

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
SUJEITO A OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS E RESSONÂNCIA
SUBSÍNCRONA.**

**TEMÍSTOCLES LISANDRO SENA LOIOLA
VINÍCIUS DE ARAÚJO CRUZ**

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.**

APROVADA POR:

**Prof. Francisco Damasceno Freitas, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)**

Prof. Luís Filomeno de Jesus Fernandes, Mestre (ENE-UnB) (Examinador)

**Albertoni Márcio Pereira Pimentel Penha, Mestre (ENE-UnB)
(Examinador)**

BRASÍLIA, 09 DE JULHO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

LOIOLA, TEMÍSTOCLES LISANDRO SENA & CRUZ, VINÍCIUS DE ARAÚJO Características de sistemas elétricos de potência sujeito a oscilações eletromecânicas e ressonância subsíncrona. [Distrito Federal] 2007. x,50p., (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2007). Monografia de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.	
1. Oscilações eletromecânicas	2. Análise Modal
3. Ressonância Subsíncrona	4. Sistemas Multimáquinas
I. ENE/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOIOLA, T. L. S. & CRUZ, V. A. (2007). Características de sistemas elétricos de potência sujeito a oscilações eletromecânicas e ressonância subsíncrona. Monografia de Graduação, Publicação ENE 01/2007, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Temístocles Lisandro Sena Loiola e Vinícius de Araújo Cruz.

TÍTULO: Características de sistemas elétricos de potência sujeito a oscilações eletromecânicas e ressonância subsíncrona.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Temístocles Lisandro Sena Loiola
Chácara 31, lote 15, Vicente Pires.
72110-800 Taguatinga – DF – Brasil.

Vinícius de Araújo Cruz
Condomínio Vivendas Friburgo, módulo K, casa 27
73105-901 Sobradinho – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais e a meus irmãos por me amarem com todas as minhas imperfeições independentemente de sucessos ou fracassos.

Agradeço a família Bessa de Meneses em especial a Alline pelo carinho, companheirismo e incentivo nos momentos difíceis da graduação.

Ao amigo Vinícius, pelo comprometimento e dedicação com nosso trabalho.

Aos amigos da BrT pelo aprendizado, pela amizade e compreensão.

Agradeço a Deus por ter colocado em minha vida pessoas maravilhosas.

Temístocles Lisandro Sena Loiola (Carroça)

A meus pais, especialmente minha mãe que esteve presente em todos momentos de minha vida.

A minha irmã, pelo incentivo e apoio durante o curso,

Ao meu amigo, Temístocles, pelo esforço e determinação com que se dedicou nesse projeto.

Vinícius de Araújo Cruz

Agradecemos ao professor Damasceno pela paciência e dedicação exemplar.

Ao professor Luis Filomeno pelos conhecimentos científicos transmitidos diariamente e pelas lições de vida.

Agradecemos aos amigos da elétrica que trilharam o mesmo caminho e encontraram os mesmos espinhos.

A UnB. Impossível esquecer as emoções vividas aqui.

Temístocles e Vinícius

SUMÁRIO

SISTEMAS DINÂMICOS.....	IX
RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA.....	XIII
SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA.....	XVIII
SISTEMA MULTIMÁQUINAS.....	XXV
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	LVII
[4] TAVARES, CARLOS ANDRÉ ANDRADE.RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA E OUTRAS FORMAS DE INSTABILIDADE ELETROMECAÂNICA . RIO DE JANEIRO, 2005.....	LVII

LISTA DE FIGURAS

Sistemas elétricos de potência sujeito a oscilações eletromecânicas e ressonância subsíncrona

Δx	vetor de estado de dimensão $n \times 1$
Δy	vetor de saída de dimensão $m \times 1$
Δu	vetor de entrada de dimensão $r \times 1$
A	matriz de estado de dimensão $n \times n$
B	matriz de entrada de dimensão $n \times r$
C	matriz de saída de dimensão $m \times n$
D	matriz de retroalimentação de dimensão $m \times r$
X_d	reatância síncrona de eixo direto
X_d'	reatância transitória de eixo direto
X_d''	reatância subtransitória de eixo direto
X_q	reatância síncrona de eixo de quadratura
X_q'	reatância transitória de eixo de quadratura
X_q''	reatância subtransitória de eixo de quadratura
T_{do}'	constante de tempo transitória de eixo direto do enrolamento de armadura a circuito aberto
T_{do}''	constante de tempo subtransitória de eixo direto do enrolamento de armadura a circuito aberto
T_{qo}'	constante de tempo transitória de eixo em quadratura do enrolamento de armadura a circuito aberto
T_{qo}''	constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura do enrolamento de armadura a circuito aberto
r	resistência na linha de transmissão
HP	turbina de alta pressão
IP	turbina de pressão intermediária

LPA	turbina de pressão baixa “A”
LPB	turbina de pressão baixa “B”
GEN	gerador
EXC	excitatriz
H	constante de inércia de uma massa mecânica
D	fator de amortecimento da massa mecânica
K	constante de elasticidade do eixo que conectam as massas mecânicas

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia provocado pelo desenvolvimento industrial e econômico provocou uma necessidade cada vez maior de se transmitir grande quantidade de energia para diferentes localidades. Para se atender a diversas áreas, são necessárias inúmeras interligações entre os geradores de energia. Muitas vezes esses geradores se encontram bastante afastados e precisam de compensadores que aumentem a capacidade de transmissão das linhas. As várias interligações em linhas compensadas originam fenômenos oscilatórios. Em determinadas frequências, essas oscilações podem ser fracamente amortecidas ou até terem amplitude crescente levando o sistema à instabilidade.

A instabilidade do sistema pode ser evitada com o uso de alguns estabilizadores instalados em equipamentos do sistema. Caso a instabilidade não seja logo eliminada, os seus efeitos podem gerar sérios danos ao sistema, podendo levar a um processo de desligamento em cascata. Chega-se assim a conclusão que um amortecimento significativo se faz necessário para a operação segura do sistema.

Todo sistema elétrico de potência está sujeito a sofrer perturbações como faltas, partidas de motores de grande porte, saída de linhas de transmissão. Neste trabalho algumas simulações foram feitas e analisadas para o sistema elétrico brasileiro. As respostas dessas simulações mostram algumas características do sistema. Também é exemplificado um caso de ressonância subsíncrona.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 traz a introdução ao assunto e informações gerais sobre o tema.

No capítulo 2 descreve-se a metodologia e a teoria utilizada para o entendimento das técnicas utilizadas no PacDyn para análise das simulações realizadas nos capítulos subsequentes. São abordados conceitos de autovalores, autovetores, mode shapes e fatores de participação.

O capítulo 3 traz a teoria de ressonância subsíncrona, explicando os conceitos físicos relacionados à transmissão de potência em linhas que motivam a inserção de diferentes dispositivos capacitivos nas mesmas e a consequência de tais inserções nas interações mecânicas com o conjunto turbina-gerador.

No capítulo 4 são mostradas as simulações no domínio do tempo e da frequência das respostas do sistema a uma entrada em degrau de amplitude 0,01pu e são analisadas as características das usinas de Itaipu, Xingó e Jacuí para diversas variáveis de estado como saída.

No capítulo 5 apresenta-se um estudo dos modos eletromecânicos para sistemas multimáquinas. Nesse estudo é mostrada a participação dos autovalores que mais contribuem na formação das curvas no tempo e na frequência que caracterizam a interação entre as usinas de Tucuruí e Paulo Afonso.

O capítulo 6 traz, para melhor compreensão do fenômeno da ressonância subsíncrona, um exemplo onde é analisada a interação entre os modos subsíncrono e torcional. Posteriormente o mesmo sistema foi testado com valores diferentes de reatância capacitiva e observada as características dos autovalores resultantes. Em seguida é analisado o impacto da retirada do regulador de tensão e verificada a sua influência na estabilidade do sistema.

Capítulo 2

SISTEMAS DINÂMICOS

2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo aborda os conceitos de autovalor, autovetor, mode shape e fator de participação. Os três últimos são aplicados no capítulo de sistemas multimáquinas para a determinação dos modos (autovalores complexo-conjugados) de maior significância para composição da curva do modelo de ordem reduzida que aproxima a curva do sistema completo. O conceito de autovalor é utilizado em todo o projeto, uma vez que cada autovalor representa um do estado do sistema e fornece dados como o amortecimento, tempo de acomodação e frequência de oscilação de um modo.

2.2 AUTOVALORES

O sistema da figura 2.1 mostra a representação de um sistema linear com entrada Δu e a saída Δy :

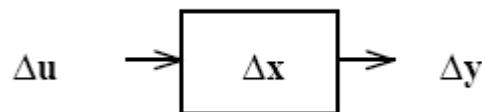


Figura 2.1 – Sistema com perturbação na entrada Δu

A descrição do sistema na forma de variáveis de estado é:

$$\dot{\Delta x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (2.1)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (2.2)$$

onde:

Δx vetor de estado de dimensão $n \times 1$

Δy	vetor de saída de dimensão $m \times 1$
Δu	vetor de entrada de dimensão $r \times 1$
A	matriz de estado de dimensão $n \times n$
B	matriz de entrada de dimensão $n \times r$
C	matriz de saída de dimensão $m \times n$
D	matriz de retroalimentação de dimensão $m \times r$

Considerando que o sistema funciona em torno de um ponto de operação em regime permanente ($x(0)$) e para o caso de aplicação de pequeno desvio ($x(0) + \Delta x$), em Δx representam os desvios da condição inicial. Aplicando a Transformada de Laplace às equações (2.1) e (2.2), as equações de estados são convertidas para o domínio da frequência [1]:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (2.3)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (2.4)$$

Rearranjando a equação (2.3)

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s) \quad (2.5)$$

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (2.6)$$

$$\Delta x(s) = \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (2.7)$$

o mesmo será feito para a equação (2.4)

$$y(s) = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} + Du(s) \quad (2.8)$$

Os pólos do sistema dinâmico são as raízes da equação:

$$\det(sI - A) = 0 \quad (2.9)$$

Os valores de s que satisfazem a equação (2.9) são conhecidas por autovalores, λ , da matriz A , e a equação (2.9) é a equação característica da matriz A .

O número de autovalores é sempre o mesmo que a dimensão da matriz A . Alguns deles podem ser múltiplos. Os autovalores podem ser complexos, tornando assim útil identificá-los no plano complexo.

2.3 AUTOVETORES

Para cada autovalor existem dois autovetores, o da direita e o da esquerda [2].

Para qualquer autovalor λ_i , o vetor coluna de dimensão n , Φ_i , que satisfaz a equação (2.10) é chamado de autovetor de \mathbf{A} .

$$\mathbf{A}\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad (2.10)$$

O autovetor a direita determina a distribuição de modo i entre os componentes de autovetor (o mode shape).

Para qualquer autovalor λ_i , o vetor coluna de dimensão n , Ψ_i , que satisfaz a equação (2.11) é chamado de autovetor a esquerda \mathbf{A} .

$$\Psi_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \Psi_i^T \quad (2.11)$$

Os autovetores podem ser normalizados de forma que o produto deles será:

$$\Psi_i^T \Phi_i = 1 \quad (2.12)$$

Perceba que o produto dos autovetores a direita e a esquerda que pertencem a diferente autovalores é 0:

$$\Psi_i^T \Phi_j = 0, \text{ para } i \neq j \quad (2.13)$$

O autovetor à direita de um modo de oscilação é chamado de mode shape. O mode shape é um bom indicador da atividade relativa do estado no modo. O autovetor a esquerda determina a amplitude de uma oscilação [2].

2.4 MODE SHAPE E FATOR DE PARTICIPAÇÃO

O mode shape descreve o grau de atividade de uma variável x_k no i -ésimo modo que é dado pelo elemento Φ_{ki} do autovalor a direita de Φ_i [1].

Por ser um autovetor, o mode shape possui uma magnitude e um ângulo. A magnitude dos elementos de Φ_i fornece a extensão das atividades dos n estados no i -ésimo modo e os ângulos dos elementos fornece a diferença das fases das variáveis de estado com relação ao modo [1].

O fator de participação fornece uma noção da sensibilidade do modo. Ele dá uma boa indicação da importância do estado no modo. Um fator de participação associado a um gerador particular demonstra que esse gerador contribui para a oscilação do sistema [3].

O fator de participação representaria uma medida entre os modos e as variáveis de estado n . Seja a matriz de participação P dada por

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_n] \quad (2.14)$$

$$p_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ p_{3i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{1i} \\ \phi_{2i} \psi_{2i} \\ \phi_{3i} \psi_{i3} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

A matriz P tem a dimensão $n \times n$ e cada um de seus elementos p_{ki} representa um fator de participação associado a um modo. O autovetor a direita Φ_{ki} mede a atividade da variável de estado x_k no i -ésimo modo; o autovetor a esquerda Ψ_{ik} o peso dessa contribuição da atividade para o modo. Então, o fator de participação $p_{ki} = \Phi_{ki} \Psi_{ik}$ mede a participação relativa do k -ésima variável de estado no i -ésimo modo [1]

O fator de participação pode ser usado para determinar onde um sistema requer um estabilizador de sistemas de potência para amortecer a sua oscilação. Se o fator de participação para muitos geradores é significativo em uma determinada área, então um estabilizador de sistemas de potência colocado nessa área deve amortecer a oscilação do sistema.

Capítulo 3

RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA

3.1 INTRODUÇÃO

A Ressonância Subsíncrona (RSS) é uma condição elétrica do sistema de potência onde a rede elétrica troca significativa energia com o conjunto turbina-gerador em uma ou mais frequências naturais do sistema combinado, abaixo da frequência síncrona, e subsequente a um distúrbio, tendo como condição inicial o equilíbrio [4].

O fenômeno da ressonância subsíncrona ocorre basicamente em sistemas de transmissão compensados por capacitores em série. O primeiro caso de efeito danoso da ressonância subsíncrona ocorreu nos Estados Unidos em 1970, na Califórnia. Desde então, esse tema tem sido bastante estudado [5].

Em sistemas de energia elétrica, um fator que tem efeito preponderante na capacidade de transmissão de potência elétrica é a reatância indutiva, uma vez que esta aumenta gradativamente com o comprimento de uma linha de transmissão e passa a exercer influência na estabilidade de transmissão. O aumento da tensão do sistema, a inserção de dispositivos (compensador síncrono, compensador estático, banco de capacitores shunt) e compensação série em linhas de transmissão são métodos que visam a melhorar a estabilidade, regulação de tensão na linha e aumentar a capacidade de transferência de potência [4].

O principal destes métodos é a compensação série, que utiliza capacitores em série de forma a diminuir a reatância indutiva total na linha e aumentar o fluxo de potência ativa transmitida pela mesma.

Apesar dos aspectos positivos da compensação série, o complemento das frequências eletromecânicas do rotor do conjunto turbina-gerador-excitatriz podem se aproximar das frequências elétricas na rede (resultantes de interações entre a reatância indutivas e a capacitância da compensação série), podendo ocasionar o fenômeno da ressonância subsíncrona. [4].

Em sistemas de transmissão não-compensados, faltas e outros distúrbios geram componentes de corrente contínua nos enrolamentos do estator [1]. Essas correntes, devido à distribuição espacial dos enrolamentos em armadura dos enrolamentos do estator provocam uma componente de torque no entreferro na frequência nominal de 60Hz. Em caso de faltas desbalanceadas, as componentes da sequência de fase negativa da corrente do estator provocam torque na frequência de 120Hz.

Em sistemas de transmissão compensados por capacitores em série o problema é diferente. Considere o sistema mostrado na figura 3.1. Nesse caso em vez de uma componente dc da corrente de falta, a corrente transitória de *offset* é também corrente alternada de frequência igual à frequência natural ω_n da indutância e capacitância do circuito onde f_0 é a frequência síncrona em Hz e $\omega_0 = 2\pi f_0$ rad/s.

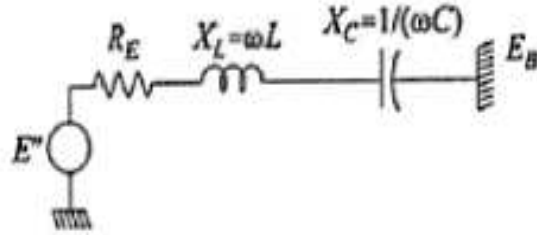


Figura 3.1 Circuito equivalente do gerador ligado a uma linha de transmissão. [1]

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \frac{1}{\sqrt{(\omega_0 L)(\omega_0 C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \text{ rad/s} \quad (5.1)$$

$$f_n = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \text{ Hz} \quad (5.2)$$

A componente da corrente de frequência f_n no estator do gerador induz corrente no rotor e portanto induz torque, corrente aquela de frequência de escorregamento $(60-f_n)$ Hz. A tabela abaixo mostra a frequência natural e a frequência de escorregamento como funções do grau de compensação.

Tabela 3.1 – Frequência natural e de escorregamento em função do grau de compensação

$\frac{X_c}{X_l} \times 100$ (%)	Frequência Natural f_n (Hz)	Frequência escorregamento $60 - f_n$ (Hz)
10	18	42
25	30	30
30	32,6	27,4
40	38	22
50	42,4	17,6

A frequência natural subsíncrona f_n da rede e a frequência das correntes induzidas no rotor são complementares se a soma delas resultar na frequência síncrona. Uma rede de transmissão compensada por capacitores em série pode causar diferentes oscilações dependendo dos mecanismos de auto-excitação devido ao efeito de indução do gerador e interações com oscilações torcionais.

3.1.1 Efeito de indução do gerador

A auto-excitação é uma instabilidade elétrica associada à elevação espontânea dos enlaces de fluxo no gerador síncrono. Isso ocorre mais facilmente em sistemas com longas linhas de transmissão conectadas radialmente às usinas geradoras, ou quando é utilizada a compensação série em sistemas com resistência elétrica muito baixa. Uma forma de evitar essas oscilações é adicionando-se resistores paralelamente aos capacitores em série.

O efeito de indução do gerador é um tipo de auto-excitação que envolve exclusivamente o sistema elétrico. Este efeito faz com que a resistência elétrica do rotor vista dos terminais do estator seja negativa, devido ao campo magnético do rotor girar mais rápido que o campo da armadura de um dos geradores do sistema. Desta forma se a resistência de armadura de um dos geradores somada à resistência da rede vista dos terminais desse gerador não for maior que a resistência negativa do rotor (vista pelo estator) na frequência de ressonância a potência assíncrona desenvolvida não terá meio para dissipar e então haverá uma ampliação crescente da oscilação subsíncrona [4].

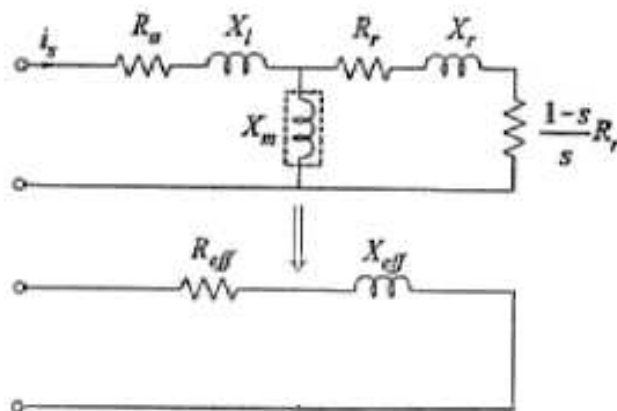


Figura 3.2 Circuito equivalente simplificado de uma máquina síncrona aplicável a análise de ressonância subsíncrona. [1]

A figura 3.2 é um modelo equivalente do circuito de uma máquina síncrona bastante útil para a explicação do efeito subsíncrono. O efeito das saliências foi desprezado e a máquina foi representada por um circuito similar àqueles usados para motores de indução. Os efeitos dos circuitos do rotor foram representados por um circuito simples de resistência R_r e reatância X_r . Somente o efeito da frequência subsíncrona está sendo considerado.

