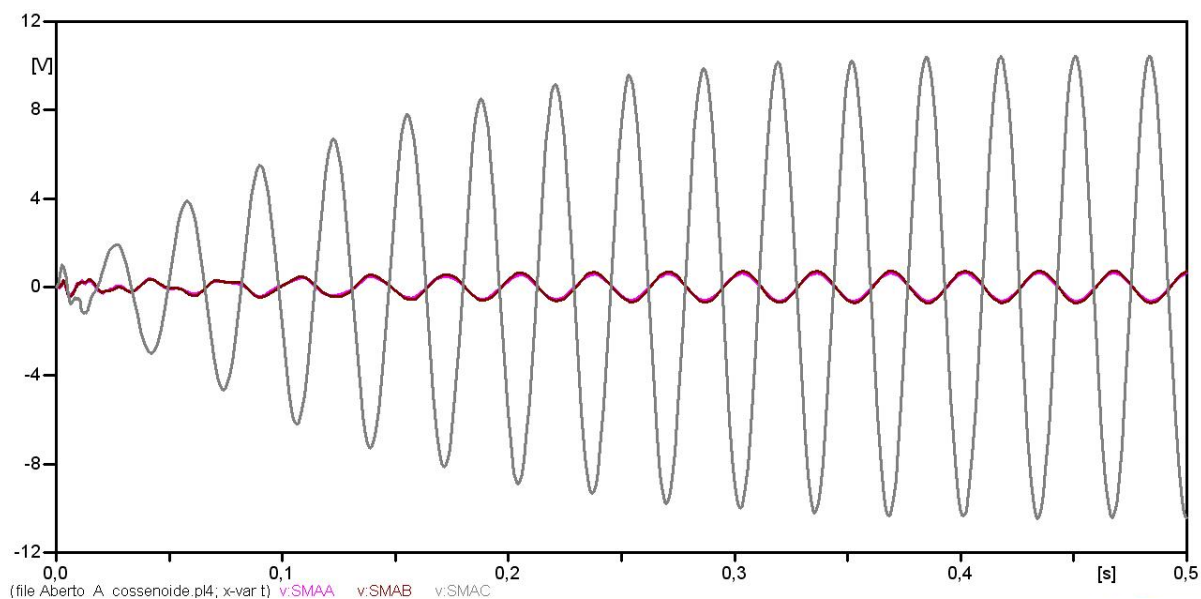


Figura 4.3.6: Comportamento das tensões de Serra da Mesa para frequência de máxima ressonância.

Observa-se que quando se aplicou o degrau multiplicado pela cossenóide na fase C de Imperatriz, com frequência da máxima oscilação, 30,30 Hz, o sistema na fase correspondente, ou seja, fase C de Serra da Mesa desestabilizou. Esse desvio a partir de 0,33 segundos aproximadamente permaneceu constante devido às baixas perdas da Linha de Transmissão.

A próxima etapa foi obter um circuito equivalente monofásico de sequência positiva, com o modelo Π de linha de transmissão, onde se aplicou a mesma fonte degrau multiplicada por uma cossenóide de frequência 30,3 Hz, conforme mostra a Figura 4.3.7.

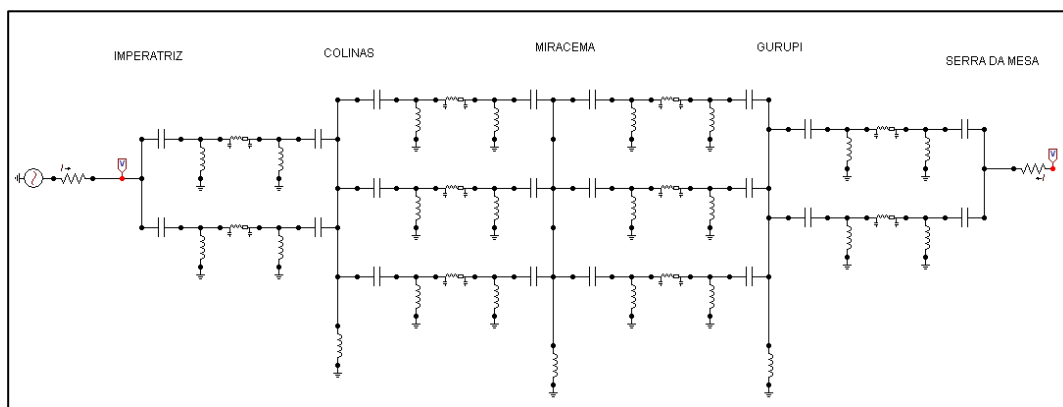


Figura 4.3.7: Circuito Norte-Sul monofásico de sequência positiva.

Foram analisadas as tensões da fonte de entrada (Imperatriz) e a tensão de saída (Serra da Mesa), o resultado é mostrado na Figura 4.3.8, abaixo.

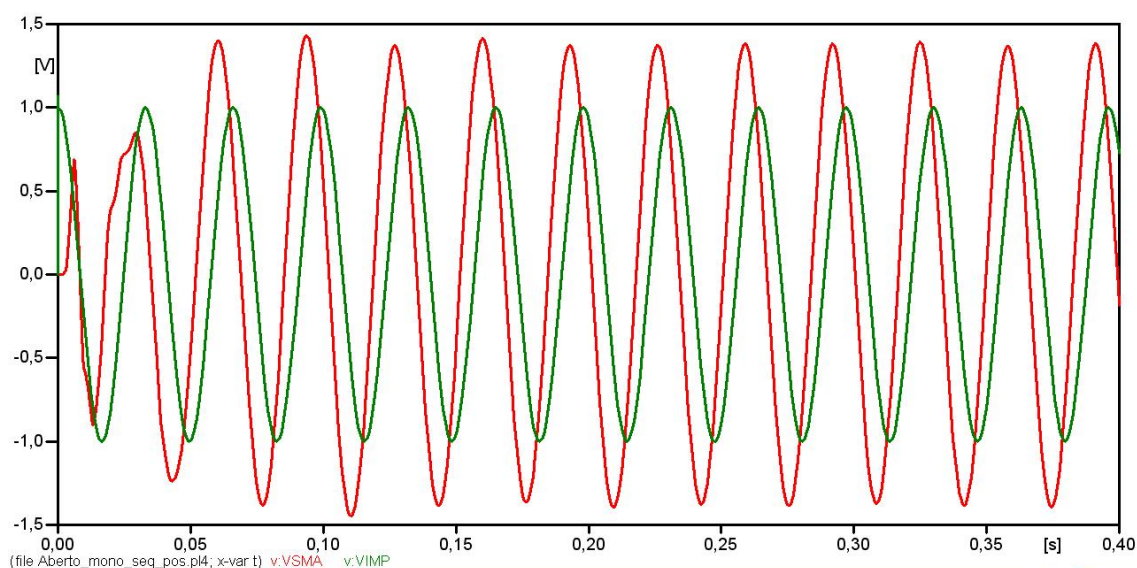


Figura 4.3.8: Tensões de Serra da Mesa e Imperatriz.

Comparando a tensão na fase C de Serra da Mesa, mostrada no gráfico da Figura 4.3.6 com a tensão de Serra da Mesa, Figura 4.3.8, observa-se uma diferença entre as amplitudes das mesmas. Enquanto que a primeira alcançou módulo de aproximadamente 9,0 V, a segunda chegou ao máximo de 1,4 V. Isso mostra que quando se estuda o sistema monofásico equivalente acaba desconsiderando os acoplamentos provenientes de outras fases, resultando em menor amplitude de tensão do que o caso trifásico.

4.4 – Caso Norte-Sul: Comparação entre transposição ideal e por circuitos

Nesse caso, se comparou dois circuitos do trecho Norte-Sul, para tal, foi considerado o circuito que liga as subestações de Imperatriz a Colinas. A análise foi feita no programa computacional ATPdraw, comparando no domínio do tempo, as linhas de transmissão como sendo idealmente transpostas e através de circuitos. Em outras palavras, o objetivo é comparar os resultados obtidos por transposição real e ideal. Essa simulação foi realizada no intervalo de tempo de 0 a 5 segundos.

Essa comparação entre transposições foi feita considerando dois casos, o primeiro aplicando um degrau de amplitude de 1,0 V na fase “a” de Imperatriz enquanto que as fases restantes ficaram em aberto, conforme mostra a Figura 4.4.1. O segundo caso foi utilizado o mesmo sistema, a mesma alimentação, a diferença foi que as fases “b”, “c”, “d” e “e” e “f”, ficaram em curto-circuito. A análise foi comparando a corrente na fase “a” de Colinas.