Sendo $f_n < f_0$, o escorregamento s é negativo e o rotor se comporta como uma máquina de indução operando com velocidade acima da síncrona. Dependendo do f_n , a resistência efetiva R_{eff} pode ser negativa. Em altos graus de compensação essa resistência negativa pode exceder a resistência da rede resultando em um circuito RLC com resistência negativa. Essa condição resultará em uma auto-excitação causando oscilações em níveis elevados. A tendência dessa instabilidade elétrica subsíncrona é diminuir através do aumento da resistência da rede e da diminuição da resistência dos circuitos do rotor do gerador [1].

Essa forma de auto-excitação é um fenômeno elétrico, nada tem a ver com as características torcionais do eixo.

3.1.2 Interações Torcionais

A interação entre os fluxos magnéticos no rotor e estator é oscilatória e resulta num torque eletromagnético que apresenta frequência complementar (frequência síncrona menos a frequência natural). Uma pequena tensão induzida pelas oscilações do rotor pode provocar uma

grande corrente subsíncrona quando o complemento da frequência natural da rede for próxima da frequência torcional do conjunto de eixos da turbina geradora. Essa corrente produzirá uma componente oscilatória no torque do rotor cuja fase aumenta a oscilação. Quando esse torque é maior que aquele provocado pelo amortecimento mecânico, as massas mecânicas sofrerão severos desvios de velocidade e de ângulo e o conjunto eletromecânico oscila de forma crescente. As consequências da ressonância subsíncronas são catastróficas. Se a oscilação torcional aumentar muito, o eixo da turbina se quebra [1].

3.1.3 Métodos

3.1.3.1 Análise de autovalores

Esse método consiste na determinação e avaliação dos autovalores das equações linearizadas da rede elétrica e do conjunto eletromecânico quando representados em forma de equações na forma de variáveis de estados. Os autovalores são números complexos cuja parte real e imaginária representam o fator de amortecimento e a frequência natural de um dos modos de oscilação do sistema respectivamente. Da teoria de controle [6], basta que uma das partes reais dos autovalores seja positiva para que o sistema seja considerado instável naquele ponto de operação. Aqueles com parte real negativa são amortecidos.

3.1.3.2 Análise no domínio da frequência

Análise no domínio da frequência este método aplica a técnica de Nyquist. Com base numa função de transferência do sistema de potência, é elaborada a resposta em frequência da rede elétrica em conjunto a uma representação dos geradores e seus respectivos eixos mecânicos. A aplicação deste método é uma ferramenta importante para a avaliação do fenômeno de ressonância.

Capítulo 4

SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

As simulações são feitas para três usinas: Itaipu, Jacuí e Xingó. Para resposta no tempo, é utilizado na entrada um distúrbio tipo degrau de amplitude 0,01 pu introduzido na referência do regulador de tensão das máquinas dessas usinas e são analisadas como saídas a tensão na barra, a potência nos terminais de uma máquina síncrona, a velocidade síncrona e o ângulo do rotor. É também simulada a resposta em frequência tendo a potência mecânica como entrada do sistema, sendo observada para esse distúrbio o comportamento da velocidade síncrona na saída.

Os gráficos comparativos para a resposta no domínio do tempo entre as três usinas mostram os resultados com curvas em vermelho para Itaipu, azul para Jacuí e rosa para Xingó.

4.1 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA A POTÊNCIA ATIVA NOS TERMINAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA

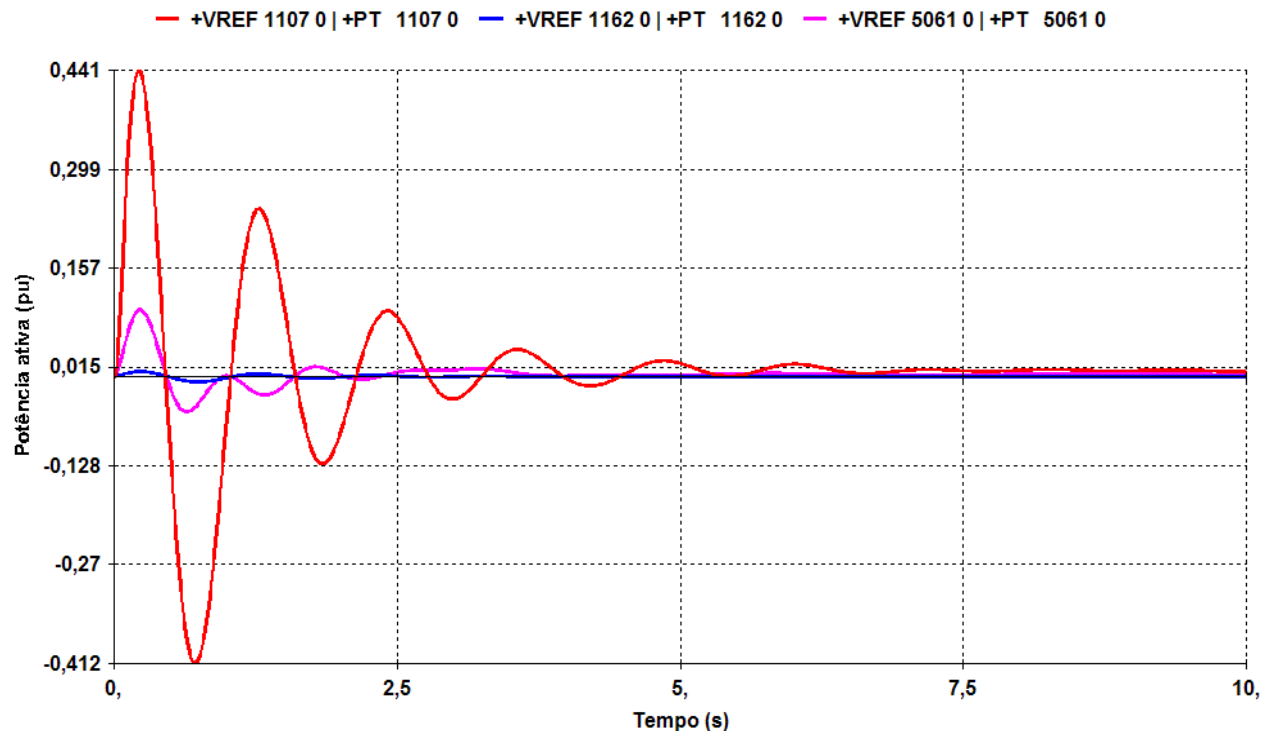


Figura 4.1 – Resposta no tempo da potência ativa de Itaipu, Jacuí e Xingó

Através da comparação entre os gráficos percebe-se características parecidas para a resposta no tempo das três usinas como tempo de acomodação das curvas e a pequena sensibilidade à variação da potência ativa em relação a um pequeno sinal no regulador de tensão.

4.2 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA TENSÃO NA BARRA

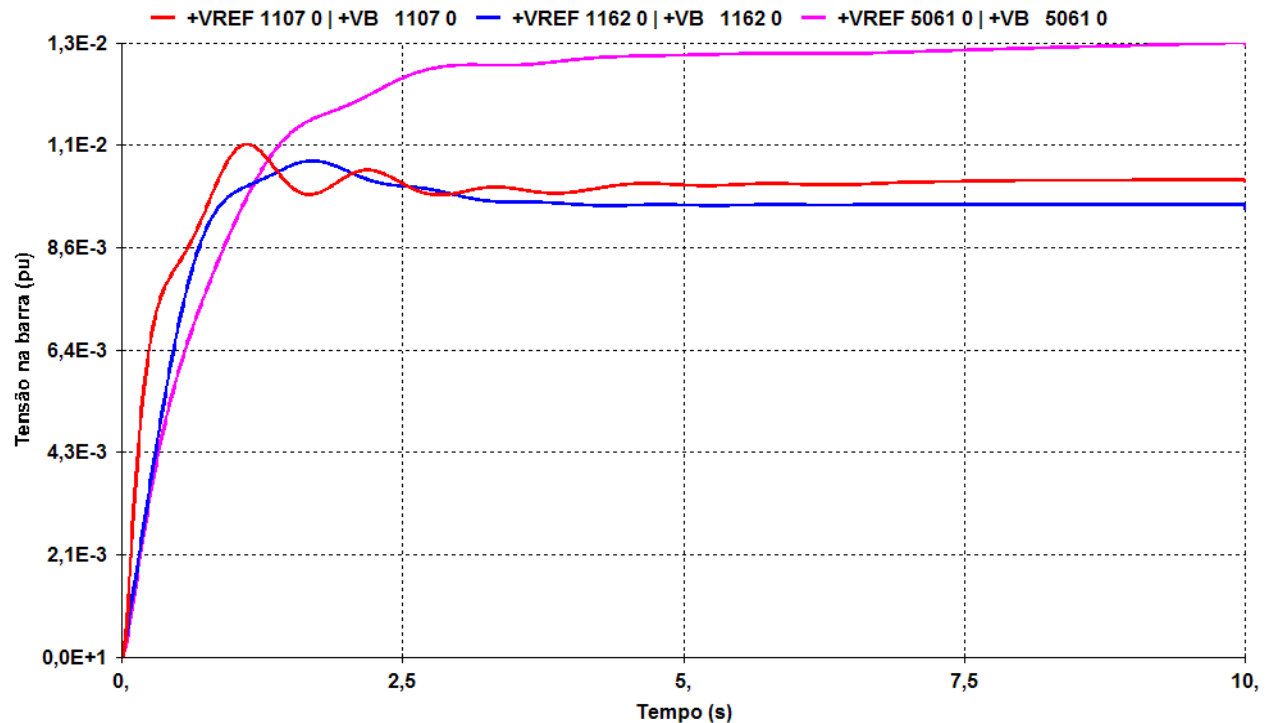


Figura 4.2 – Resposta no tempo da tensão na barra de Itaipu, Jacuí e Xingó

As curvas de resposta no tempo apresentam acomodação em torno de cinco segundos. A perturbação sofrida influencia de maneira semelhante as saídas em estado estacionário das usinas de Itaipu e Jacuí, uma vez que a tensão na barra das mesmas têm valores aproximados. Xingó apresenta maior sensibilidade à variação da tensão na barra para uma perturbação no regulador de tensão.

4.3 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA O ÂNGULO DO ROTOR

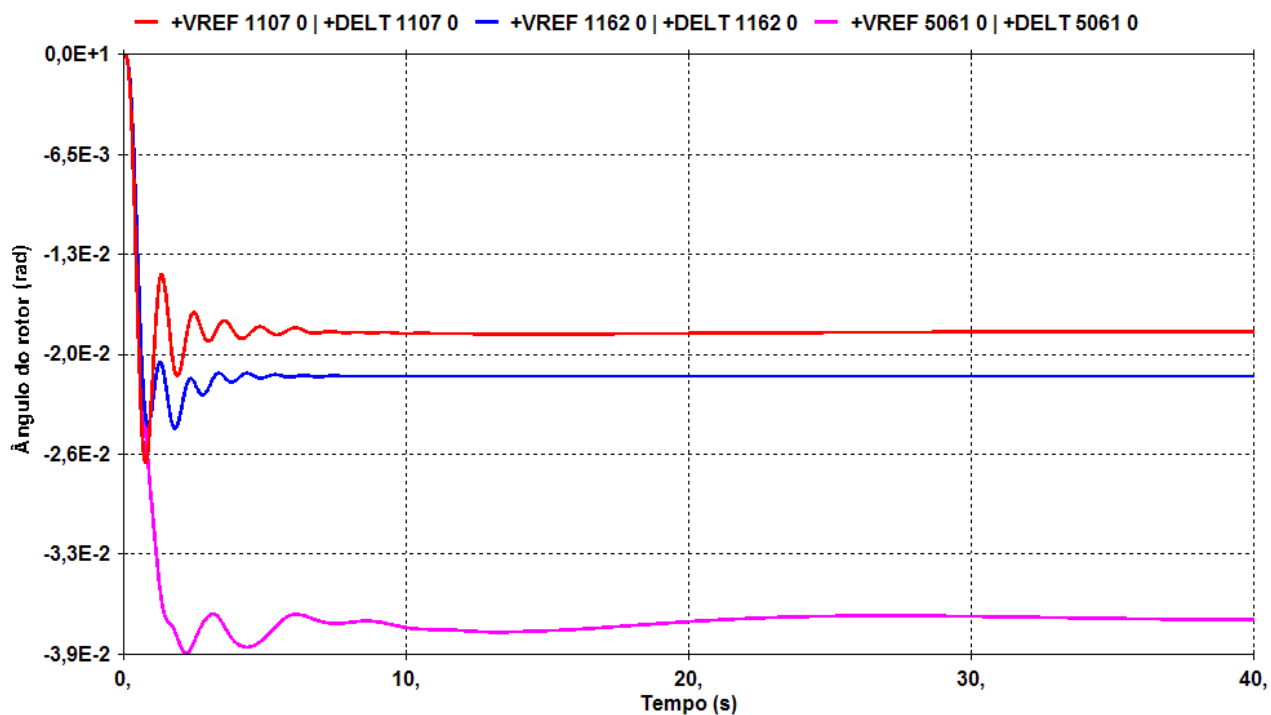


Figura 4.3 – Resposta no tempo do ângulo do rotor de Itaipu, Jacuí e Xingó

A característica apresentada nas respostas foi uma redução da velocidade do rotor do instante inicial até 2,5 segundos após a aplicação da perturbação, depois readquirindo a velocidade síncrona num novo ponto de operação, resultando em um defasamento de ângulo, mostrado na figura 4.3, em relação ao sistema em que não haveria perturbação.

4.4 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA A VELOCIDADE SÍNCRONA DO ROTOR DA MÁQUINA SÍNCRONA

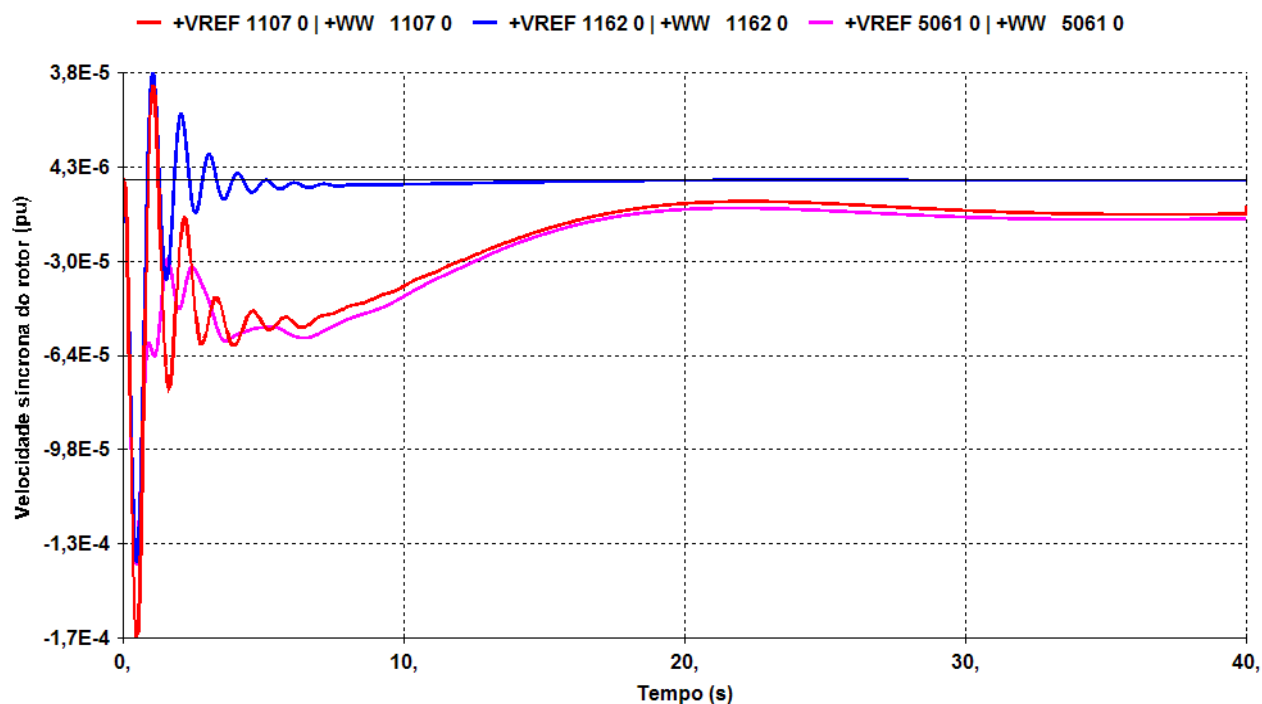


Figura 4.4 – Resposta no tempo da velocidade síncrona do rotor de Itaipu, Jacuí e Xingó

A usina de Jacuí volta ao regime permanente praticamente na mesma velocidade síncrona anterior à perturbação. Tal fato não ocorre em Itaipu e em Xingó, onde em um novo ponto de operação, há uma variação maior de velocidade, mas não difere muito em relação à velocidade síncrona do sistema.

O comportamento é justificado pela quantidade de cargas ligadas à usina. O rotor freia quando recebe a perturbação e volta a acelerar até uma nova velocidade síncrona de acordo com o novo ponto de operação do sistema. O impacto nessa velocidade vai depender da quantidade de cargas ligadas a usina, de modo que se a usina estiver fornecendo mais potência para as cargas seu rotor estará mais acelerado e sentirá mais uma perturbação do que um sistema onde é menos solicitada a produção de energia para atender a demanda das cargas. Se o sistema possui mais geradores e a distribuição de potência da usina for radial o impacto da perturbação é transmitido a outras usinas, o que demonstra o fato de Itaipu variar menos a velocidade que Xingó.