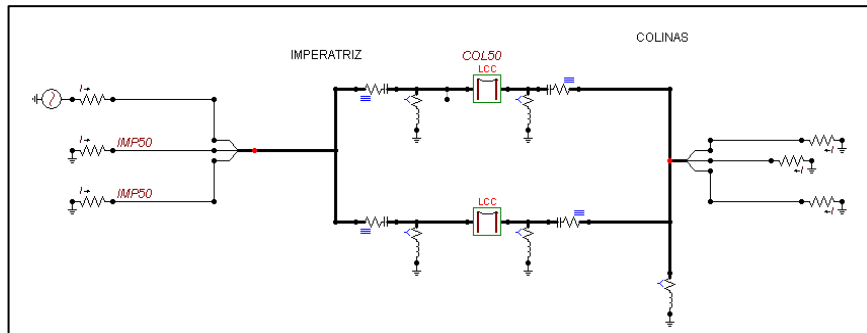


Figura 4.4.1: Degrau na fase “a” de Imperatriz e as outras fases em curto.

Para o caso de curto-circuito, os resultados obtidos na fase “a” de Colinas, considerando transposição ideal e por circuitos são mostrados nas Figuras 4.4.2 e 4.4.3. As simulações desse caso levaram aproximadamente 30 segundos no programa ATPDraw.

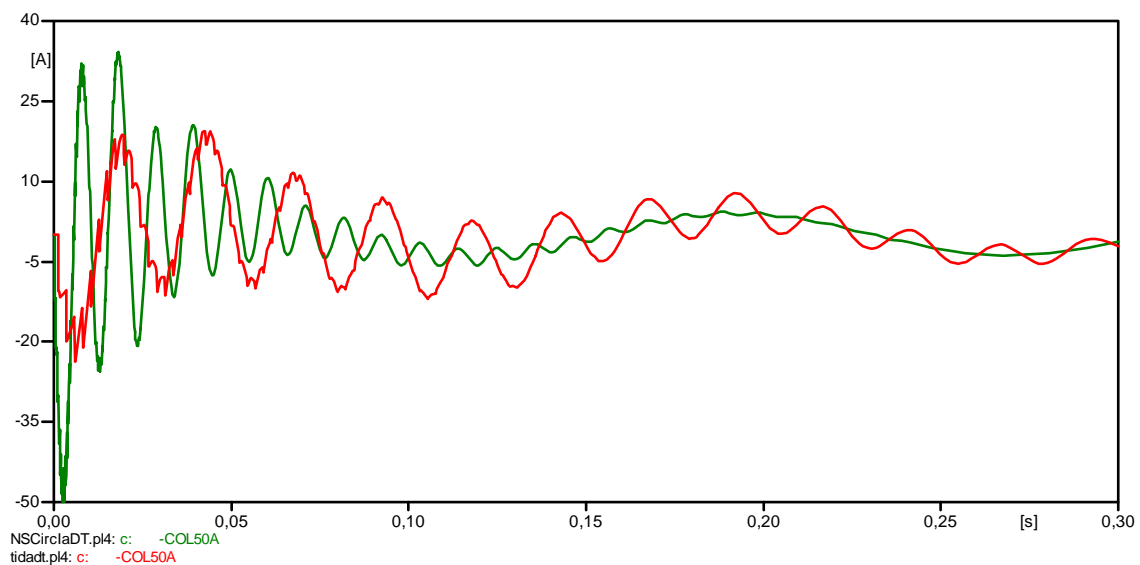


Figura 4.4.2: Corrente na fase “a” de Colinas, curto circuito.

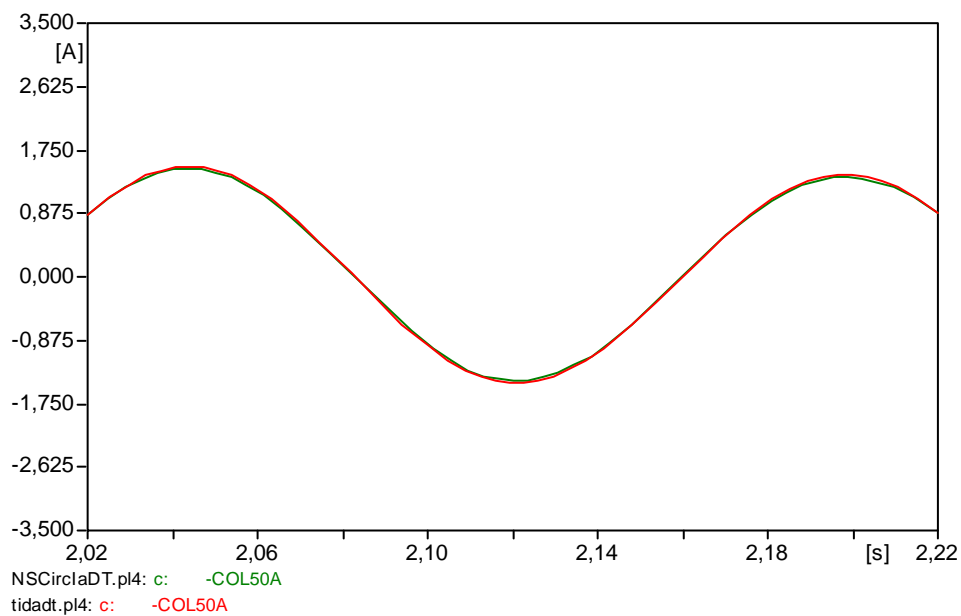


Figura 4.4.3: Corrente na fase “a” de Colinas, curto circuito.

Para o caso das fases “b”, “c”, “d”, “e” e “f” em aberto, os resultados obtidos na fase “d”, ou seja, fase “a” de Colinas, considerando transposição ideal e por circuitos são mostrados nas Figuras 4.4.4 e 4.4.4.

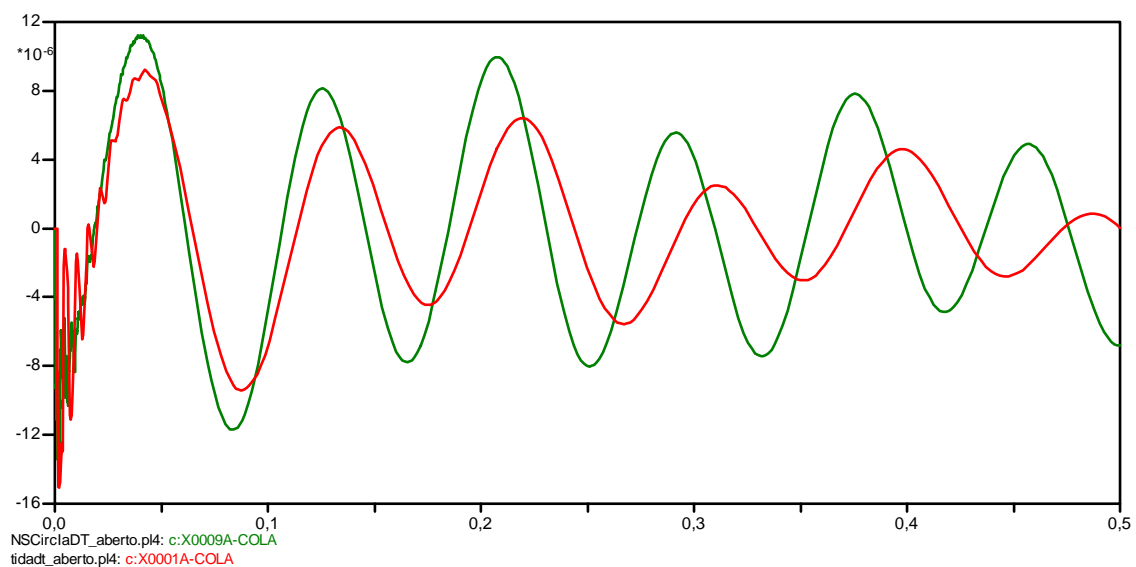


Figura 4.4.4: Correntes na fase “a” de Colinas, circuito aberto.