4.5 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A resposta no intervalo de frequência de 0,01 rad/s a 100 rad/s para uma entrada de potência mecânica e tendo como saída a velocidade síncrona do rotor das máquinas síncronas de Itaipu, Jacuí e Xingó é mostrada nas figuras a seguir:

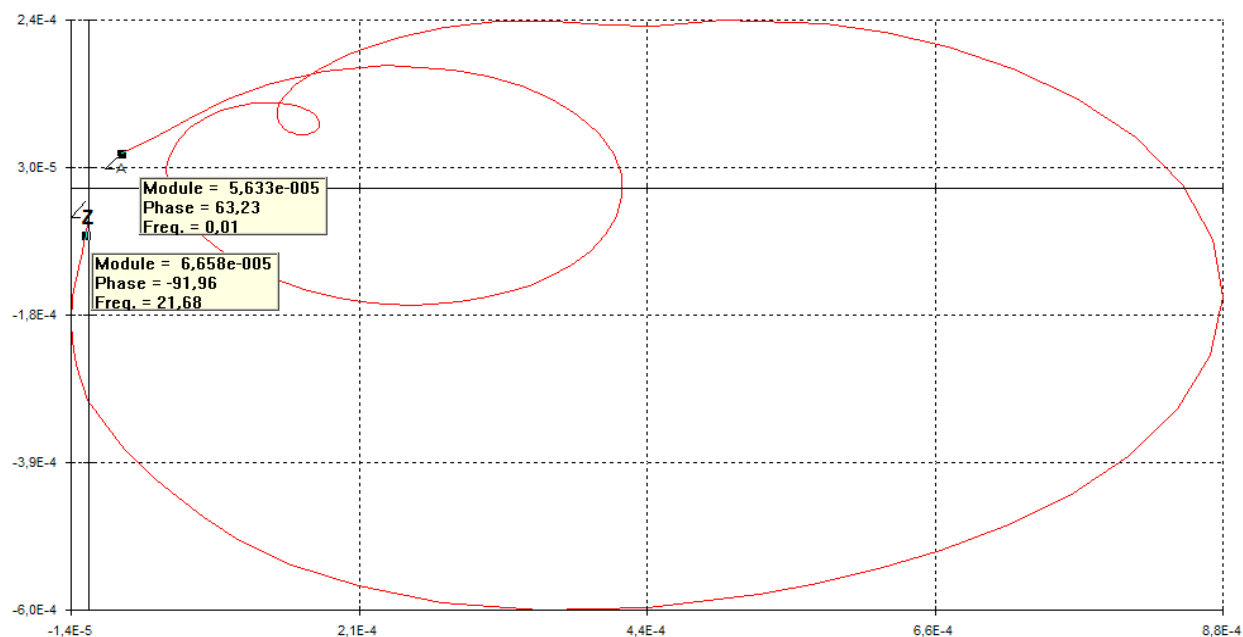


Figura 4.5 – Diagrama de Nyquist de Itaipu

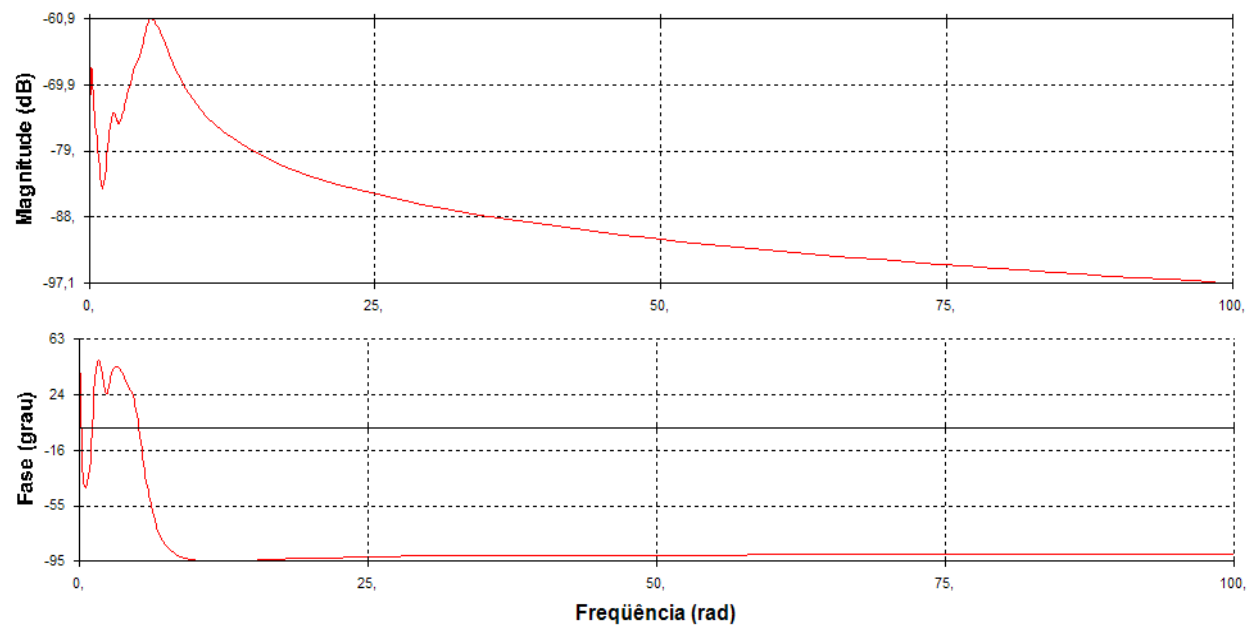


Figura 4.6 – Diagrama de Bode de Itaipu

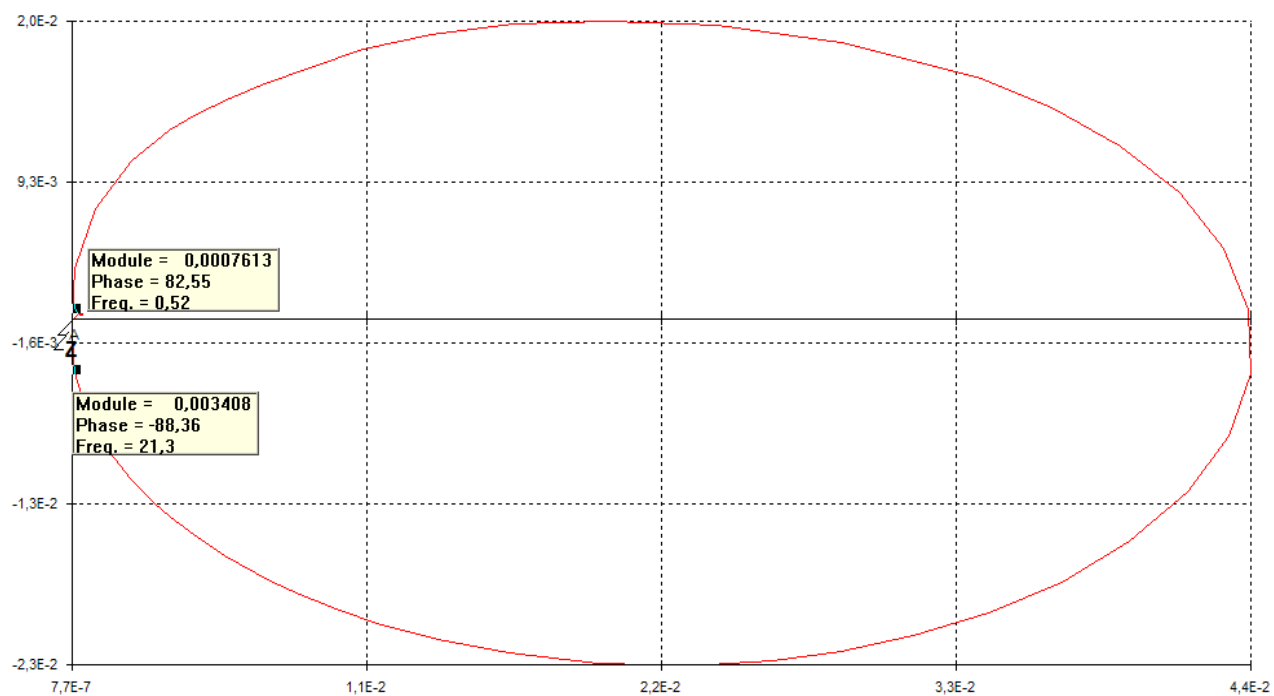


Figura 4.7 – Diagrama de Nyquist de Jacuí

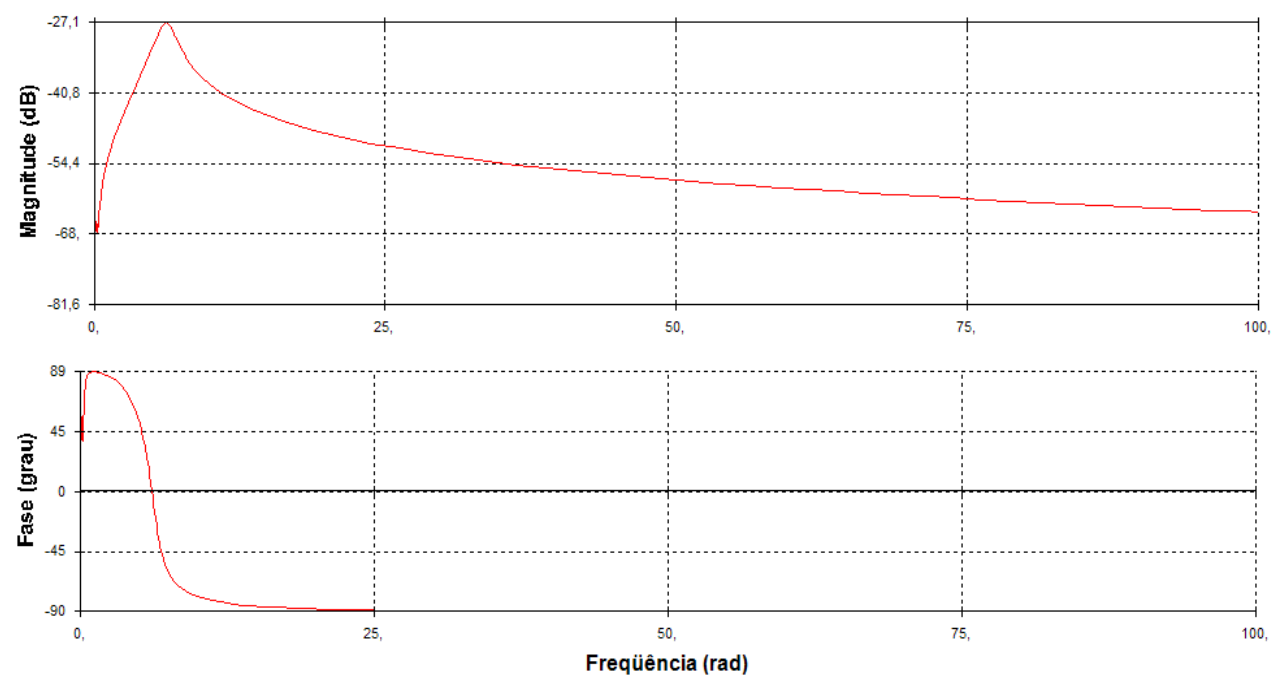


Figura 4.8 – Diagrama de Bode de Jacuí

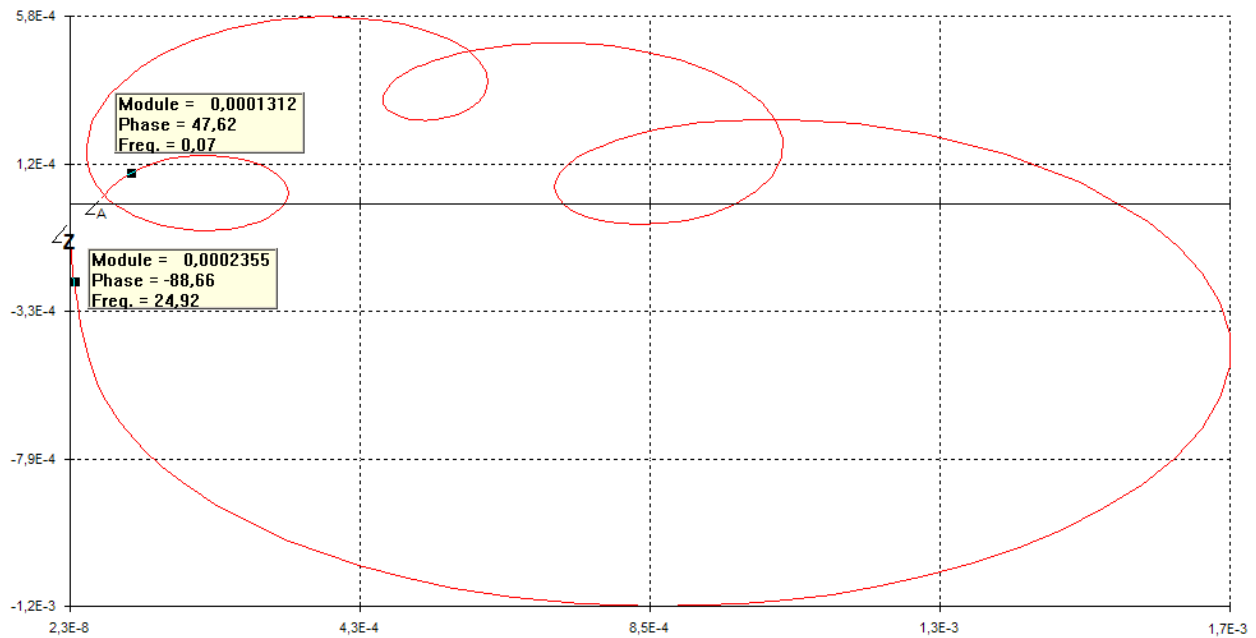


Figura 4.9 – Diagrama de Nyquist de Xingó

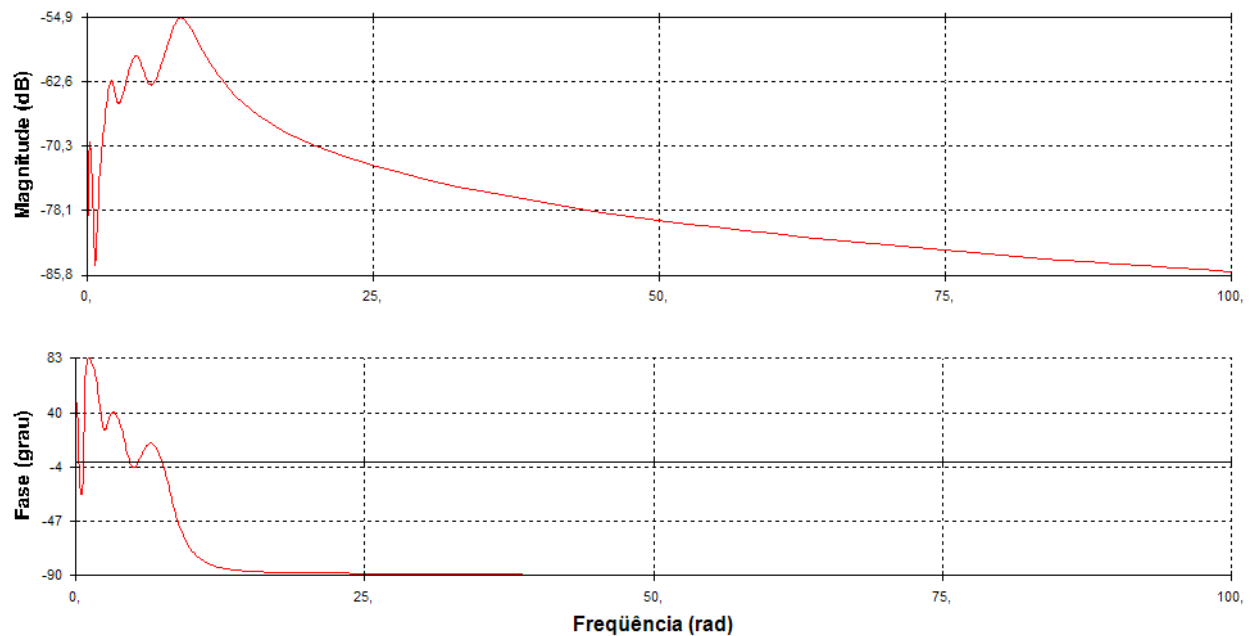


Figura 4.10 – Diagrama de Bode de Xingó

Os diagramas de Nyquist mostram que o sistema é estável para a função de transferência em análise, porque não há envolvimento do ponto $-1 + 0j$. No diagrama de Bode o módulo é negativo para toda a faixa de frequência análise e a fase tende a 90° para as três usinas.

Capítulo 5

SISTEMA MULTIMÁQUINAS

5.1 AUTOVALORES DO SISTEMA

O sistema em análise corresponde ao sistema interligado brasileiro de energia elétrica com arquivos dinâmicos e históricos do PacDyn fornecidos pela ONS e obtidos a partir de dados reais. O sistema apresenta 191 máquinas síncronas e 3077 variáveis de estado cujos autovalores estão representados graficamente pela figura 5.1.

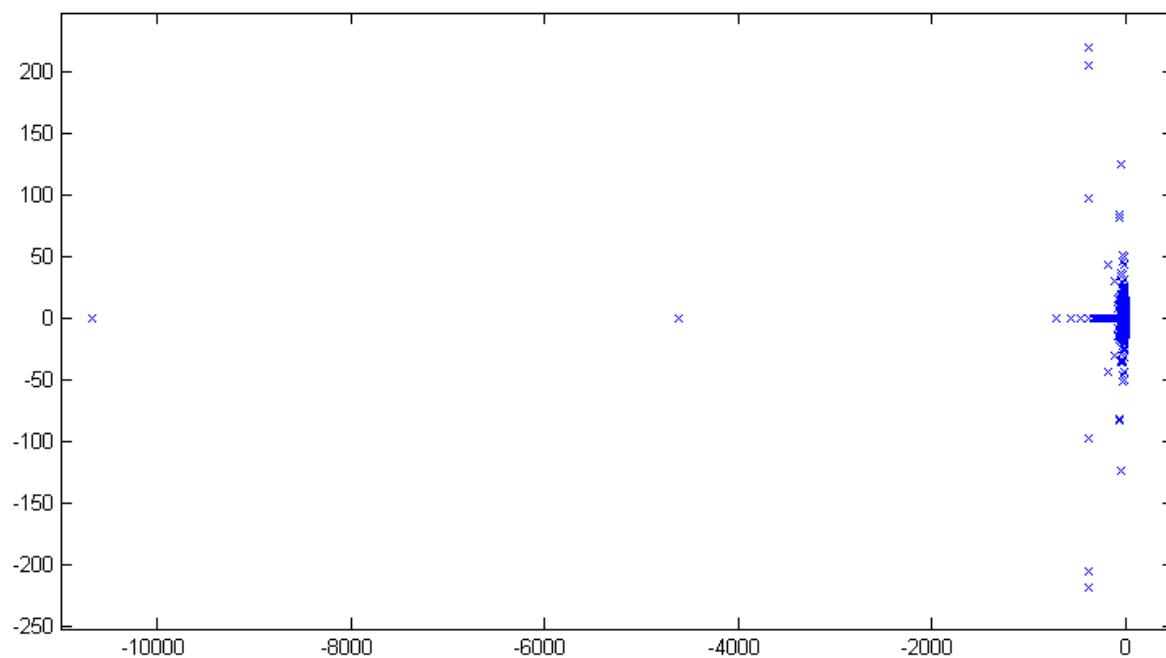


Figura 5.1 – Gráfico dos autovalores do sistema interligado brasileiro

Os autovalores estão concentrados próximos ao eixo imaginário sendo necessário um zoom para melhor visualização conforme mostra a figura 5.2.

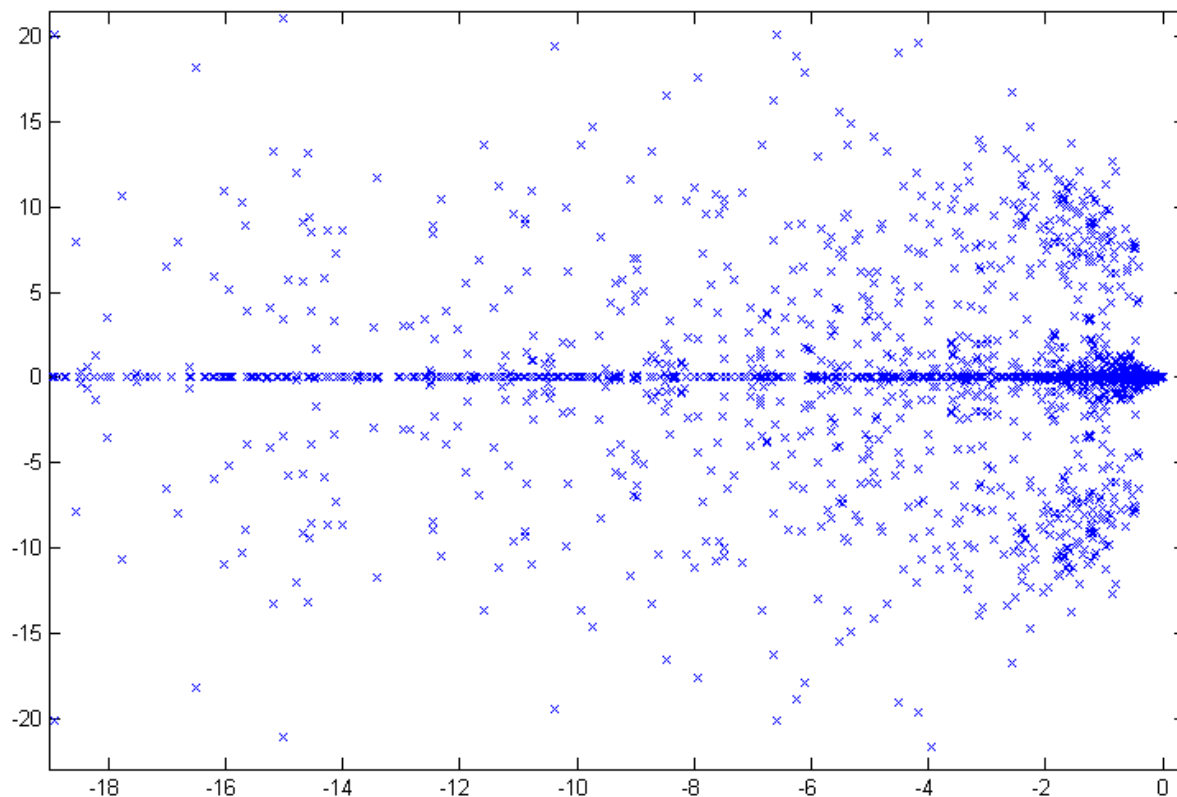


Figura 5.2 – Gráfico ampliado dos autovalores do sistema interligado brasileiro

5.2 SISTEMA REDUZIDO FORMADO PELOS AUTOVALORES - $0.589 \pm j7.668$

O objetivo deste exemplo é o de utilizar um modelo de redução de ordem para analisar a relevância de certos autovalores, segundo as técnicas de mode shapes e fatores de participação, para uma dada função de transferência.

Neste modelo será gerada uma curva em azul da resposta no tempo e repostada na frequência do sistema completo e em vermelho do sistema de ordem reduzida formada pela seleção de autovalores.

Foi utilizada uma função de transferência que tem na entrada uma perturbação no regulador de tensão de Tucuruí e saída para velocidade do rotor de máquina síncrona das usinas de Paulo Afonso e Xingó. Serão comparados os resultados obtidos nessas duas últimas usinas para analisar o fato de estarem próximas geograficamente.

Os modos eletromecânicos procurados para a velocidade de máquinas síncronas são autovalores com amortecimento pequeno e com frequências baixas em torno de 0,1 a 2,5 Hz.

Dessa forma, os autovalores $-0.589 \pm j7.668$ corresponde ao modo que possui como maiores fatores de participação o ângulo e a velocidade síncrona do rotor em Paulo Afonso, conforme mostrado na figura 5.3.

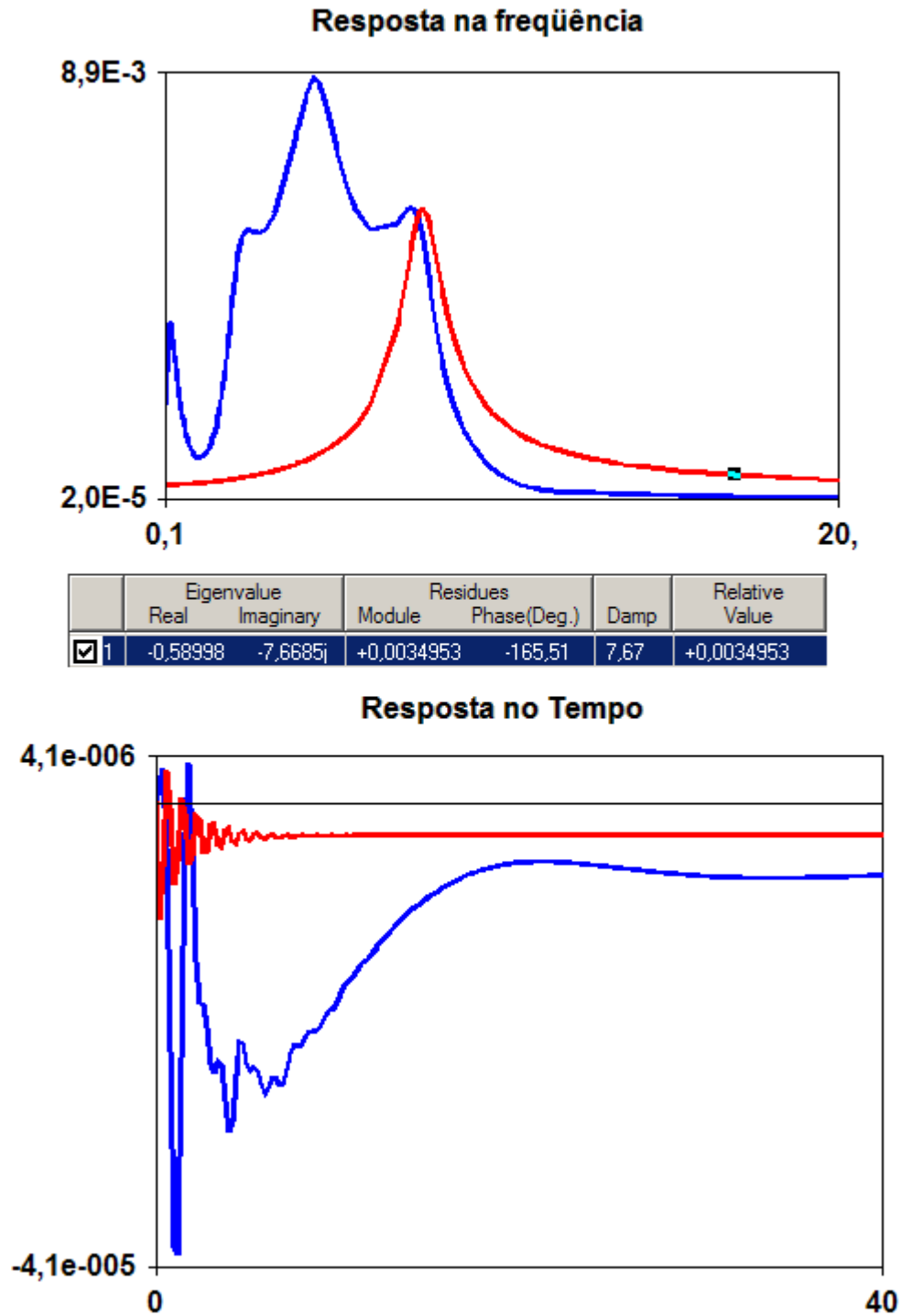


Figura 5.3 – Gráfico com as respostas no tempo e na frequência para o modo $-0.58 \pm j7.66$

Na redução de ordem é possível ver que outros autovalores contribuem no sistema completo, já que, pela figura 5.3, na resposta em frequência, observa-se que as curvas em vermelho e em azul não coincidem. Note-se que, picos formados pela variação abrupta da amplitude correspondem às frequências aproximadas de oscilação de modos eletromecânicos de certas usinas. A parte imaginária do autovalor corresponde à frequência em radianos/segundos do modo.

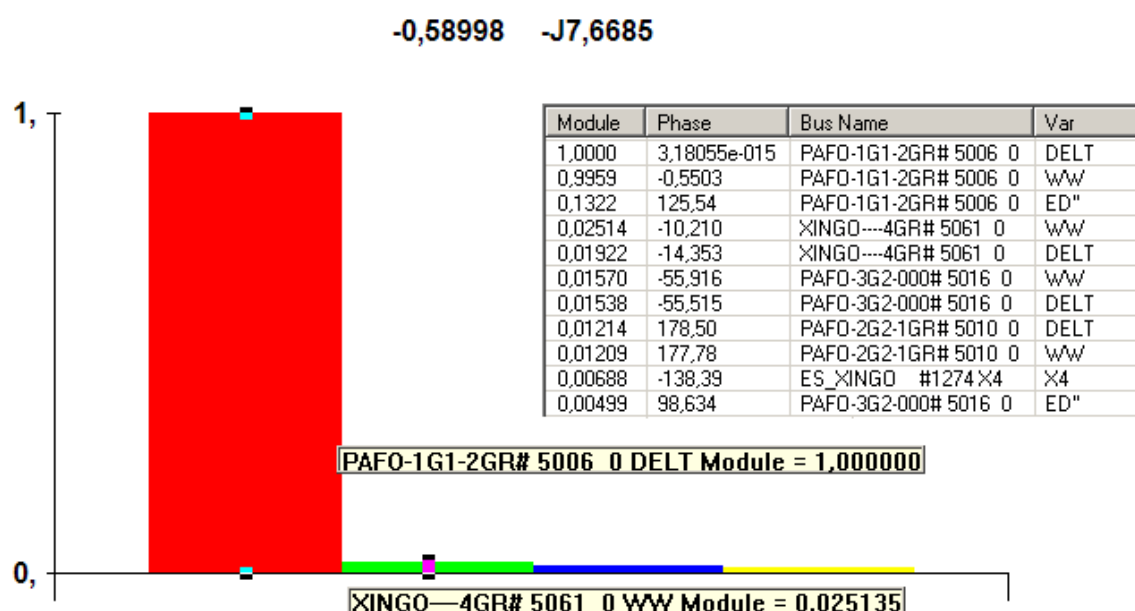


Figura 5.4 – Histograma do fator de participação do modo $-0.58 \pm j7.66$

Pelo mode shape e fator de participação observa-se que as outras usinas têm magnitude pequena na contribuição do respectivo autovalor como mostrado nas figuras 5.5 e 5.4, respectivamente.

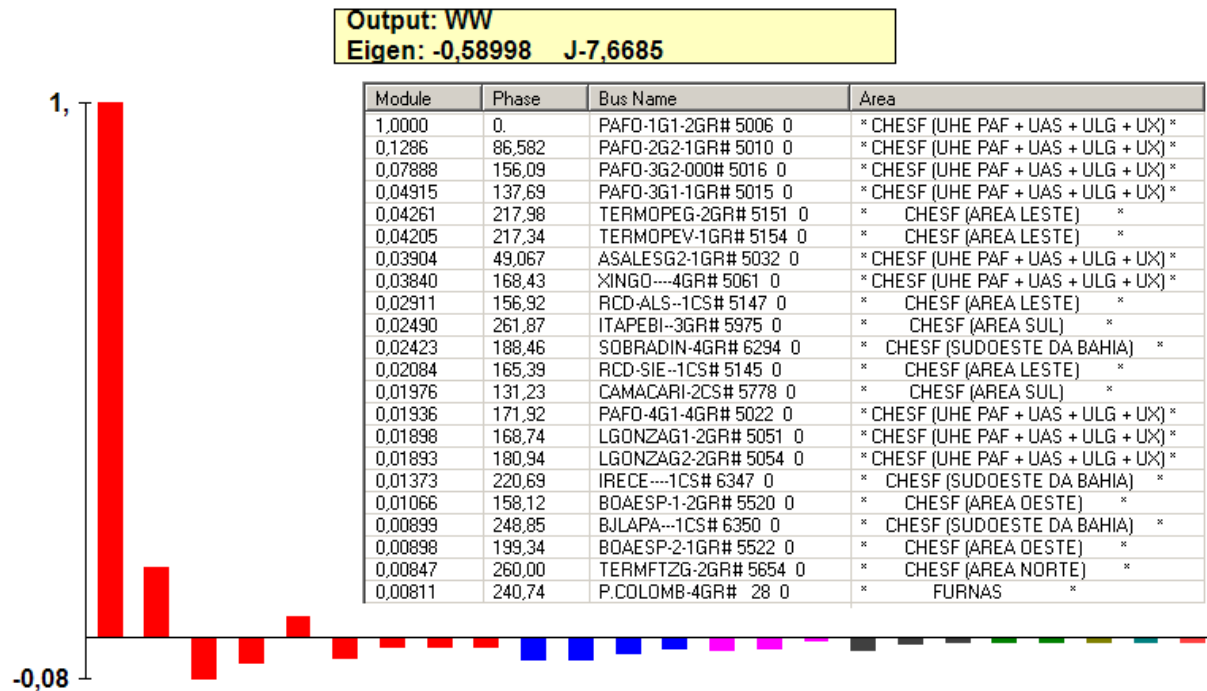


Figura 5.5 – Mode shape do modo $-0.58 \pm j7.66$

5.3 SISTEMA REDUZIDO FORMADO PELOS AUTOVALORES - 0.889 ± j4.386

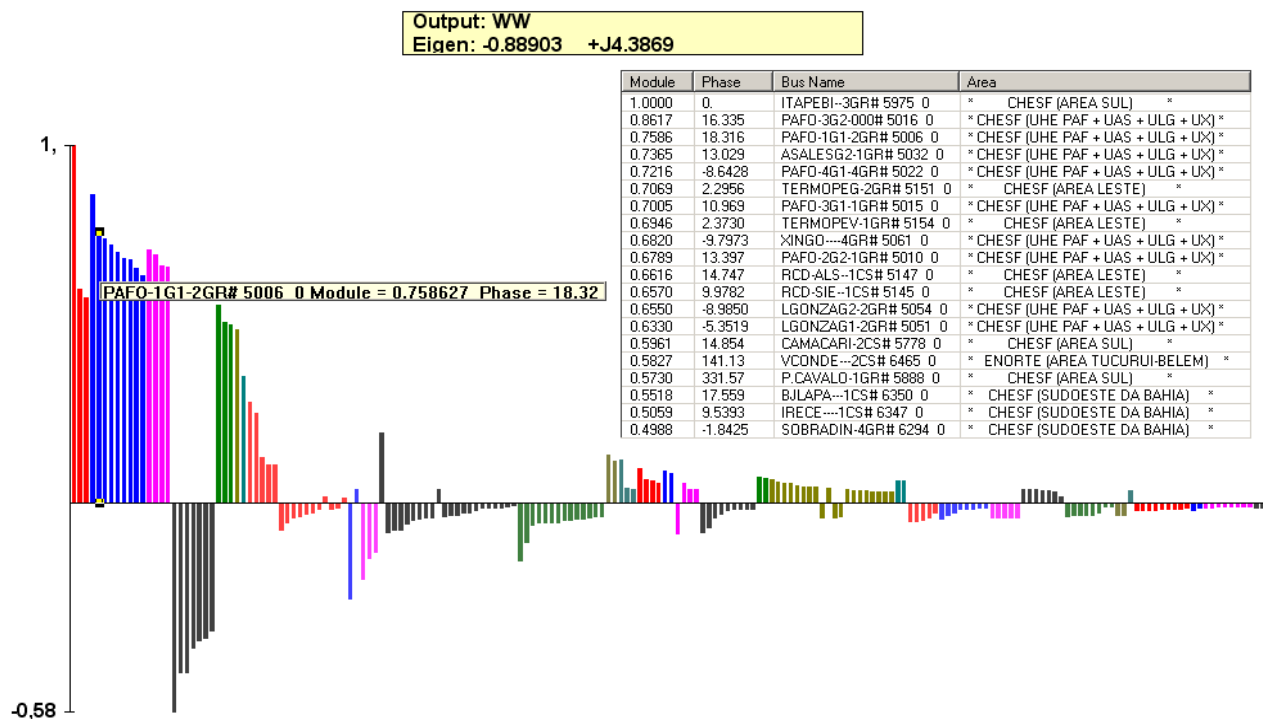


Figura 5.6 – Mode shape do modo $-0.88 \pm j4.38$

O autovalor $-0.889 \pm j4.38$ depreende-se que a usina de Paulo Afonso apresenta magnitude elevada no mode shape de velocidade síncrona.

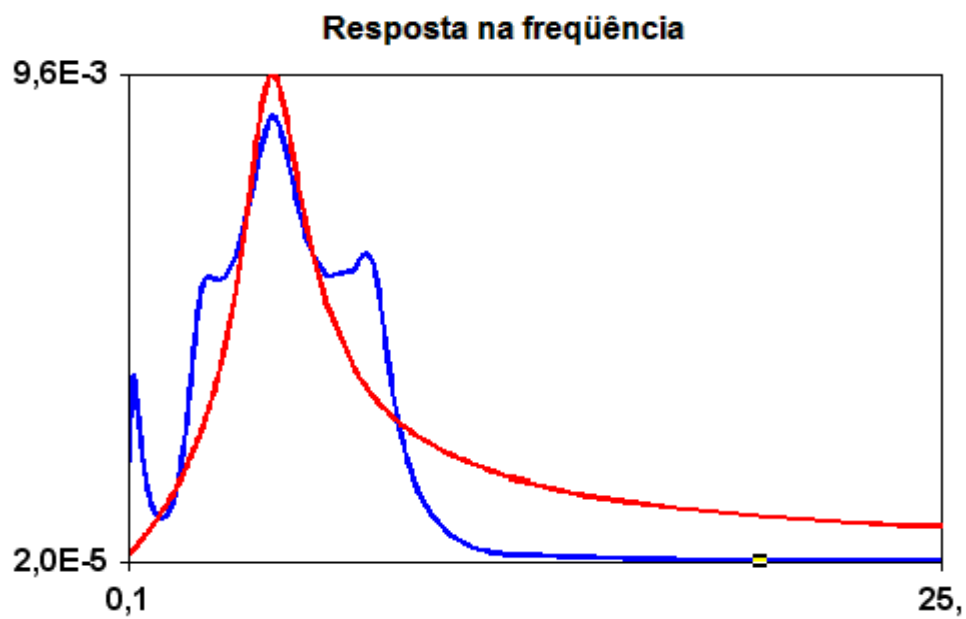
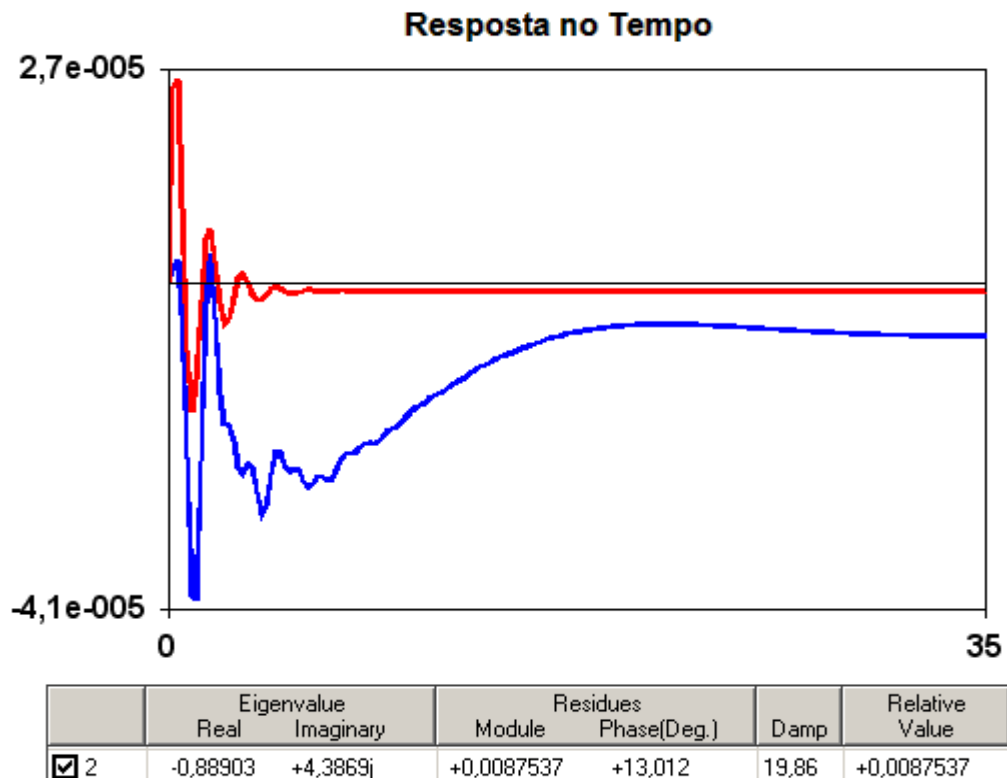


Figura 5.7 – Gráfico com as respostas do tempo e na frequência para o modo $-0.88 \pm j4.38$

5.4 SISTEMA REDUZIDO FORMADO PELOS AUTOVALORES - $-0.456 \pm j2.185$

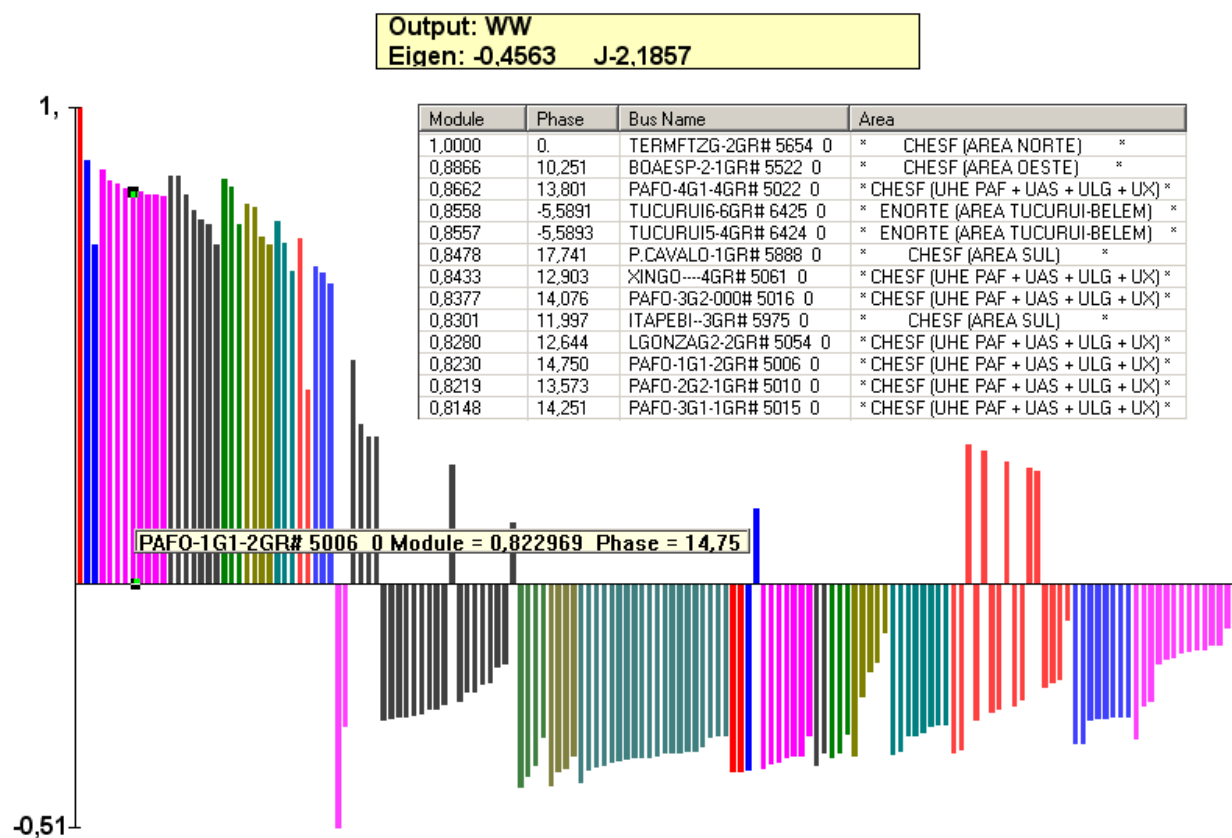


Figura 5.8 – Mode shape para o modo $-0.45 \pm j2.18$

Pelo mode shape percebemos a significativa contribuição de Paulo Afonso no autovalor $-0.45 \pm j2.18$, de acordo com a figura 5.8.