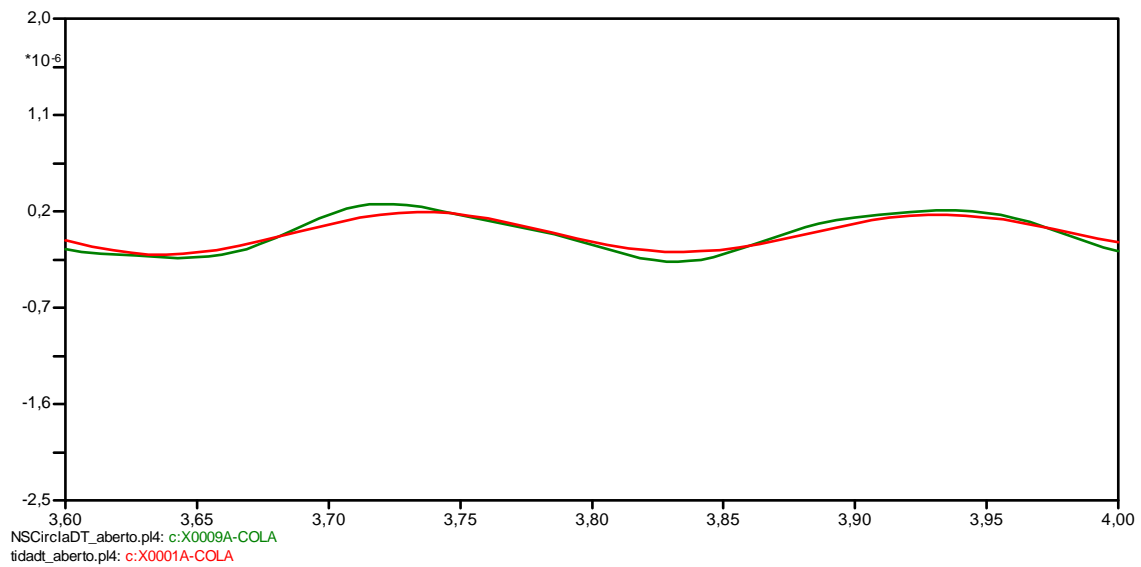


Figura 4.4.2: Correntes na fase “a” de Colinas, circuito aberto.

Como conclusão dos resultados, observou-se, principalmente na faixa de tempo de 2,022 a 2,22 segundos, no caso de curto-circuito e de 3,60 a 4,00 segundos, circuito aberto, que ainda existem pequenas diferenças, ou seja, pequenos batimentos. Portanto, o sistema ainda não atingiu o regime permanente. Vale notar que embora pequenos faz-se necessário analisar se comportamentos não lineares podem vir a excitar esses modos causando impactos importantes na rede. A análise de fenômenos não lineares foge ao escopo do presente trabalho e fica como sugestão para futuras investigações.

Capítulo 5 - Conclusões

As conclusões de cada caso isoladamente já foram mostradas no Capítulo 5, logo nesse capítulo são apresentadas as conclusões obtidas do sistema como um todo, após as simulações de todos os casos propostos e analisados:

- A ressonância de sequência zero obtida na baixa frequência é da mesma ordem de grandeza da ressonância de sequência positiva, sendo um fato importante de se considerar para estudos que levam em consideração de forma detalhada a dinâmica dos transformadores e dos geradores, uma vez que, dependendo da excitação que se tenha e do transformador do sistema, podem ser gerados torques de sequência zero.
- No projeto desenvolvido em [10], foram considerados 3 modelos diferentes de linha de transmissão para o circuito proposto e como resultado o *load flow* não foi alterado com essas mudanças, enquanto que para estudos da ressonância do sistema, conforme mostra o presente trabalho, observou-se a importância da escolha do modelo de linha de transmissão considerado.
- Observou-se que a sustentação obtida da ressonância, o fato dela ficar aproximadamente constante após certo intervalo de tempo, é devido às baixas perdas da linha de transmissão.
- A baixíssima frequência o modelo π se aproxima do modelo J. Marti, porém para frequências da ordem de 5,0 Hz já é necessário a utilização do modelo J. Marti para representar de forma mais realista as linhas de transmissão.

5.1 – Trabalhos Futuros

Como prosseguimentos desse trabalho poderiam ser considerados novas configurações de circuitos, de forma que fosse possível validar essas conclusões para outros casos. Além da realização de um estudo que considere a redução do sistema a uma máquina síncrona ligada a um barramento de potência infinito, considerando para efeito de análise a frequência de ressonância determinada nesse trabalho, 30,3 Hz.

Apêndices

A – Caso 1 – Comparação entre os modelos de linha J. Marti e Π .

A.1- ATP

O programa adotado nesse trabalho foi o ATP, mais especificamente o ATP-draw que é uma interface gráfica do ATP. Dessa forma é possível montar o circuito desde o início e fazer as considerações necessárias.

O programa *ATP* dispõe de uma rotina para o cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão chamada *LCC*, própria para realizar estudos de transitórios ou de regime permanente, como fluxo de potência.

Após a escolha da rotina para a linha de transmissão é possível escolher o modelo a ser utilizado, dentre eles, os utilizados no presente trabalho são:

Π – Utilizado para obter a representação Π -nominal (ou equivalente, para uma linha de transmissão curta, válido para simulações de transitórios) ou de um Π -equivalente (para uma linha de transmissão longa, em regime permanente) [11].

J. Marti – Esta opção pode ser utilizada para se obter um modelo de linha com os parâmetros variando com a frequência, adequado para estudos de transitórios onde o modelo a parâmetros constantes não é adequado.

Os dados de entrada necessários para a simulação são:

Resis – Resistência do condutor associado ao efeito skin. Quando não se inclui o efeito skin, o parâmetro Resis é igual ao valor da resistência CA do condutor em Ω/km . Para incluir o efeito skin, o parâmetro Resis deve ser igual ao valor da resistência CC do condutor e o parâmetro skin é a relação entre a espessura do condutor tubular e D o diâmetro externo do condutor.

Horiz – Distância horizontal entre o centro do condutor (ou do conjunto de condutores geminados) e uma referência especificada pelo usuário e que servirá para todos os condutores, em geral utiliza-se o centro da configuração da linha de modo que as abscissas sejam simétricas.

Vtower – É a altura vertical do centro do condutor (ou do conjunto de cabos geminados), em m ou *foot* (dependendo da opção *metric* ou *english*), medida na torre e a partir do solo.

Vmid - É a altura vertical do centro do condutor ou do conjunto de cabos geminados, medida no meio do vão e a partir do solo.

Rin – Raio interno do condutor.

Rout – Raio externo do condutor.

Os parâmetros da torre, obtidos da geometria da mesma, foram inseridos no ATPdraw e a configuração é mostrada na Tabela A.1.1:

Tabela A.1.1: Dados da configuração da torre:

Fase	Rin [cm]	Rout[cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	0.036957	0.147955	0.061142925312	-4.271	10.771	10.771
1	0.036957	0.147955	0.061142925312	-4.271	11.229	11.229
1	0.036957	0.147955	0.061142925312	-4.729	11.229	11.229
1	0.036957	0.147955	0.061142925312	-4.729	10.771	10.771
2	0.036957	0.147955	0.061142925312	0.229	15.271	15.271
2	0.036957	0.147955	0.061142925312	0.229	15.729	15.729
2	0.036957	0.147955	0.061142925312	-0.229	15.729	15.729
2	0.036957	0.147955	0.061142925312	-0.229	15.271	15.271
3	0.036957	0.147955	0.061142925312	4.271	10.771	10.771
3	0.036957	0.147955	0.061142925312	4.271	11.229	11.229
3	0.036957	0.147955	0.061142925312	4.729	11.229	11.229
3	0.036957	0.147955	0.061142925312	4.729	10.771	10.771
Para-raio	0.0	0.045650	4.190000000000	-3.500	26.000	26.000
Para-raio	0.0	0.045650	4.190000000000	3.500	26.000	26.000

A.2 – Matlab:

Os resultados obtidos no ATP foram exportados para o Matlab de forma a obter a matriz Y_{nodal} , 6x6, devido as 3 entradas e 3 saídas, para isso foi aplicado o seguinte comando:

```
% montagem da matriz Ynodal a partir dos resultados de 'medicao' no ATP
```

```
%fase a
```

```
load -ascii nspi1.dat
```

```
%fase b
```

```
load -ascii nspi2.dat
```

```
%fase c
```

```
load -ascii nspi3.dat
```

```
%fase d
```

```
load -ascii nspi4.dat
```

```
%fase e
```

```
load -ascii nspi5.dat
```

```
%fase f
```

```
load -ascii nspi6.dat
```

```
f1=10.^nspi1;
```

```
nf=length(f1);
```

```
nc=6;
```

```
%primeira coluna
```

```
y11=nspi1(:,2).*exp(1i*nspi1(:,3)/180);
```

```
y12=nspi1(:,4).*exp(1i*nspi1(:,5)/180);
```

```
y13=nspi1(:,6).*exp(1i*nspi1(:,7)/180);
```

```
y14=nspi1(:,8).*exp(1i*nspi1(:,9)/180);
```

```
y15=nspi1(:,10).*exp(1i*nspi1(:,11)/180);
```

```
y16=nspi1(:,12).*exp(1i*nspi1(:,13)/180);
```

```
%segunda coluna
```

```
y22=nspi2(:,2).*exp(1i*nspi2(:,3)/180);
```

```
y23=nspi2(:,4).*exp(1i*nspi2(:,5)/180);
```

```
y24=nspi2(:,6).*exp(1i*nspi2(:,7)/180);
```

```
y25=nspi2(:,8).*exp(1i*nspi2(:,9)/180);
```

```
y26=nspi2(:,10).*exp(1i*nspi2(:,11)/180);
```

```
%terceira coluna
```

```
y33=nspi3(:,2).*exp(1i*nspi3(:,3)/180);
```

```
y34=nspi3(:,4).*exp(1i*nspi3(:,5)/180);
```

```
y35=nspi3(:,6).*exp(1i*nspi3(:,7)/180);
```

```

y36=nspi3(:,8). *exp(1i*nspi3(:,9)/180);

%quarta coluna
y44=nspi4(:,2). *exp(1i*nspi4(:,3)/180);
y45=nspi4(:,4). *exp(1i*nspi4(:,5)/180);
y46=nspi4(:,6). *exp(1i*nspi4(:,7)/180);

%quinta coluna
y55=nspi5(:,2). *exp(1i*nspi5(:,3)/180);
y56=nspi5(:,4). *exp(1i*nspi5(:,5)/180);

%sexta coluna
y66=nspi6(:,2). *exp(1i*nspi6(:,3)/180);

for k=1:nf,
    dumdumpi(:,k)=[y11(k) y12(k) y13(k) y14(k) y15(k) y16(k);...
        y12(k) y22(k) y23(k) y24(k) y25(k) y26(k);...
        y13(k) y23(k) y33(k) y34(k) y35(k) y36(k);...
        y14(k) y24(k) y34(k) y44(k) y45(k) y46(k);...
        y15(k) y25(k) y35(k) y45(k) y55(k) y56(k);...
        y16(k) y26(k) y36(k) y46(k) y56(k) y66(k)];
end

```

Resultando assim na obtenção da matriz Y_{nodal} de fase, como a comparação entre os modelos é feita a partir de parâmetros de sequência, aplicando-se a teoria da transformação de matriz de fase de um sistema trifásico, obtêm-se o seguinte comando no Matlab:

```

f=f1(961:3092);
ynodalpi=dumdumpi(:, :, 961:3092);
nf=length(f);

a=exp(1i*120/180*pi);
z=zeros(3);
A=[1 1 1; 1 a^2 a; 1 a a^2];

Aaum=[A z; z A];

for k=1:nf;
    yseqpi(:,k)=inv(Aaum)*squeeze(ynodalpi(:, :, k))*Aaum;
end

```

```

figure(1)
%considerando somente as admitâncias próprias.
for row=1:nc
    for col=row:nc
        if row~=col
            dum1=squeeze(yseqpi(row,col,:));
            %dum2=squeeze(bigYfit_passive(row,col,:));
            h1=loglog(freq,abs(dum1),'b'); hold on
            %h2=semilogy(s/(2*pi*Ii),abs(dum2),'r--');
            %h3=semilogy(s/(2*pi*Ii),abs(dum2-dum1),'g-');
        end
    end
end

figure(2),

for row=1:nc
    for col=row:nc
        dum1=squeeze(yseqpi(row,col,:));
        %dum2=squeeze(bigYfit_passive(row,col,:));
        h1=loglog(freq,abs(dum1),'b'); hold on
        %h2=semilogy(s/(2*pi*Ii),abs(dum2),'r--');
        %h3=semilogy(s/(2*pi*Ii),abs(dum2-dum1),'g-');
    end
end
hold off
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('Admittance [S]');
legend([h1 ],'Y_{nodal}');

```

B – Caso 2 – Análise da ressonância do sistema Norte-Sul

Nesse item apresentam-se os gráficos resultantes das simulações do Caso 3, no qual se aplicou uma fonte de tensão de 1000 V em cada uma das 6 entradas, emissoras e receptoras, e mediu-se a tensão nas 6 fases.

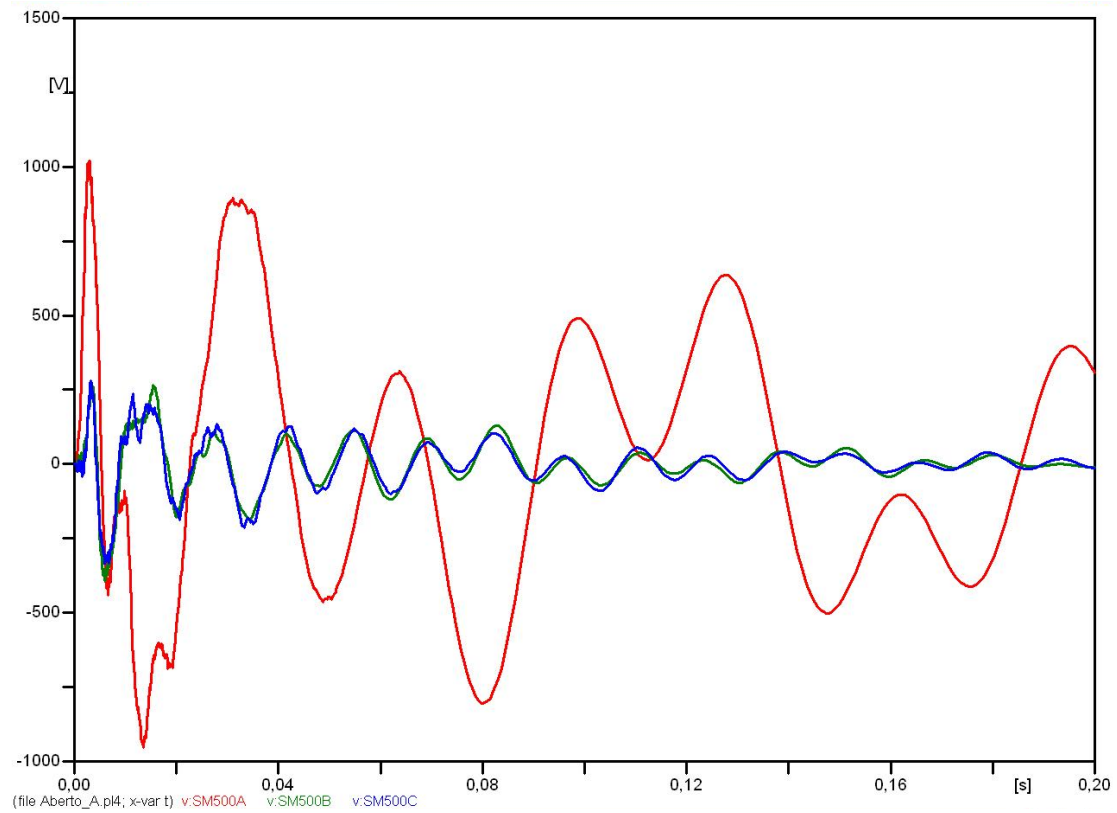


Figura B.1: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase A de Imperatriz.

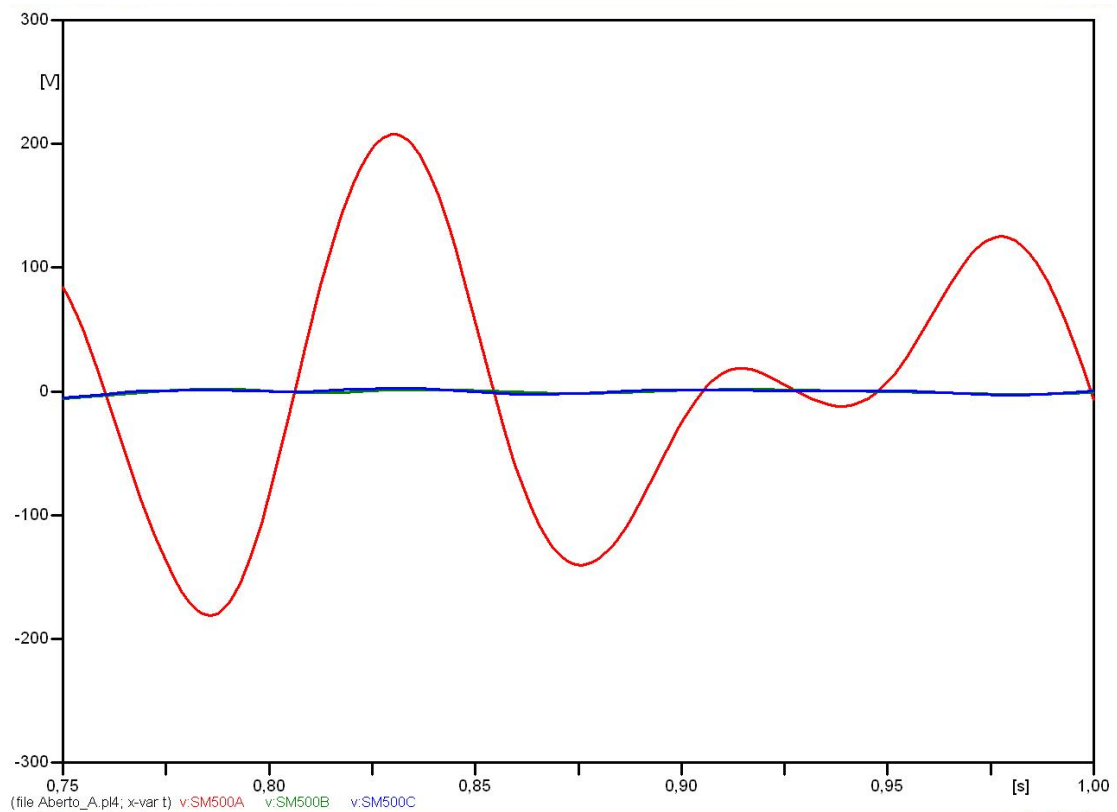


Figura B.2: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase A de Imperatriz.

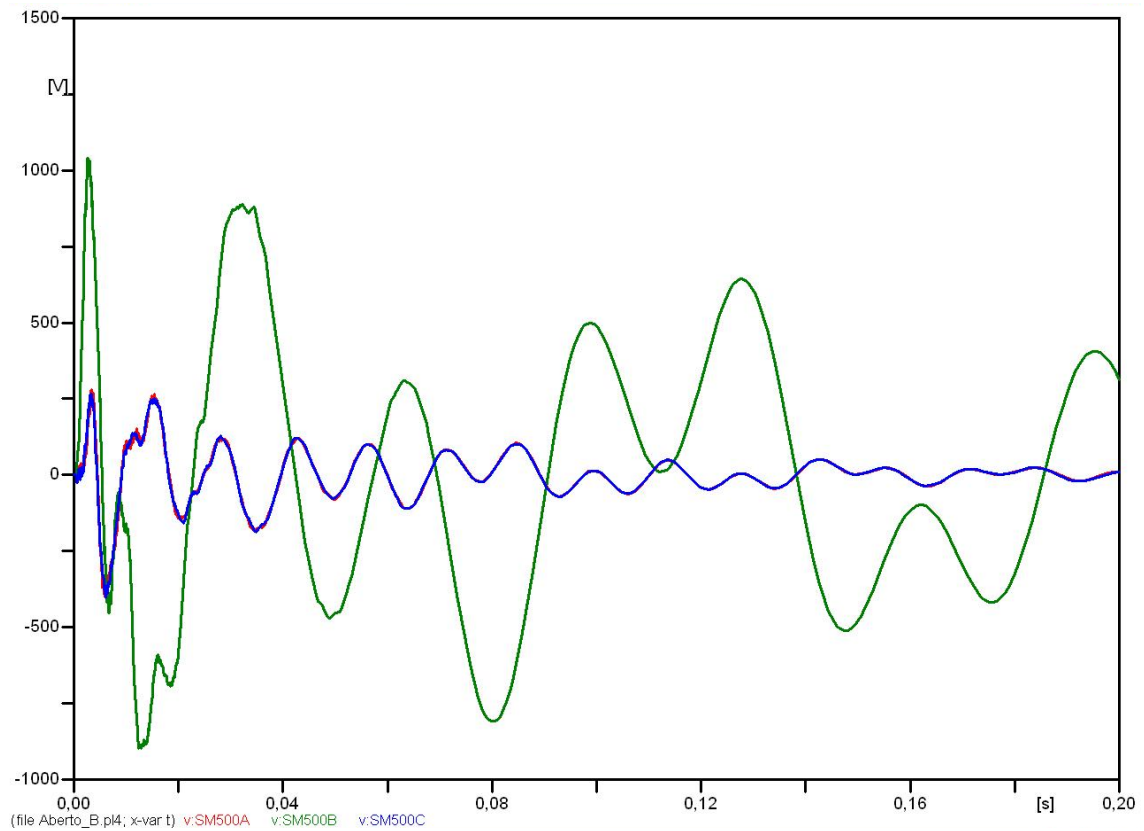


Figura B.3: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase B de Imperatriz.

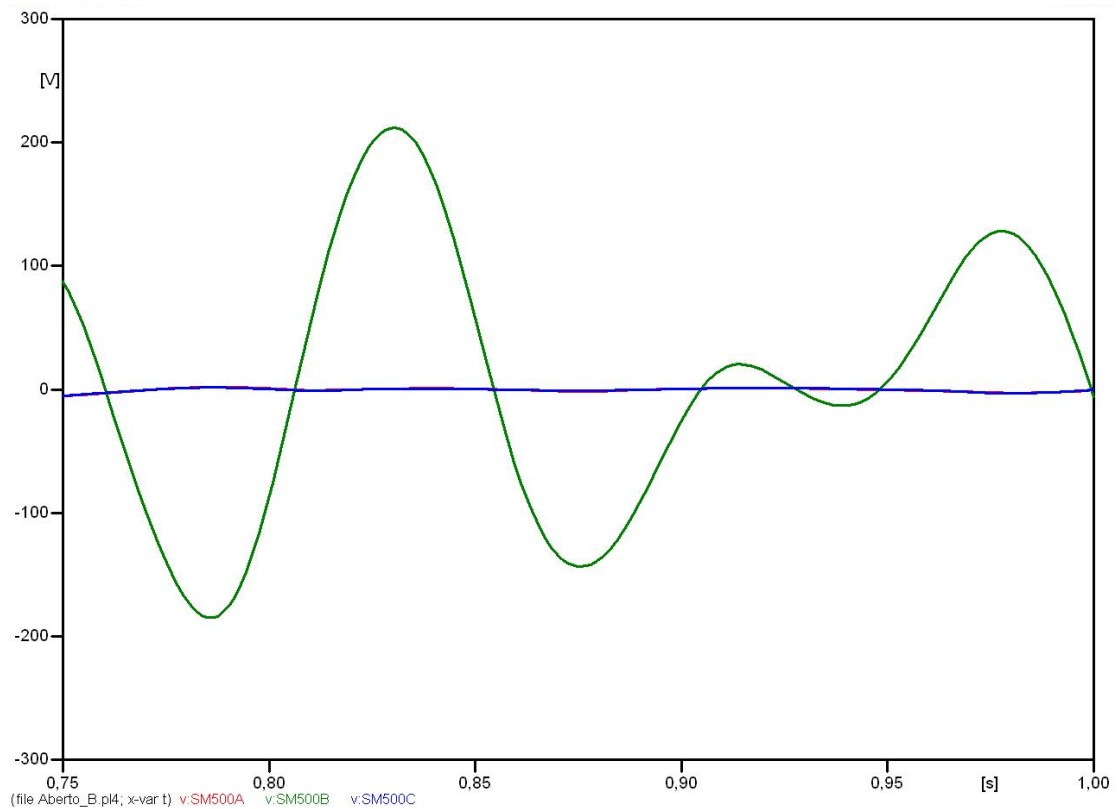


Figura B.4: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase B de Imperatriz.