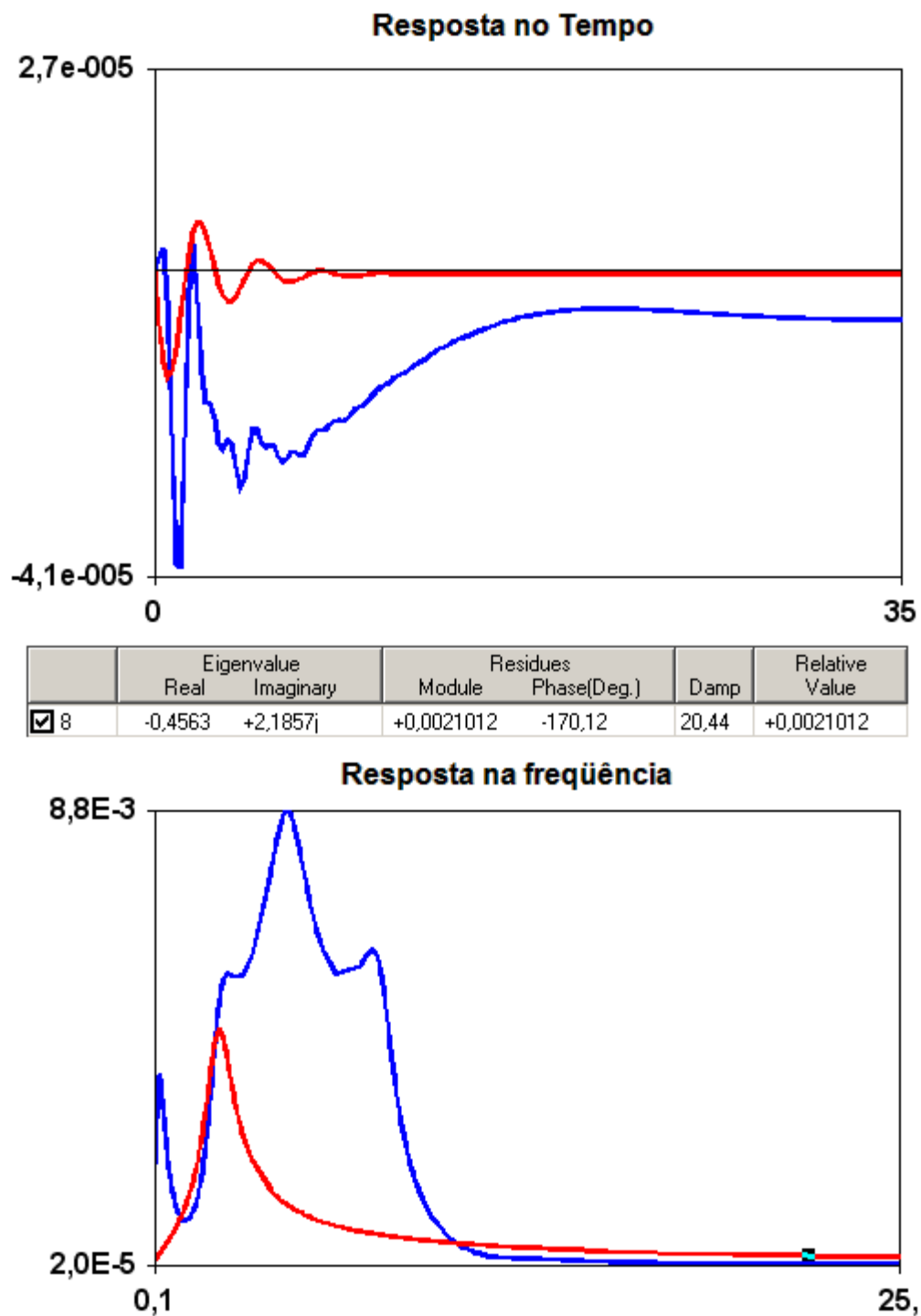
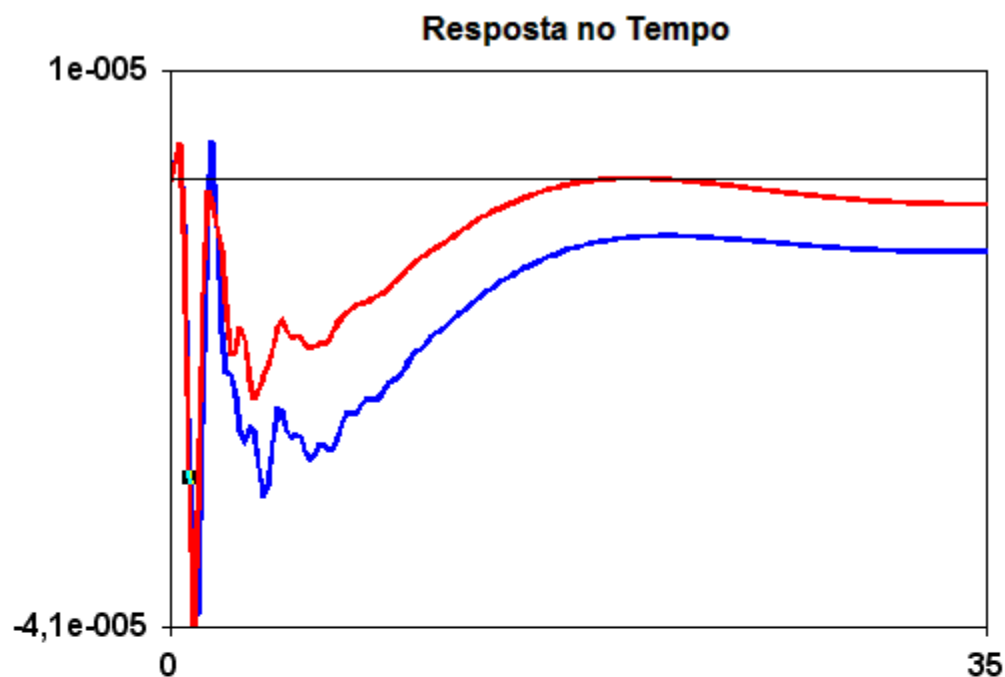


Figura 5.9 – Gráfico com as respostas do tempo e na frequência para o modo $-0.45 \pm j2.18$

A figura 5.9 mostra que contribuição do autovalor no sistema com redução de ordem é bastante significativa na formação da curva do sistema completo.

5.5 SISTEMA REDUZIDO FORMADO PELOS PRINCIPAIS AUTOVALORES



	Eigenvalue		Residues		Damp	Relative Value
	Real	Imaginary	Module	Phase(Deg.)		
<input checked="" type="checkbox"/> 2	-0,88903	+4,3869j	+0,0087537	+13,012	19,86	+0,0087537
<input checked="" type="checkbox"/> 4	-0,58998	+7,6685j	+0,0034953	+165,51	7,67	+0,0034953
<input checked="" type="checkbox"/> 6	-0,4563	+2,1857j	+0,0021012	-170,12	20,44	+0,0021012
<input checked="" type="checkbox"/> 8	-1,5786	+8,2804j	+0,0016629	+163,34	18,73	+0,0016629
<input checked="" type="checkbox"/> 10	-0,12036	+0,20121j	+0,00031442	-139,69	51,34	+0,00031442
<input checked="" type="checkbox"/> 12	-1,8446	+7,9204j	+0,00074823	-161,77	22,68	+0,00074823

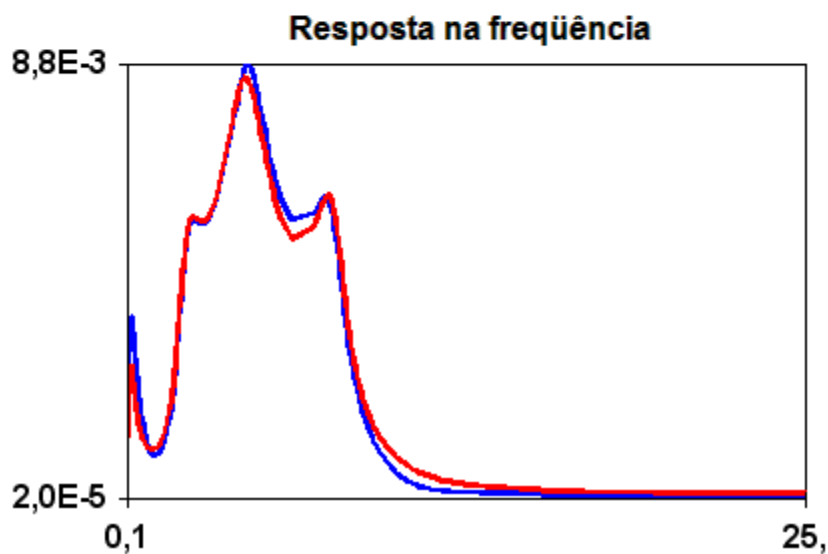


Figura 5.10 – Gráfico com as respostas do tempo e na frequência para principais modos

O sistema mostrado de ordem reduzida está com os autovalores que mais contribuem para a resposta na frequência e no tempo. As curvas em azul e em vermelho representando os sistemas apresentam um comportamento similar, embora a de resposta no tempo haja diferença na amplitude, uma vez que são muitos os componentes que influenciam nesta resposta.

5.6 RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA PARA XINGÓ

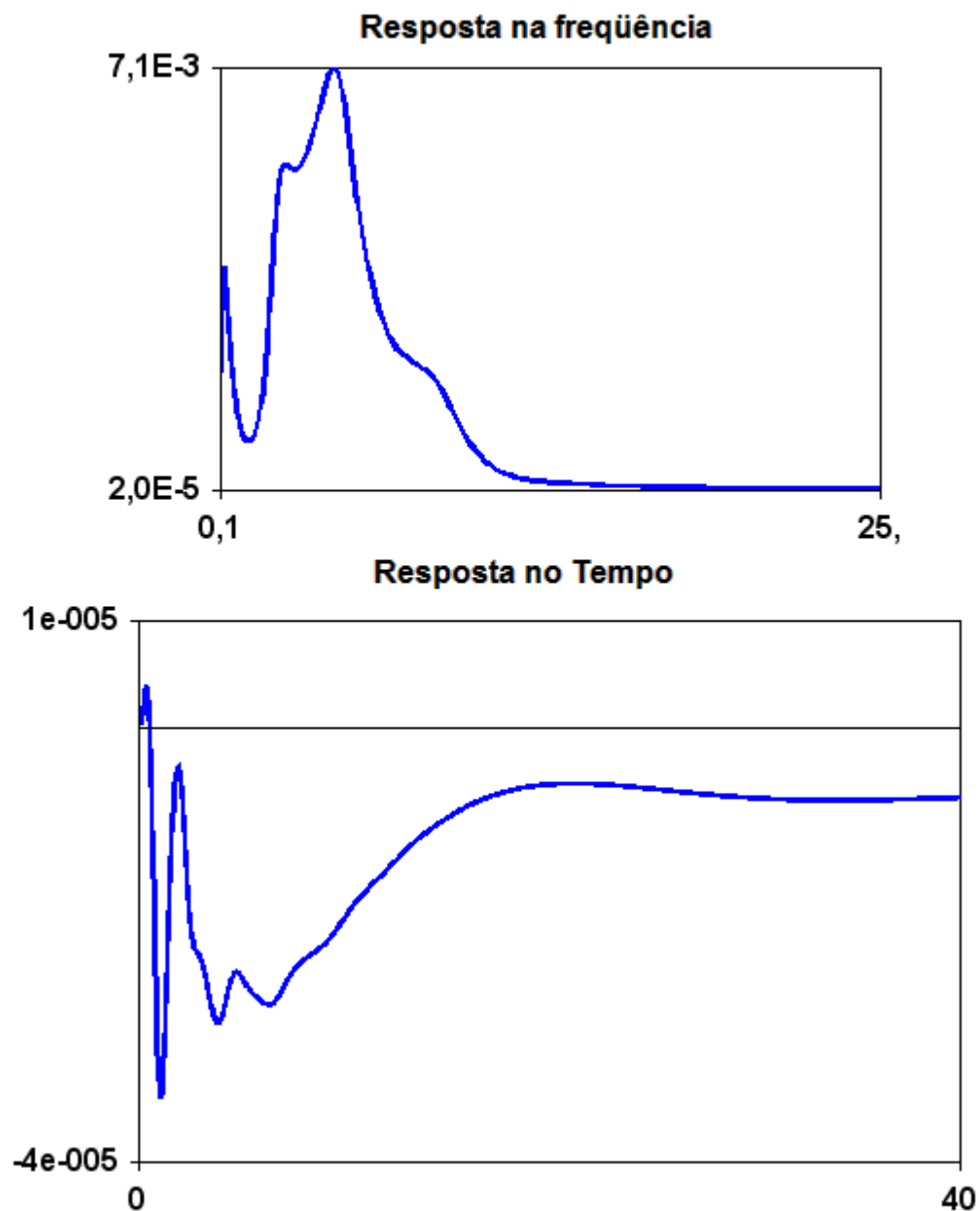


Figura 5.11 – Gráfico com as respostas do tempo e na frequência para Xingó

Repara-se uma certa similaridade, na figura 5.10, entre as respostas no tempo e na frequência, com a figura 5.11. Com o intuito de mostrar que existem modos eletromecânicos que influenciam uma certa região geográfica, foi realizada uma simulação no qual temos como entrada uma perturbação no regulador de tensão de Tucuruí e na saída a velocidade síncrona em Xingó.

Os modos eletromecânicos mais significativos presentes são os mesmos da simulação de Paulo Afonso, no caso $-0.88 \pm j4.38$ e $-0.45 \pm j2.18$, diferindo somente no modo $-0.58 \pm j7.66$, que são os autovalores que, no mode shape, tem na usina de Paulo Afonso o seu componente de maior contribuição em magnitude, sendo praticamente desprezíveis as influências de outras usinas neste modo, conforme mostra figura 5.5.

Capítulo 6

ANÁLISE DE RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA

6.1 EXEMPLO NO SISTEMA BENCHMARK

A análise de ressonância subsíncrona será feita com base no IEEE First Benchmark System. O sistema mostrado na figura 6.1 é um diagrama unifilar de um sistema operando em 60 Hz composto de um gerador e um barramento infinito e linha de transmissão de um sistema de compensação série com capacitor.

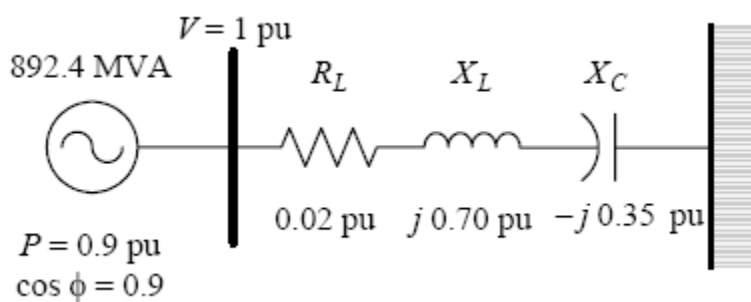


Figura 6.1 – Sistema analisado para o fenômeno de ressonância subsíncrona [8]

O gerador tem como base de potência 892.4 MVA e os seguintes dados:

$$\begin{array}{ll} X_d = 1.79 pu & X_q = 1.71 pu \\ X'_d = 0.169 pu & X'_q = 0.228 pu \\ X''_d = 0.135 pu & X''_q = 0.200 pu \\ X_l = 0.13 pu & r = 0 pu \\ T'_{d0} = 4.3 s & T'_{q0} = 0.85 s \\ T'''_{d0} = 0.032 s & T'''_{q0} = 0.05 s \end{array}$$

O sistema mecânico do composto turbina-gerador é representado por seis massas mecânicas, onde os dados da constante de inércia H, fator de amortecimento D e da constante de elasticidade K nos eixos que conectam as massas mecânicas encontram-se na tabela 6.1 [9]

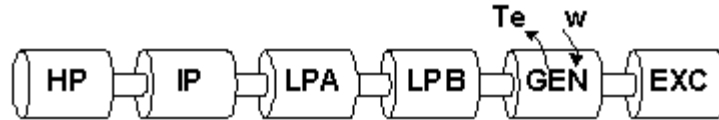


Figura 6.2 – Esquemático mostrando a conexão entre as massas mecânicas [9]

Tabela 6.1 – Dados de inércia e amortecimento para as massas mecânicas e de elasticidade para ligação entre os seus eixos.

Massa	H(s)	D(pu/pu))	Eixo	K(Torque(pu)/rad)
HP	0.092897	0.10500		
			HP-IP	19.303
IP	0.155589	0.05850		
			IP-LPA	34.929
LPA	0.858670	0.01970		
			LPA-LPB	52.038
LPB	0.884215	0.00233		
			LPB-GEN	70.858
GEN	0.868495	0.02480		
			GEN-EXC	2.822
EXC	0.0342165	0.01020		

O sistema possui um regulador de tensão de primeira ordem representado na figura 6.3

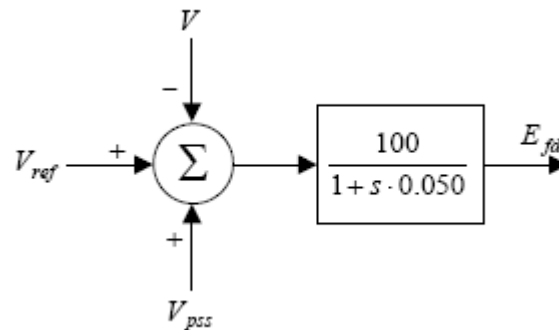



Figura 6.3 – Diagrama de blocos que representa o regulador de tensão [8]

6.2 PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS USANDO O PACDYN

Faz-se necessário o uso do arquivo de dados dinâmicos fbm02.dyn, no qual estão inseridos os dados da rede unifilar acima mostrados e do histórico fbm.his.

De forma a executar este projeto, deve-se abrir o arquivo fbm.pac, já disponibilizado para estudo no próprio PacDyn, por meio do desenho de uma pasta amarela  ou clicando em “File” e posteriormente em “Open”, conforme figura 6.4.