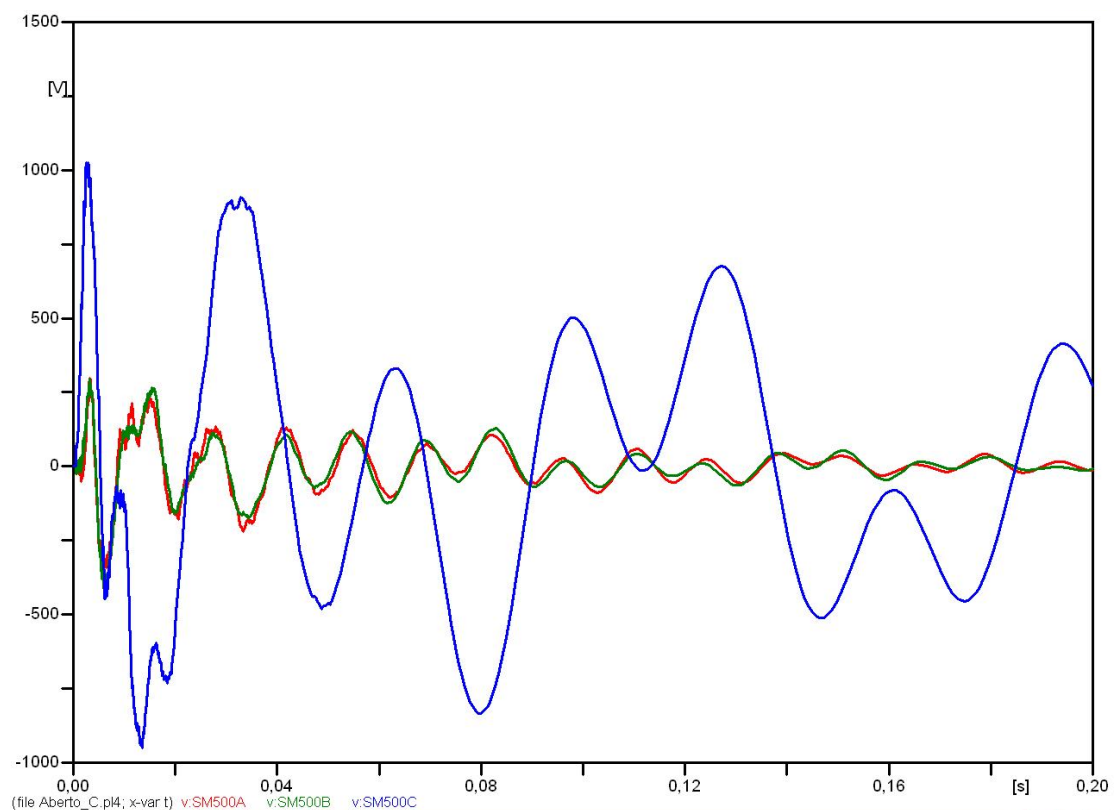


Figura B.5: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase C de Imperatriz.

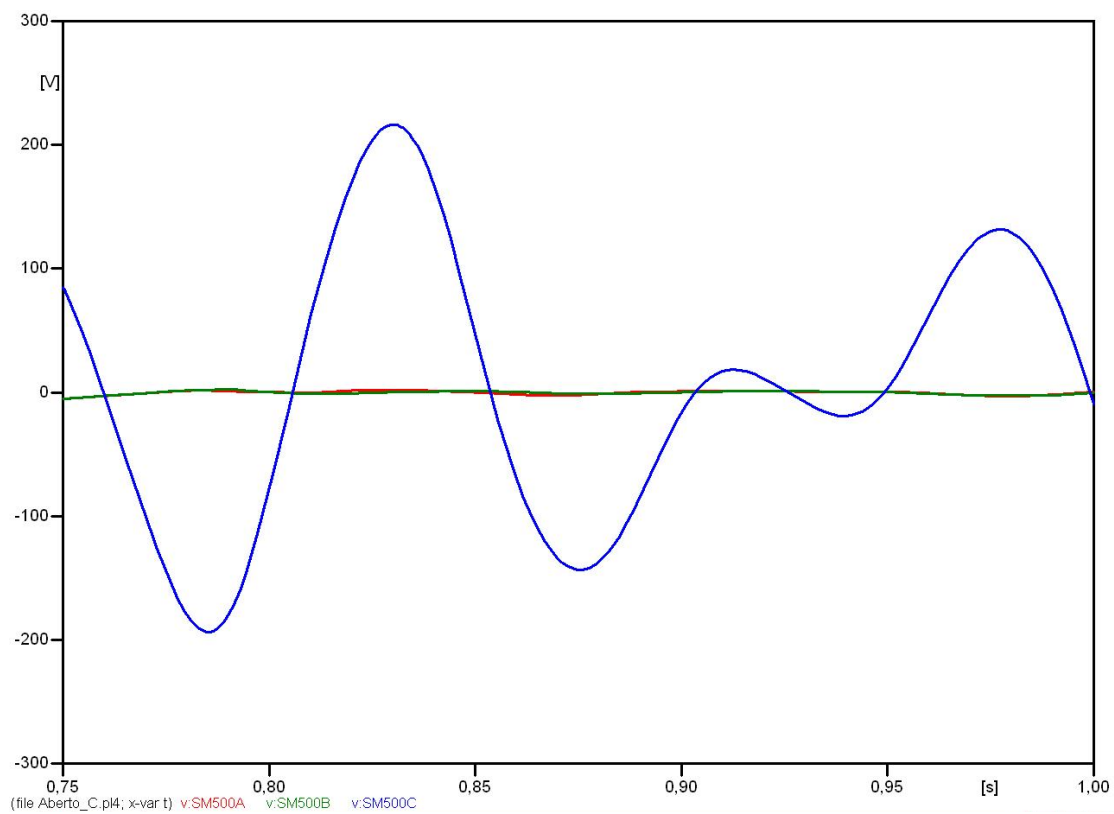


Figura B.6: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase C de Imperatriz.

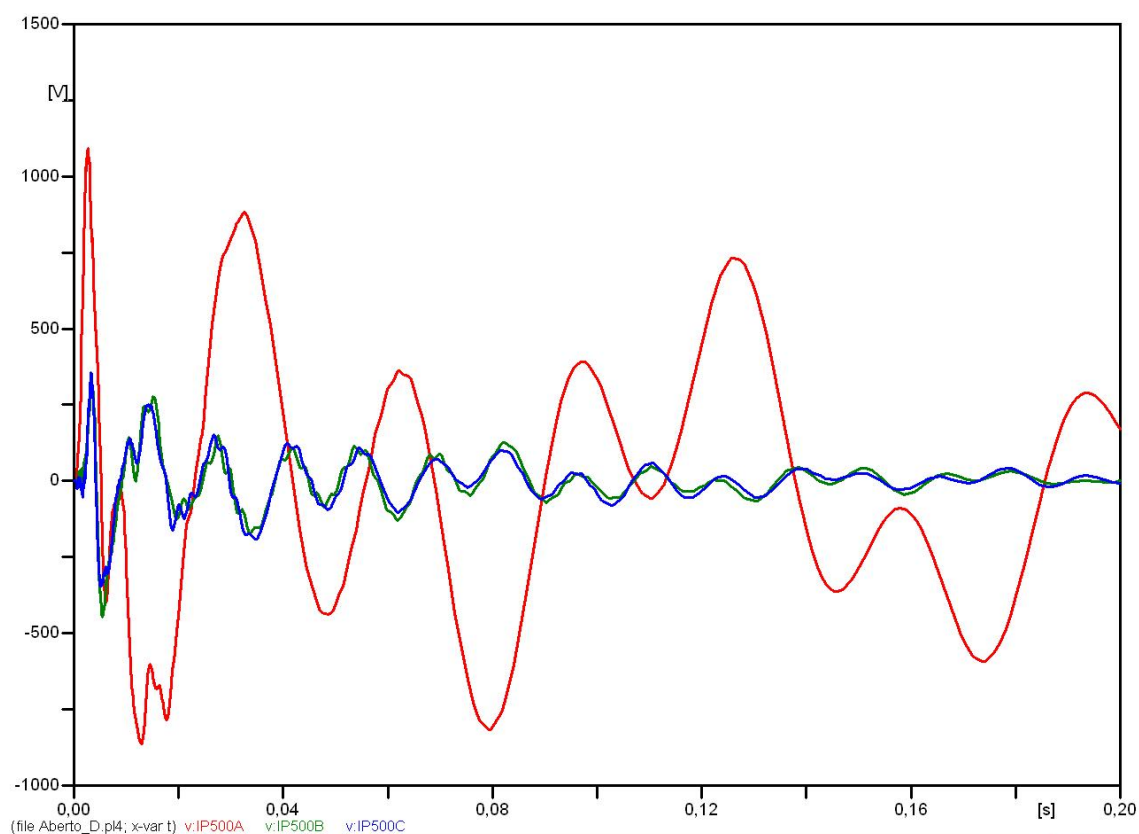


Figura B.7: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase A de Serra da Mesa.

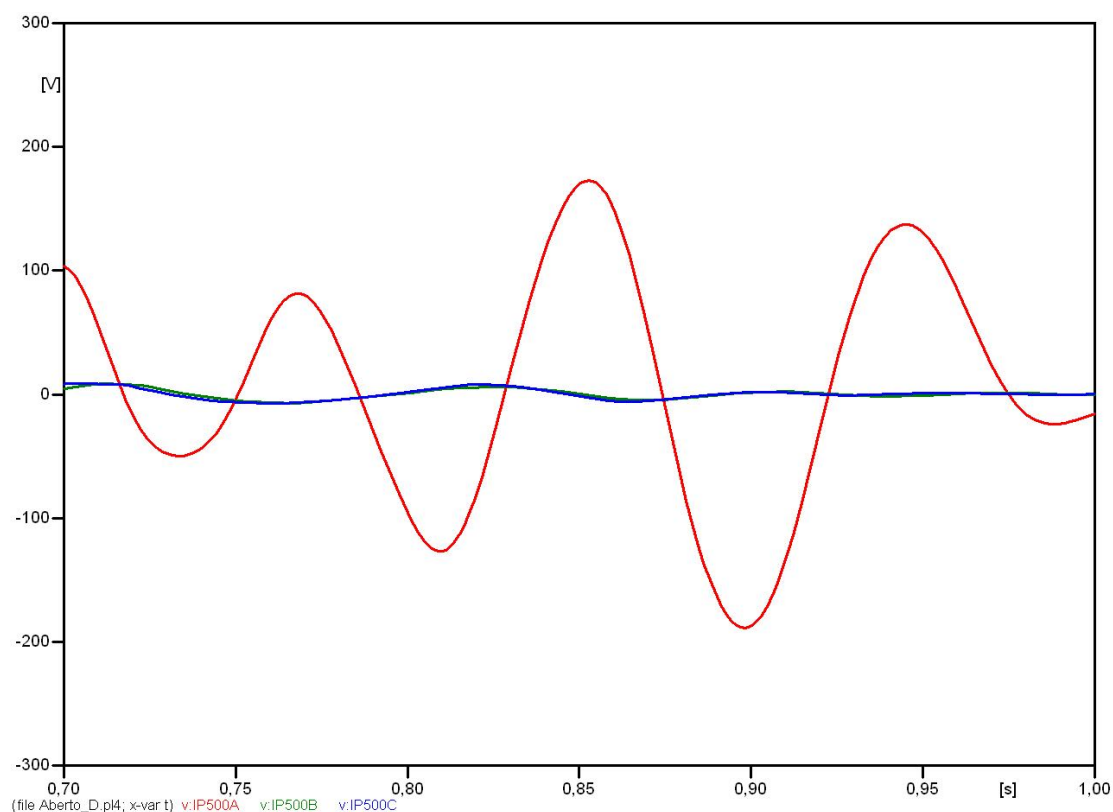


Figura B.8: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase A de Serra da Mesa.

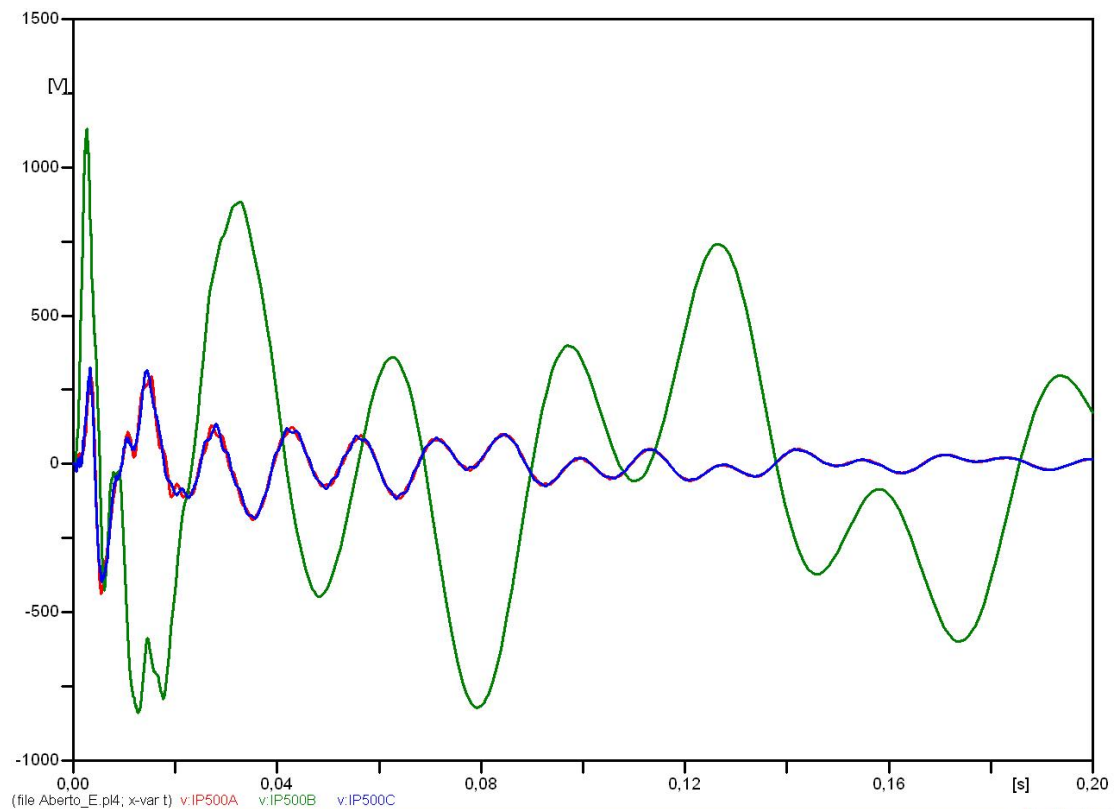


Figura B.9: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase B de Serra da Mesa.

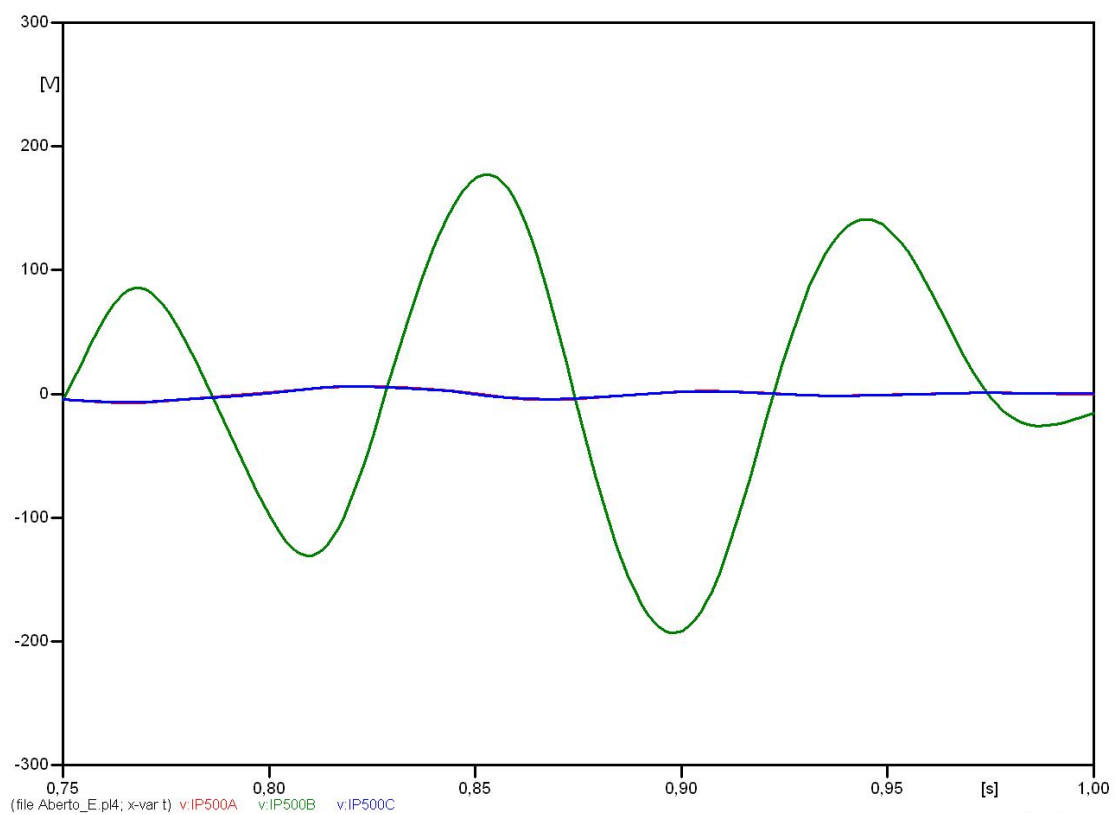


Figura B.10: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase B de Serra da Mesa.