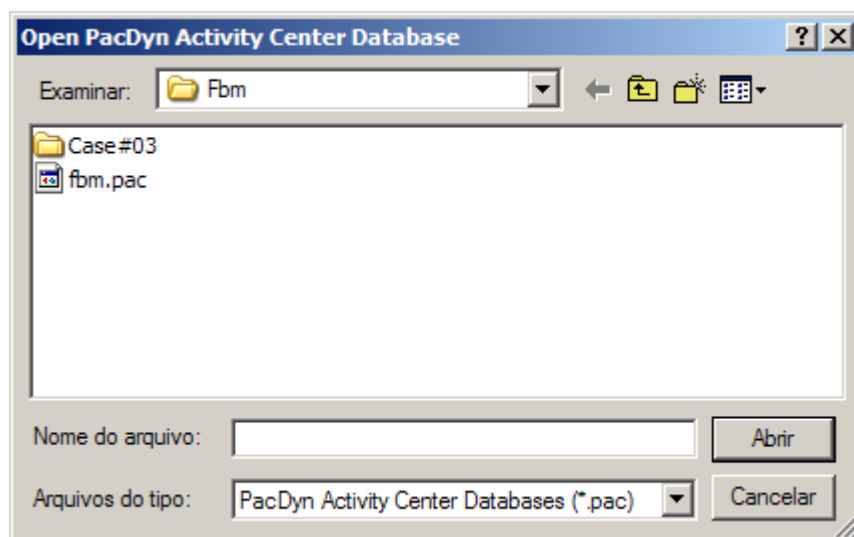



Figura 6.4 – Janela para abrir o First Benchmark Model

O PacDyn executa o caso 1 contido no arquivo fbm.pac automaticamente, o qual não é o que será analisado. A alternância para o caso 3 se faz pressionando o mouse sobre o ícone  ou indo em “View” e em seguida em “Case Manager...”.

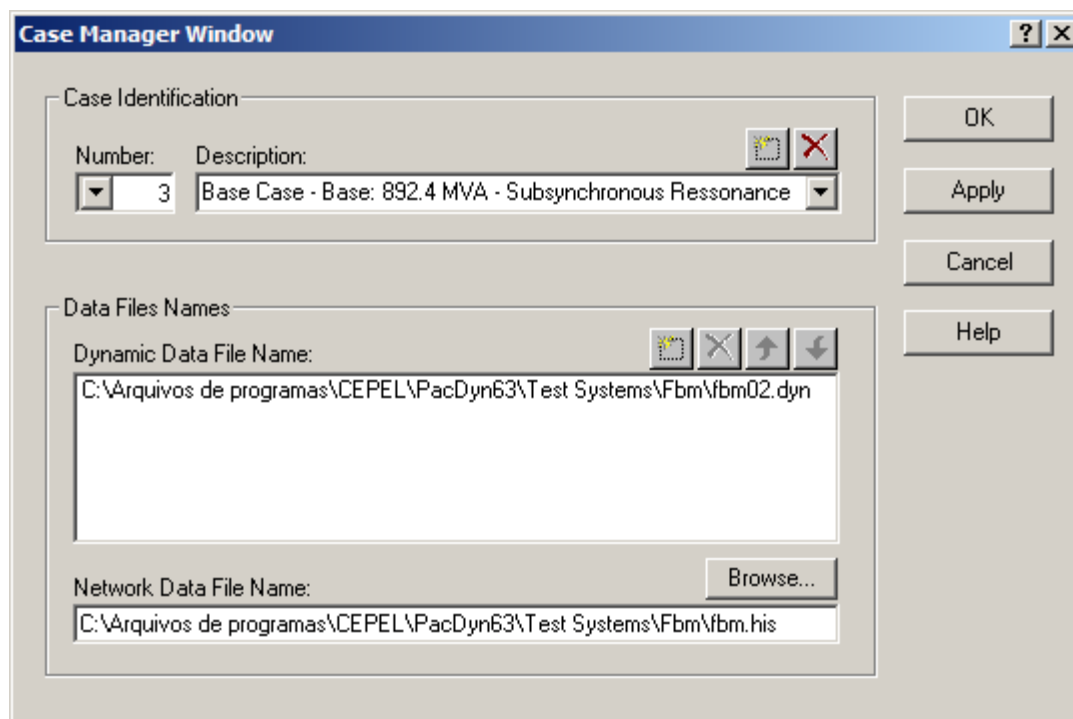


Figura 6.5 – Mostra a seleção do caso 3

6.3 RESPOSTA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E ANÁLISE DA ESTABILIDADE

A função de transferência inserida no campo da resposta na frequência e no tempo tem como entrada a potência mecânica que está sendo aplicada na máquina síncrona e como saída a velocidade do rotor desta mesma máquina.

A simulação da resposta em frequência foi realizada com variação entre 1Hz e 500Hz e nos dará o diagrama de Nyquist e o de Bode com a finalidade de encontrar o valor da parte imaginária dos autovalores que representam os modos torcionais, eletromecânicos e o subsíncrono.

O diagrama de Nyquist na figura 6.6 mostra quatro envoltimentos, sendo dois no sentido horário e dois no sentido anti-horário em torno do ponto $-1 + 0j$ enquanto possui dois pólos complexo conjugados no semi-plano direito, indicando que o sistema é instável, conforme teoria de controle dinâmico [7].

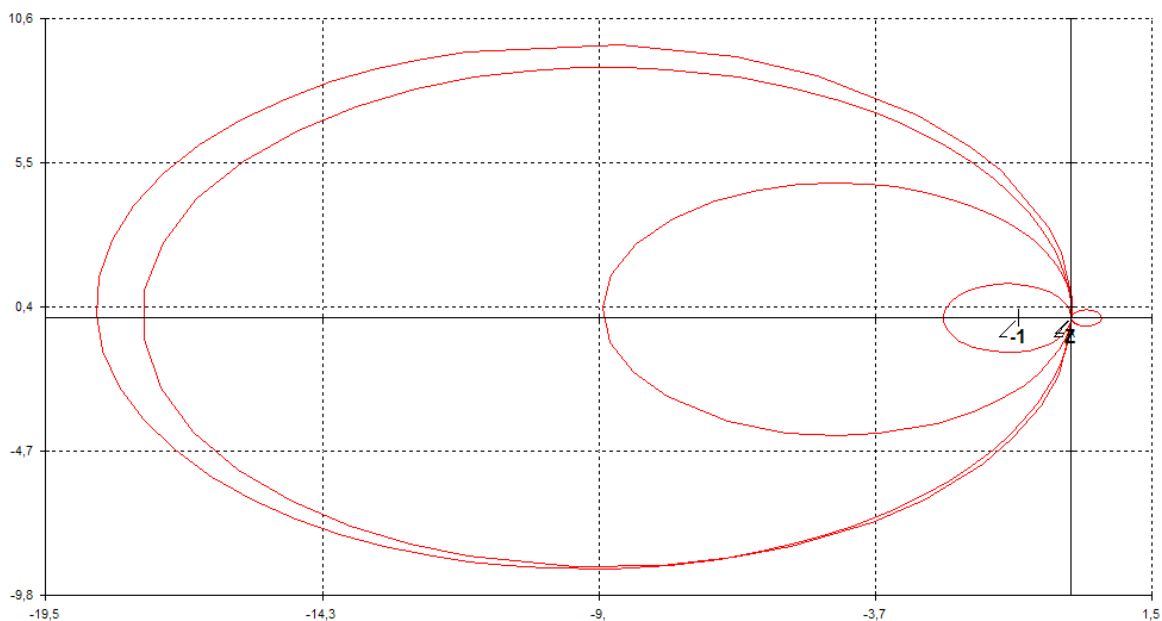


Figura 6.6 – Diagrama de Nyquist para entrada de potência mecânica e saída da velocidade síncrona do rotor

A figura 6.7 mostra os diagrama de Bode de magnitude e fase. Determinadas frequências apresentam variação acentuada de amplitude e alteração abrupta de fase em 180° , o que demonstra o baixo amortecimento dos autovalores complexos conjugados do sistema.

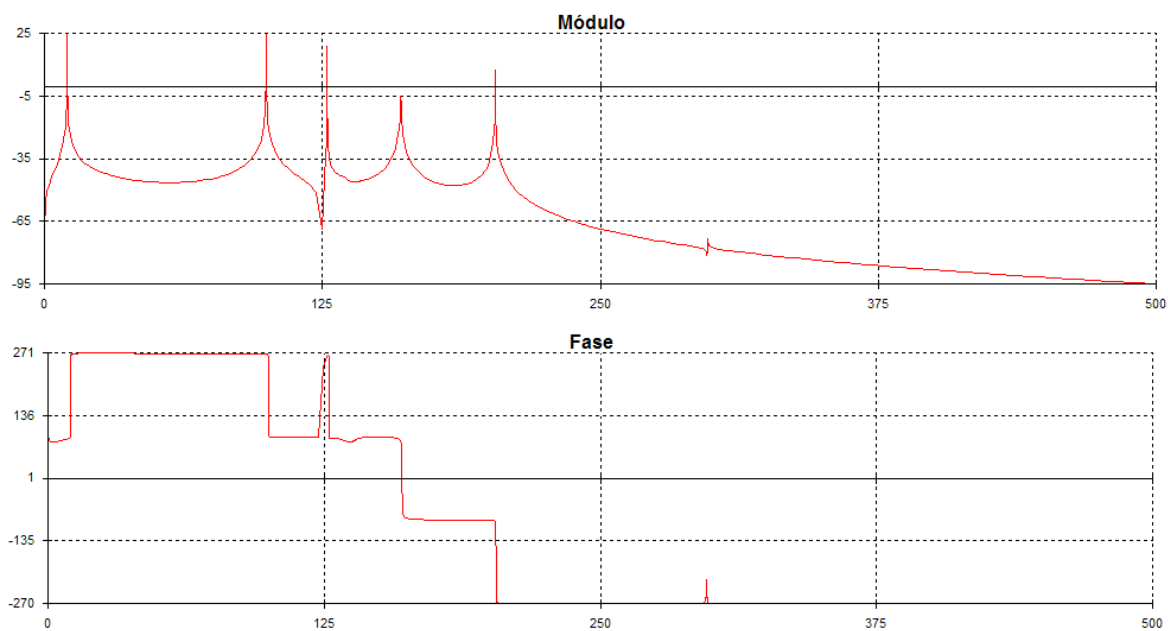


Figura 6.7 – Diagrama de Bode

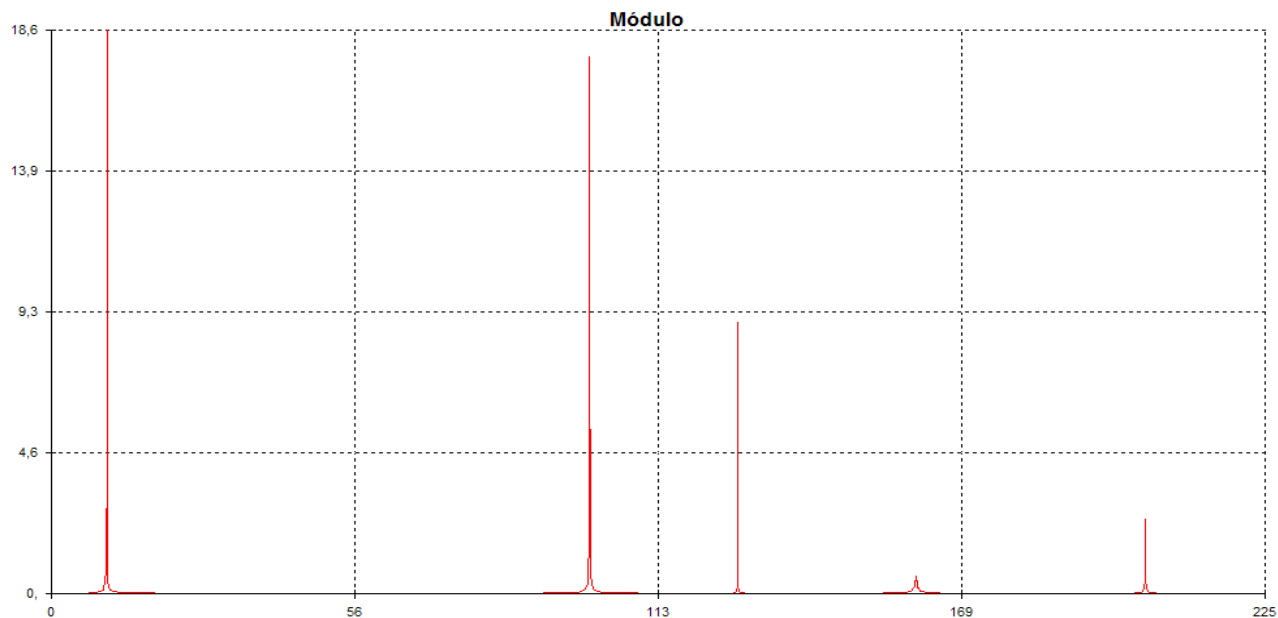


Figura 6.8 – Diagrama de Bode de magnitude em escala linear

Na figura os cinco picos representam a parte imaginária dos autovalores do sistema e ocorrem em frequências aproximadamente iguais à 10 rad/s, 100 rad/s, 127 rad/s, 160 rad/s e 202 rad/s.

6.4 AUTOVALORES ENCONTRADOS PELA FUNÇÃO DOMINANT POLE SPECTRUM EIGENSOLVER

Pólos iniciais (shifts) são inseridos dentro da janela “Eigenvalues & T.F. Zeros Management” clicando no botão New Shifts. Os valores da parte imaginária próximos aos das frequências mostradas por picos na figura promoverão uma convergência mais rápida dos autovalores a serem estimados.

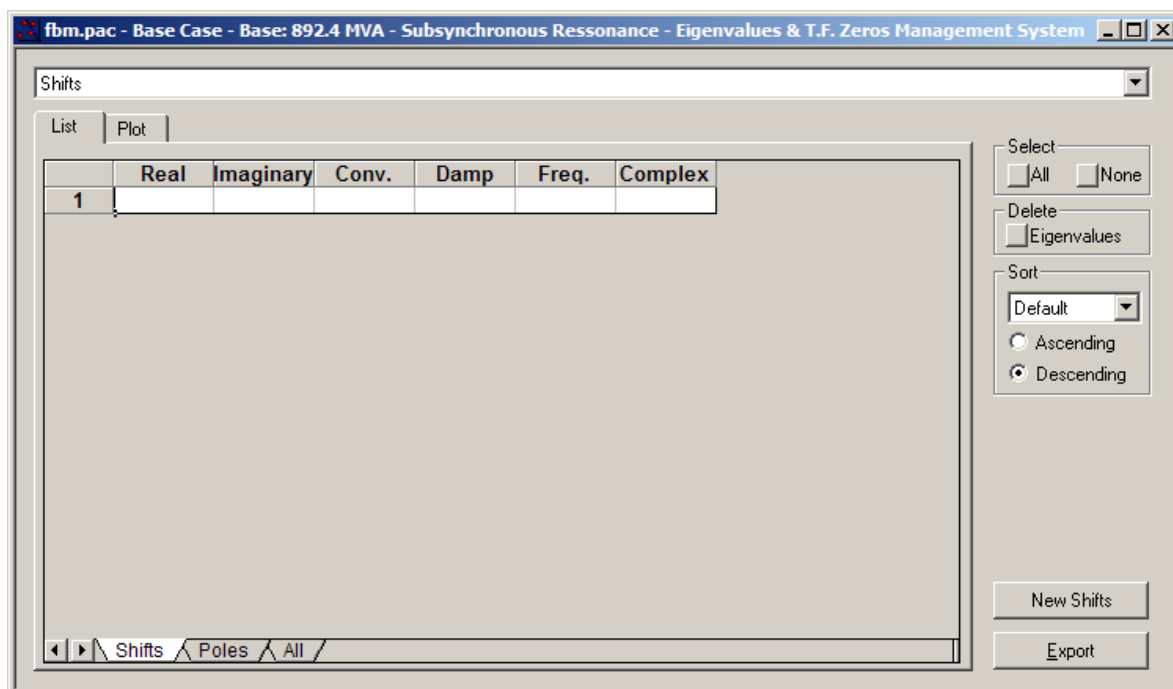
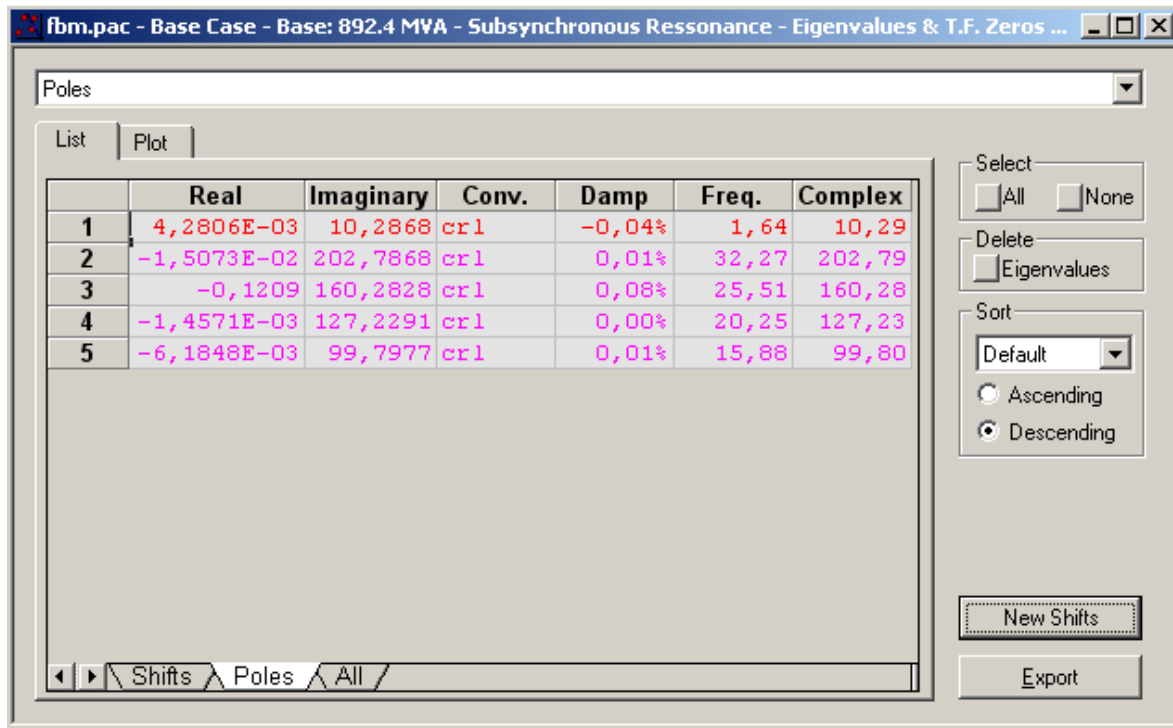


Figura 6.9 – Janela Eigenvalues & T.F. Zeros Management

Os autovalores são estimados através da função Dominant Pole Spectrum Eigensolver e seu resultado mostrado na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Autovalores estimados pela função Dominant Pole Spectrum Eigensolver



O autovalor $4,2806E-03+10,2868j$ e seu conjugado estão situados no semi-plano direito, caracterizando a instabilidade do sistema demonstrado pelo diagrama de Nyquist e de Bode nas figuras 6.6 e 6.7.

6.5 RESPOSTAS NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA VELOCIDADE DAS MASSAS MECÂNICAS

Aplicado um distúrbio em degrau de amplitude 0,01 e como entrada da função transferência a potência mecânica e saída a velocidade do rotor de máquina síncrona, são gerados os seguintes gráficos em cada uma das massas que compõem o sistema turbina gerador.