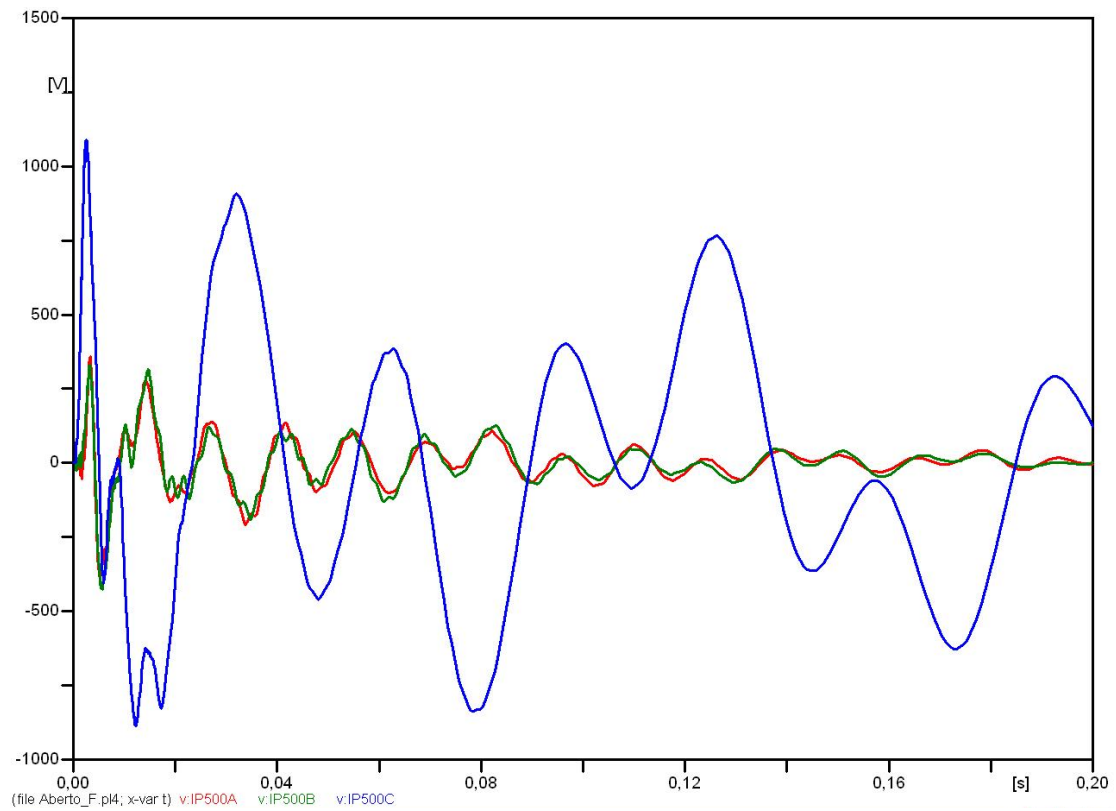


Figura B.11: Instantes iniciais - Degrau de tensão aplicado na fase C de Serra da Mesa.

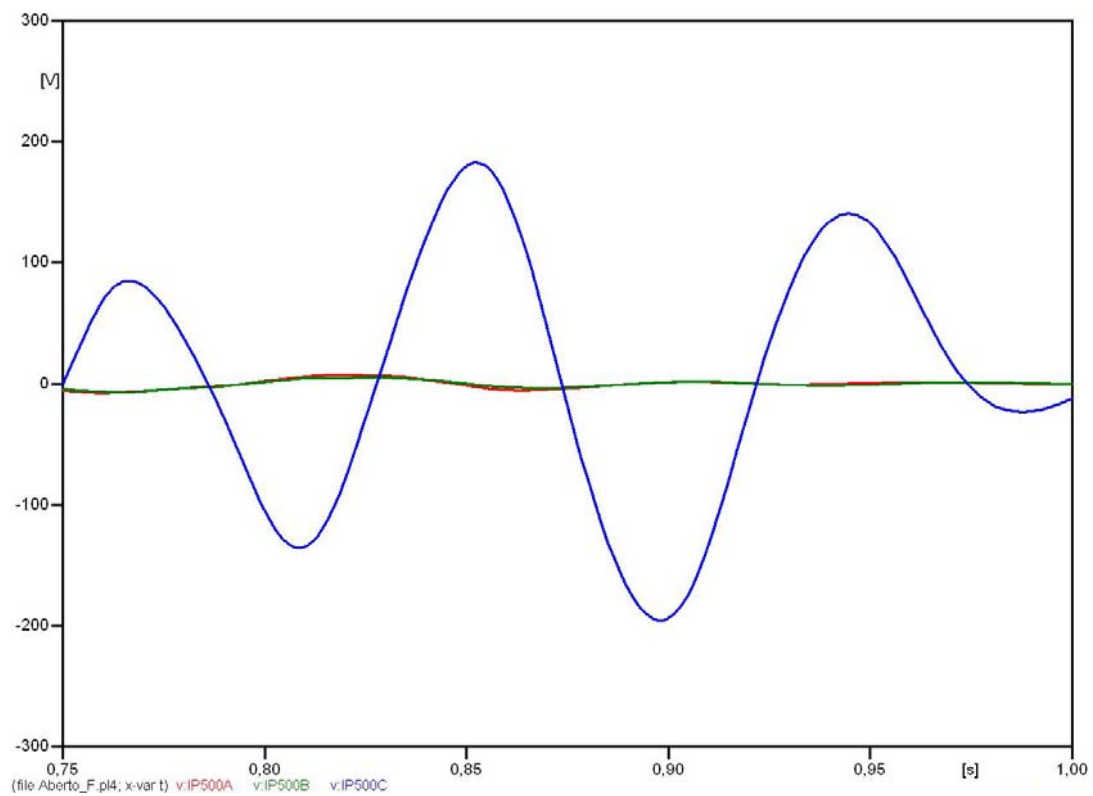


Figura B.12: Instantes finais - Degrau de tensão aplicado na fase C de Serra da Mesa.

Referências Bibliográficas

[1] <http://www.wolfram.com>

[2] [HTTP://www.emtp.org](http://www.emtp.org)

[3] Marti, J. R. – Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations, IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 1, 1982.

[4] GONÇALVES, LUIZ FERNANDO - Contribuição para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

[5] Stevenson Jr., William D. – Elementos de Análise de Sistemas de Potência, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1974.

[6] Gustavsen, Bjern; Semlyen, Adam – Simulation of Transmission Line Transients Using Vector Fitting And Modal Decomposition, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, N° 2, 1998

[7] Zanetta Jr., Luiz C. – Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência, Editora Livraria da Física, 2008

[8] Fernandes, Alécio B.; Lima, Antonio C. S .de; Neves, Washington L. A.; Carneiro Jr., Sandoval – Aplicação de Modelos de Linhas de Transmissão em Estudos sobre Qualidade da Energia Elétrica, VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE), Belém, 2005

[9] Gustavsen, Bjorn – Validation of Frequency-Dependent Transmission Line Models, IEEE Transactions on power Delivery, VOL. 20 – N° 2, 2005

[10] Lemos, João Ricardo F. – Modelagem de Linhas de Transmissão para Estudos de Transitórios Eletromecânicos, Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2008.

[11] Pereira Filho, Clever S.; Almeida, Fuad de S.; Conti, Alberto R. de - Análise de Redes Elétricas no Domínio do Tempo Cálculo de Parâmetros de Linhas – LCC, Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG-CESEP)