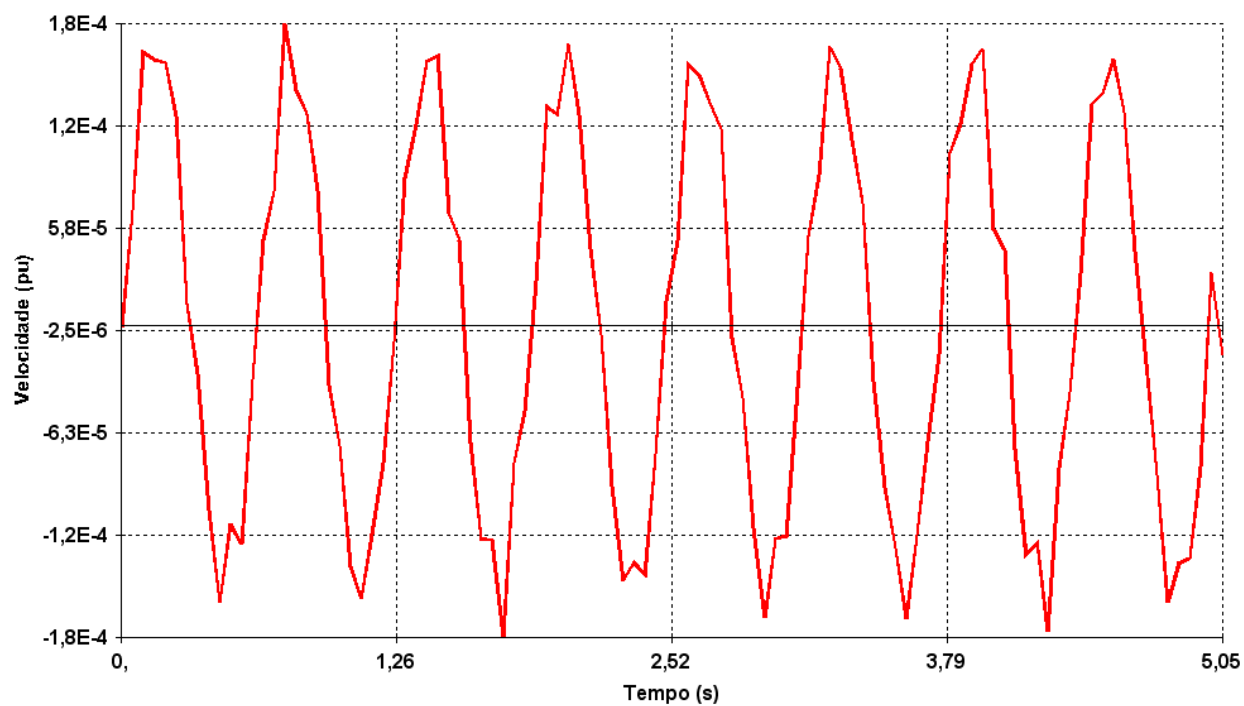


Figura 6.10 – Velocidade do rotor do conjunto turbina-gerador

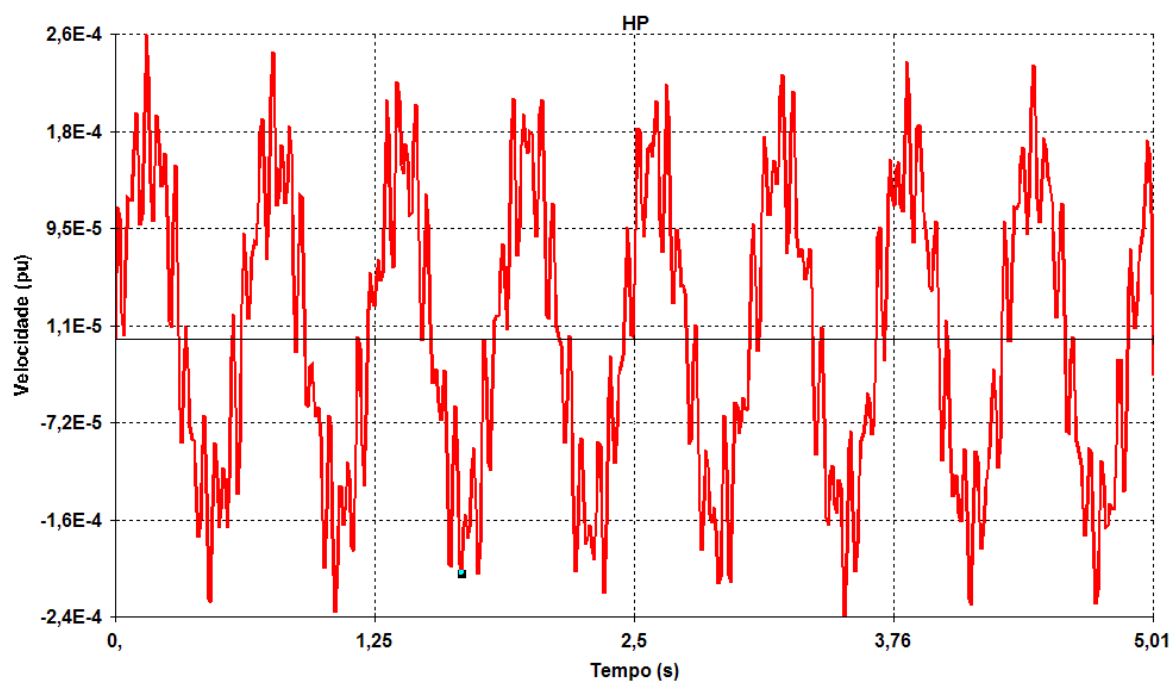


Figura 6.11 – Velocidade da massa mecânica HP

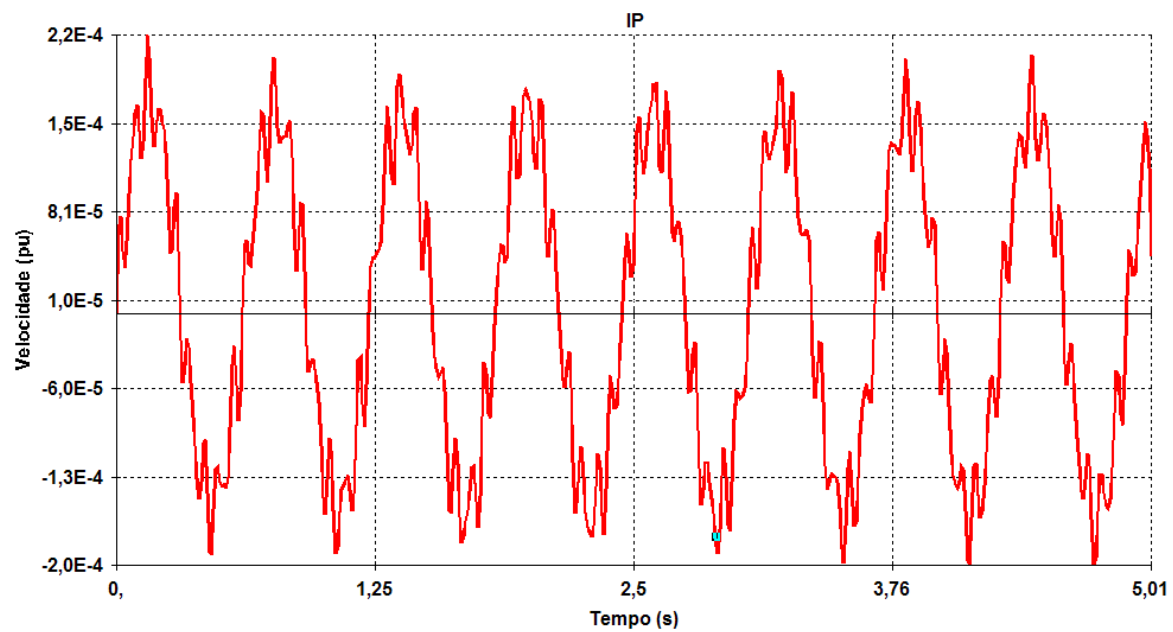


Figura 6.12 - Velocidade da massa mecânica IP

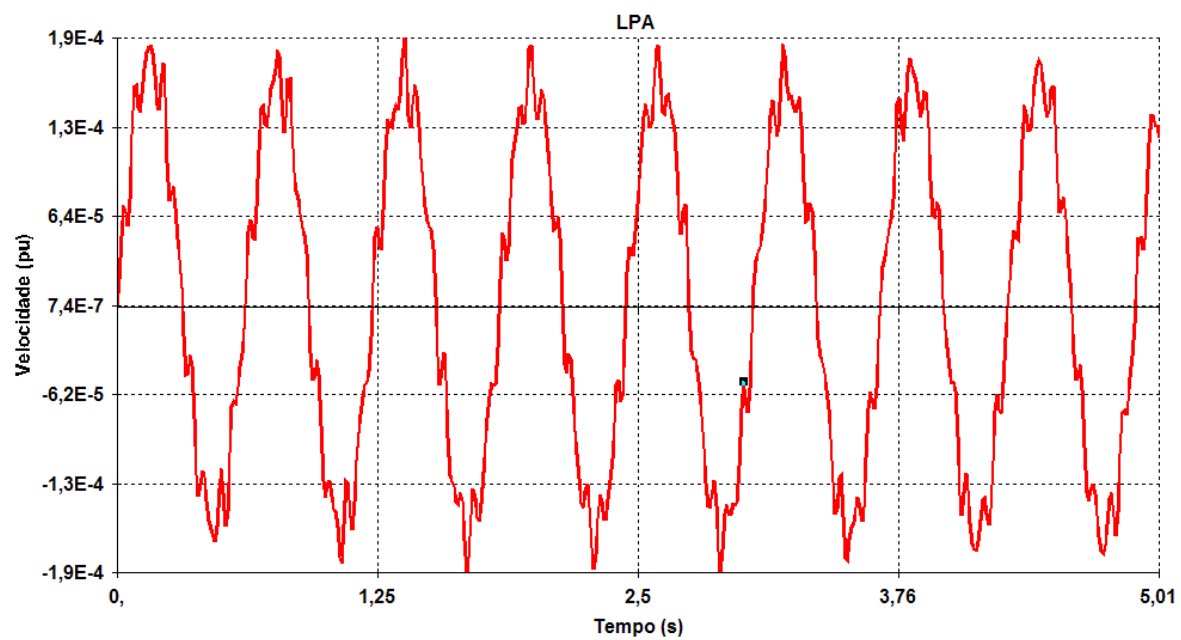


Figura 6.13 - Velocidade da massa mecânica LPA

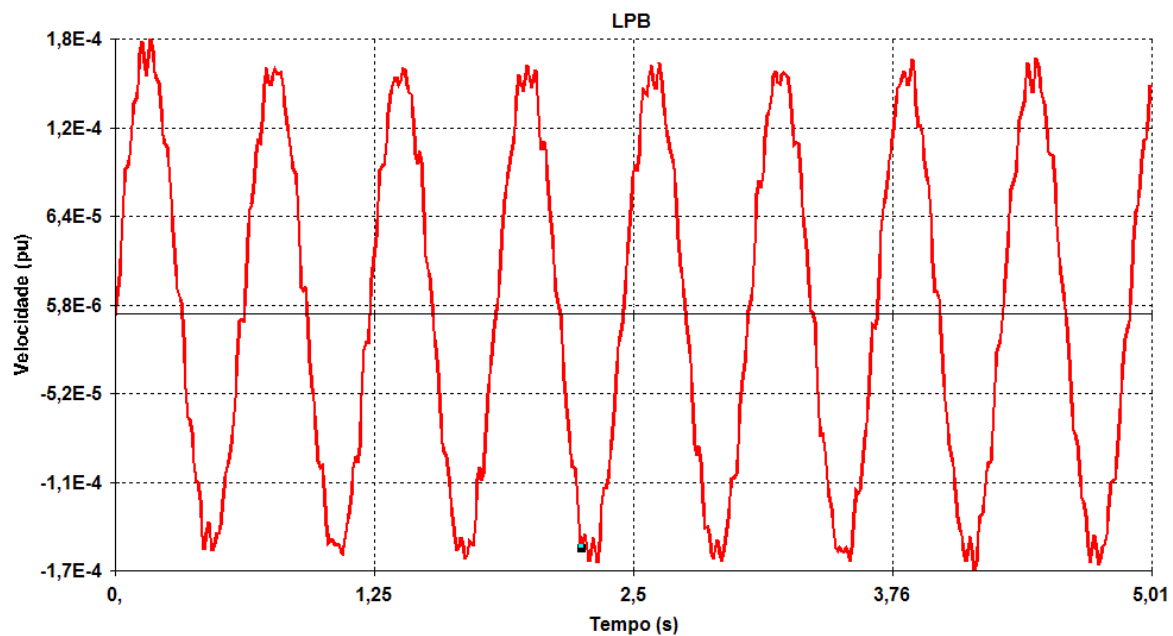


Figura 6.14 - Velocidade da massa mecânica LPB

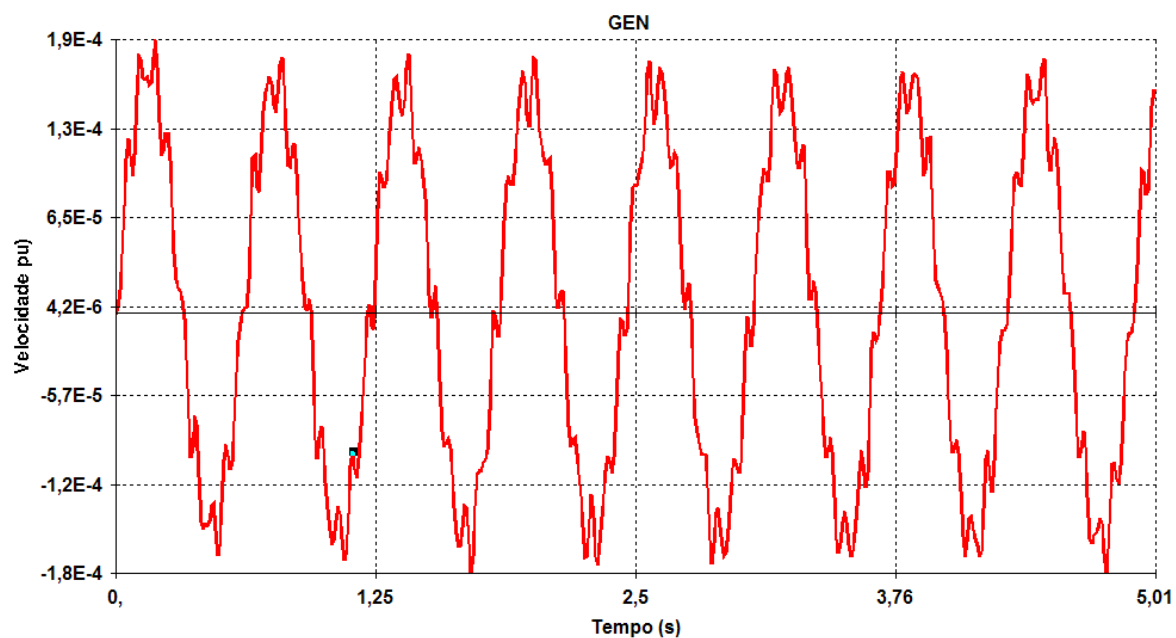


Figura 6.15 - Velocidade da massa mecânica GEN

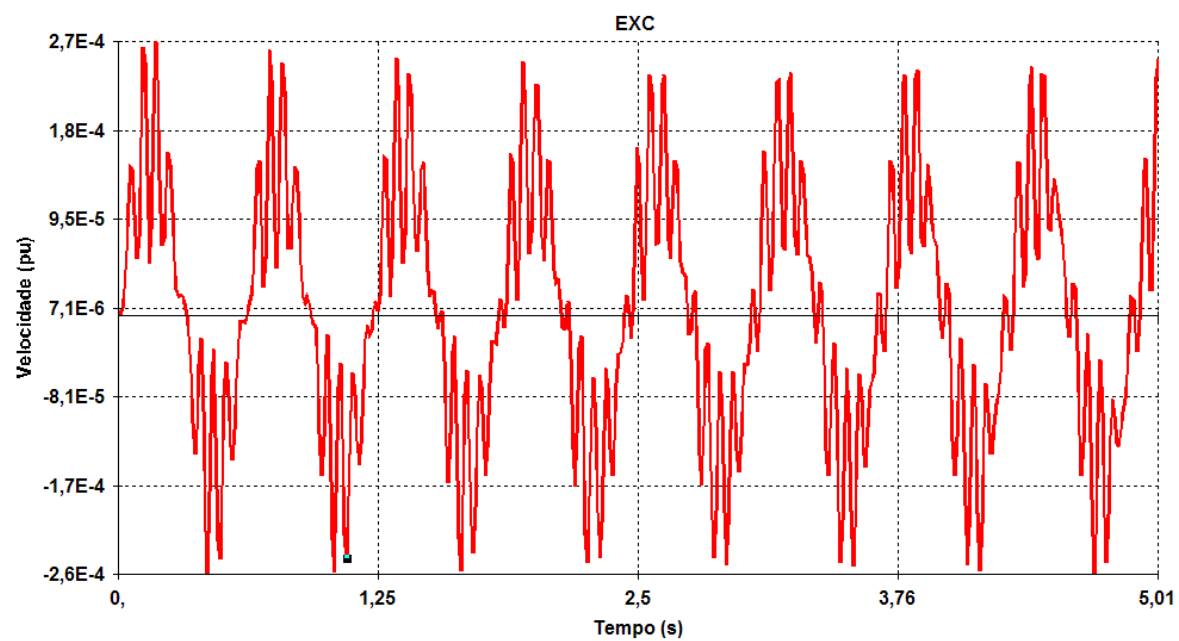


Figura 6.16 - Velocidade da massa mecânica EXC

6.6 AUTOVALORES DO SISTEMA PELO MÉTODO QZ

Utilizando o método QZ, será gerado no Plot CEPEL a relação de todos os autovalores que compõem o sistema elétrico. As curvas em vermelho, azul, rosa e cinza representam o amortecimento de 5%, 10%, 15% e 20%.

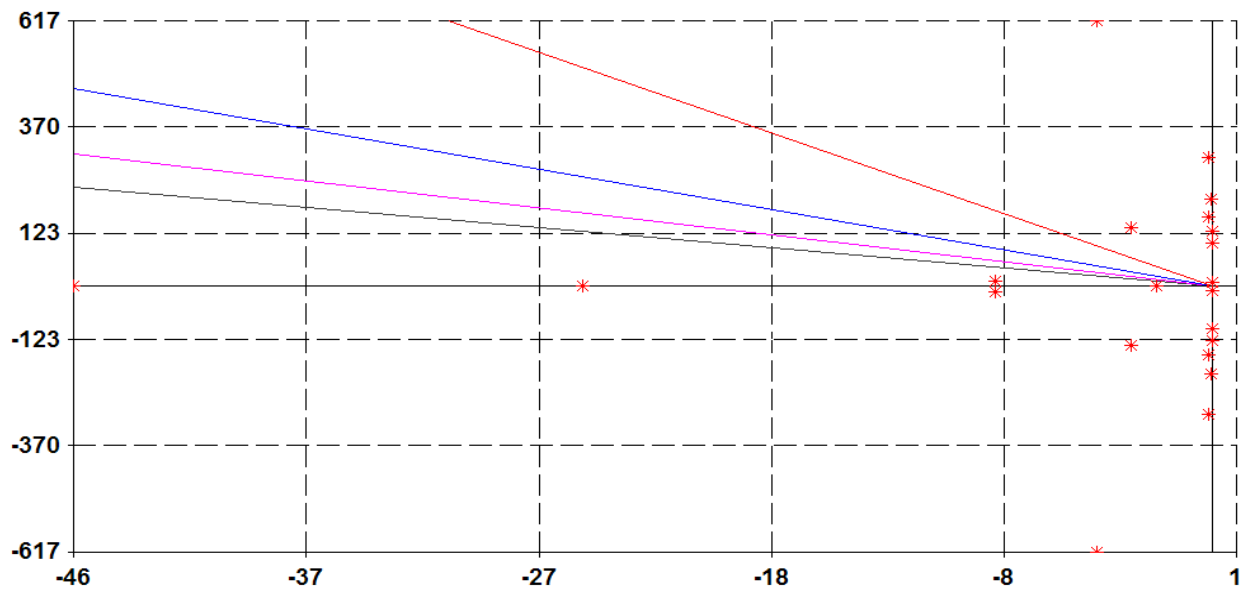


Figura 6.17 - Autovalores do sistema com regulador de tensão

Tabela 6.3 - Autovalores do sistema com regulador de tensão

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	▲ Damp (%)
1	0.00428	10.287	10.287	1.6372	-0.04161
2	0.00428	-10.287	10.287	-1.6372	-0.04161
3	-0.00146	127.23	127.23	20.249	0.00115
4	-0.00146	-127.23	127.23	-20.249	0.00115
5	-0.00618	99.798	99.798	15.883	0.00620
6	-0.00618	-99.798	99.798	-15.883	0.00620
7	-0.01507	202.79	202.79	32.275	0.00743
8	-0.01507	-202.79	202.79	-32.275	0.00743
9	-0.1379	298.18	298.18	47.456	0.04623
10	-0.1379	-298.18	298.18	-47.456	0.04623
11	-0.1209	160.28	160.28	25.510	0.07543
12	-0.1209	-160.28	160.28	-25.510	0.07543
13	-4.6330	616.63	616.64	98.139	0.7513
14	-4.6330	-616.63	616.64	-98.139	0.7513
15	-3.2791	136.78	136.81	21.768	2.3968
16	-3.2791	-136.78	136.81	-21.768	2.3968
17	-8.7594	11.650	14.576	1.8541	60.096
18	-8.7594	-11.650	14.576	-1.8541	60.096
19	-45.941	0.	45.941	0.	100.00
20	-25.417	0.	25.417	0.	100.00
21	-2.2276	0.	2.2276	0.	100.00

As frequências naturais de oscilações eletromecânicas tem um faixa de variação de 0,1 Hz a 2,5 Hz, enquanto a frequência de oscilação dos modos entre as massa do conjunto turbina-gerador se encontram na faixa de 5 Hz a 50 Hz [4]. Os autovalores representam o modo eletromecânico, cinco modos torcionais, modo subsíncrono e o supersíncrono.

O modo eletromecânico é representado pela oscilação do rotor inteiro contra o sistema de potência [1]. Os dois autovalores que correspondem a esse modo apresentam parte real positiva em 0.00428 e amortecimento negativo de -0.04161, indicando que estão no semiplano direito e a velocidade do rotor do conjunto turbina-gerador tende a aumentar e o sistema se tornar instável, conforme tabela 6.3.

Para um sistema qualquer, um rotor que apresente n massas mecânicas tem $n-1$ modos torcionais [1]. O rotor em análise tem seis massas mecânicas e cinco modos torcionais, cada um representado por uma frequência (15.8Hz, 20.2 Hz, 25.5 Hz, 38.2 Hz e 47.4 Hz).

Tabela 6.4 – Modos para pólos com regulador de tensão

Pólos com regulador de tensão	Frequência. (Hz)	Modo
$-4.6337 + j 616.62$	98.139	Supersíncrono
$-3.3300 + j 136.79$	21.768	Subsíncrono
$-0.1379 + j 298.18$	47.456	Torcional
$-0.01507 + j 202.79$	32.275	Torcional
$-0.01209 + j 160.28$	25.510	Torcional
$-0.00146 + j 127.23$	20.249	Torcional
$-0.00618 + j 99.798$	15.883	Torcional
$0.00428 + j 10.287$	1.637	Eletromecânico

-45.941	0	Gerador
-25.417	0	Gerador
-2.2276	0	Gerador

Não ocorre o fenômeno de ressonância subsíncrona, pois, apesar de a frequência do modo subsíncrono se aproximar do modo torcional de 20.249 Hz, este tem autovalores com parte real negativa, não gerando troca de energia entre a rede elétrica e o conjunto turbina-gerador nessa frequência natural.

As frequências do modo subsíncrono e supersíncrono somam praticamente 120 Hz.

6.7 VERIFICANDO O FENÔMENO DA RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA PARA NOVOS VALORES DE X_C

Para verificar o fenômeno de ressonância subsíncrona, alteraremos o valor da reatância capacitiva X_C , de forma que o complementar da frequência natural de oscilação da rede se aproxime da frequência dos modos torcionais, para os seguintes valores:

$$X_C = X_L \left(1 - \frac{f_{re}}{f} \right)^2 = \left(\frac{0.135 + 0.2}{2} + 0.7 \right) \left(1 - \frac{15.883}{60} \right)^2 = 0.469 pu \quad (6.1)$$

$$X_C = X_L \left(1 - \frac{f_{re}}{f} \right)^2 = \left(\frac{0.135 + 0.2}{2} + 0.7 \right) \left(1 - \frac{20.249}{60} \right)^2 = 0.38 pu \quad (6.2)$$

$$X_C = X_L \left(1 - \frac{f_{re}}{f} \right)^2 = \left(\frac{0.135 + 0.2}{2} + 0.7 \right) \left(1 - \frac{25.51}{60} \right)^2 = 0.286 pu \quad (6.3)$$

$$X_C = X_L \left(1 - \frac{f_{re}}{f} \right)^2 = \left(\frac{0.135 + 0.2}{2} + 0.7 \right) \left(1 - \frac{32.275}{60} \right)^2 = 0.185 pu \quad (6.4)$$

$$X_C = X_L \left(1 - \frac{f_{re}}{f} \right)^2 = \left(\frac{0.135 + 0.2}{2} + 0.7 \right) \left(1 - \frac{47.456}{60} \right)^2 = 0.038 pu \quad (6.5)$$

Como podemos notar, à medida que o valor das capacitâncias diminui, o valor da frequência subsíncrona da rede aumenta e o da supersíncrona diminui. A seguir são apresentados todos os autovalores do sistema para as reatâncias capacitivas das equações 5.19, 5.20, 5.21.

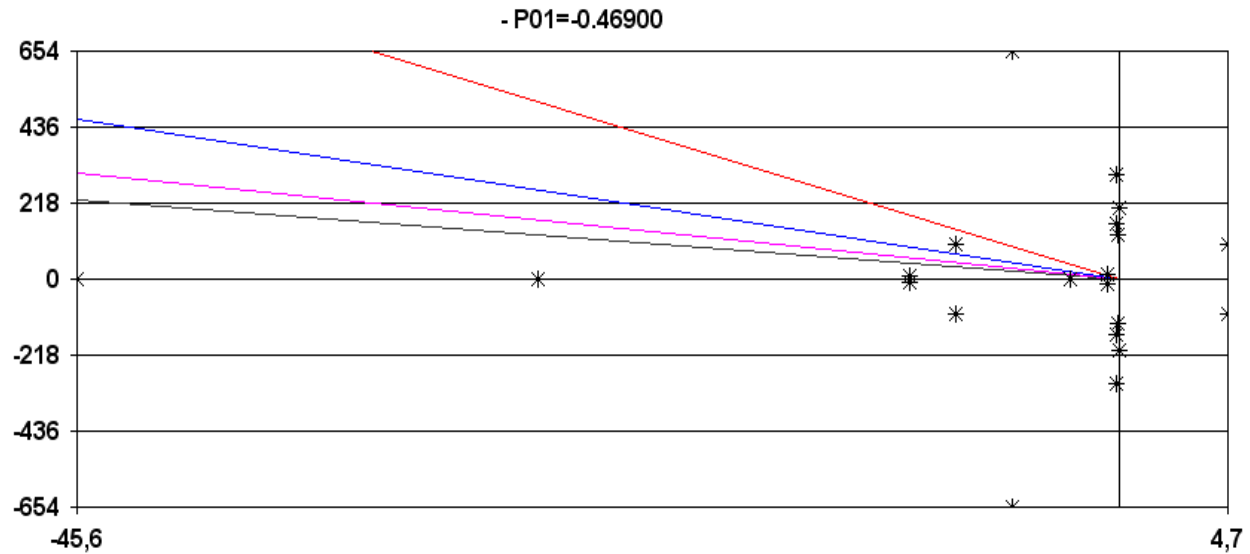


Figura 6.18– Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.469 pu

Tabela 6.5 – Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.469 pu

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	-4,6584	654,40	654,41	104,15	0,7118
2	-4,6584	-654,40	654,41	-104,15	0,7118
3	-0,1379	298,18	298,18	47,456	0,04623
4	-0,1379	-298,18	298,18	-47,456	0,04623
5	-0,01805	202,83	202,83	32,282	0,00890
6	-0,01805	-202,83	202,83	-32,282	0,00890
7	-0,1494	160,46	160,46	25,537	0,09312
8	-0,1494	-160,46	160,46	-25,537	0,09312
9	-0,07009	126,92	126,92	20,201	0,05522
10	-0,07009	-126,92	126,92	-20,201	0,05522
11	-7,1578	99,418	99,676	15,823	7,1811
12	-7,1578	-99,418	99,676	-15,823	7,1811
13	4,7372	99,307	99,420	15,805	-4,7648
14	4,7372	-99,307	99,420	-15,805	-4,7648
15	-45,598	0.	45,598	0.	100,00
16	-25,432	0.	25,432	0.	100,00
17	-9,1916	10,794	14,177	1,7180	64,832
18	-9,1916	-10,794	14,177	-1,7180	64,832
19	-0,5073	11,865	11,876	1,8884	4,2714
20	-0,5073	-11,865	11,876	-1,8884	4,2714
21	-2,1473	0.	2,1473	0.	100,00

Ocorre ressonância subsíncrona pela troca de energia entre o modo torcional de frequência 15.805 Hz e o modo subsíncrono, como mostrado pela instabilidade no sistema gerada pela parte real dos autovalores $4.73 \pm j99.307$.

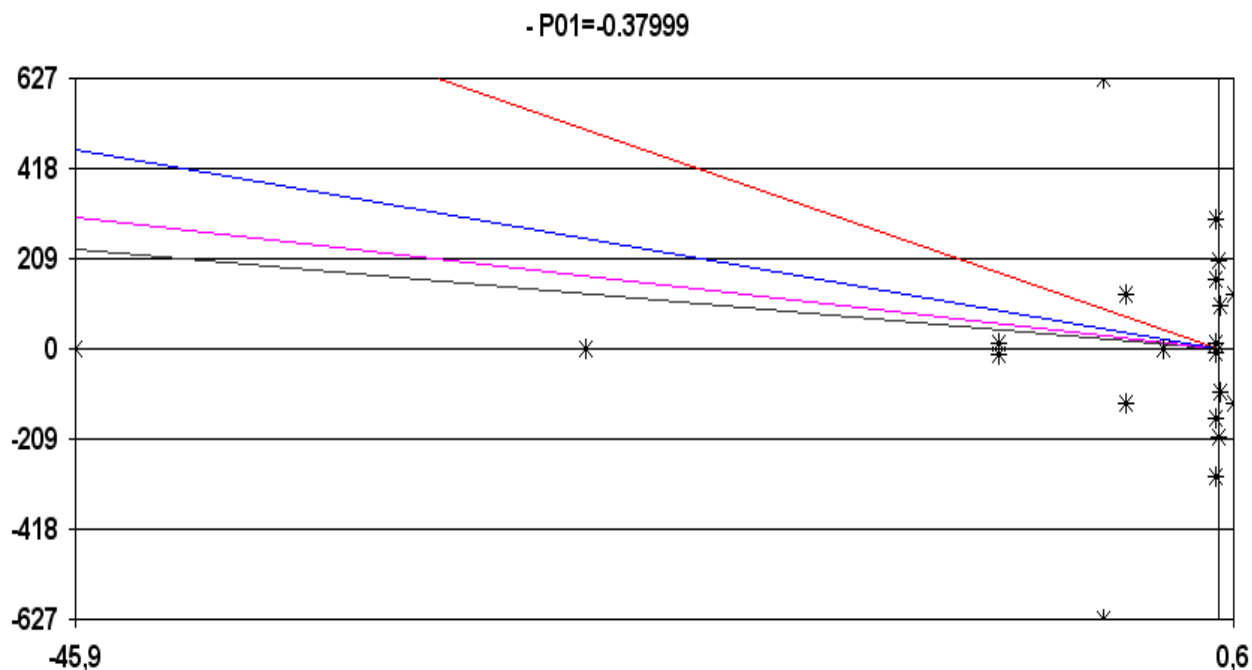


Figura 6.19 – Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.38 pu

Tabela 6.6 – Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.38 pu

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	-4,6401	626,69	626,70	99,740	0,7404
2	-4,6401	-626,69	626,70	-99,740	0,7404
3	-0,1379	298,18	298,18	47,456	0,04623
4	-0,1379	-298,18	298,18	-47,456	0,04623
5	-0,01629	202,80	202,80	32,277	0,00803
6	-0,01629	-202,80	202,80	-32,277	0,00803
7	-0,1384	160,37	160,37	25,523	0,08631
8	-0,1384	-160,37	160,37	-25,523	0,08631
9	0,5838	126,92	126,92	20,200	-0,4600
10	0,5838	-126,92	126,92	-20,200	-0,4600
11	-3,7466	126,56	126,62	20,143	2,9590
12	-3,7466	-126,56	126,62	-20,143	2,9590
13	0,05136	100,14	100,14	15,937	-0,05129
14	0,05136	-100,14	100,14	-15,937	-0,05129
15	-45,878	0.	45,878	0.	100,00
16	-25,421	0.	25,421	0.	100,00
17	-8,8508	11,492	14,505	1,8290	61,019
18	-8,8508	-11,492	14,505	-1,8290	61,019
19	-0,09115	10,634	10,635	1,6925	0,8571
20	-0,09115	-10,634	10,635	-1,6925	0,8571
21	-2,2129	0.	2,2129	0.	100,00

Os autovalores que representam o modo torcional de frequência 20.2 Hz têm valor da parte real positiva e frequência com valores próximos ao do modo subsíncrono, indicando o fenômeno

de ressonância subsíncrona. Existem dois modos instáveis, mas somente o que apresenta frequência aproximada em relação ao modo subsíncrono provoca a ressonância.

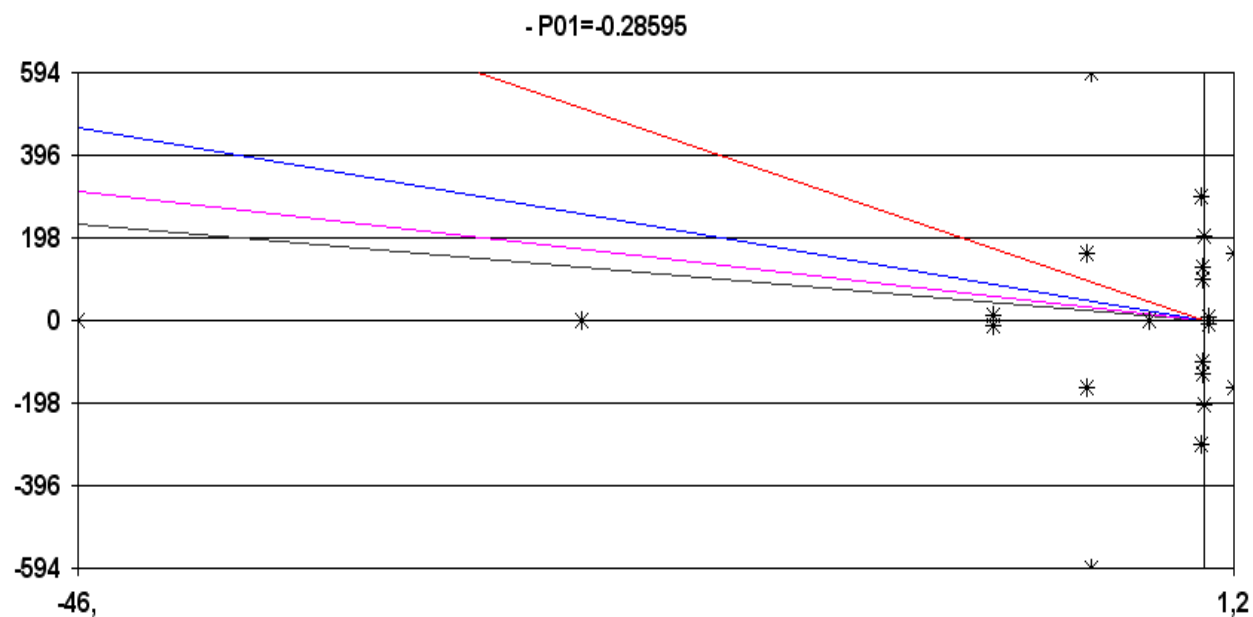


Figura 6.20 – Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.286 pu

Tabela 6.7 – Autovalores do sistema com reatância capacitiva – 0.286 pu

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	-4,6160	593,58	593,60	94,472	0,7776
2	-4,6160	-593,58	593,60	-94,472	0,7776
3	-0,1379	298,18	298,18	47,456	0,04623
4	-0,1379	-298,18	298,18	-47,456	0,04623
5	-0,00805	202,73	202,73	32,265	0,00397
6	-0,00805	-202,73	202,73	-32,265	0,00397
7	1,2335	160,44	160,45	25,535	-0,7688
8	1,2335	-160,44	160,45	-25,535	-0,7688
9	-4,8161	160,26	160,33	25,506	3,0038
10	-4,8161	-160,26	160,33	-25,506	3,0038
11	-0,06885	127,07	127,07	20,224	0,05418
12	-0,06885	-127,07	127,07	-20,224	0,05418
13	-0,04575	99,443	99,443	15,827	0,04601
14	-0,04575	-99,443	99,443	-15,827	0,04601
15	-46,044	0.	46,044	0.	100,00
16	-25,411	0.	25,411	0.	100,00
17	-8,5903	11,916	14,690	1,8965	58,479
18	-8,5903	-11,916	14,690	-1,8965	58,479
19	0,1607	9,6221	9,6235	1,5314	-1,6703
20	0,1607	-9,6221	9,6235	-1,5314	-1,6703
21	-2,2518	0.	2,2518	0.	100,00

Os autovalores que representam o modo torcional de frequência 25.535 Hz têm valor da parte real positiva e frequência com valores próximos ao do modo subsíncrono, indicando o fenômeno de ressonância subsíncrona

6.8 SISTEMA SEM O USO DO REGULADOR DE TENSÃO

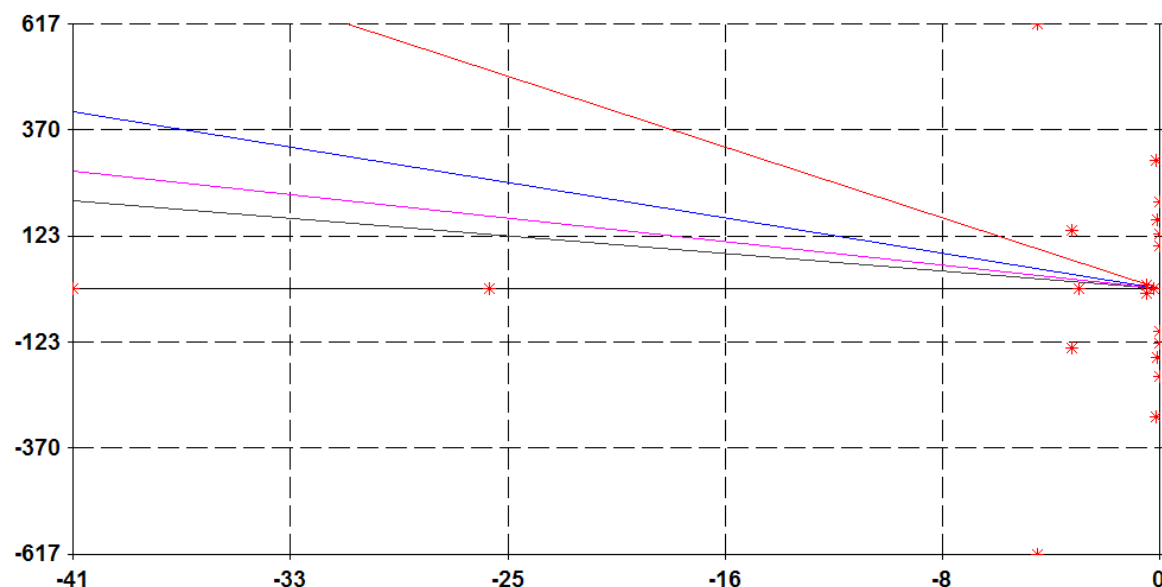


Figura 6.21 – Autovalores do sistema sem regulador de tensão

Tabela 6.8 – Autovalores do sistema sem regulador de tensão

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Δ Damp(%)
1	-0.00002	127.23	127.23	20.249	0.00002
2	-0.00002	-127.23	127.23	-20.249	0.00002
3	-0.00070	99.797	99.797	15.883	0.00070
4	-0.00070	-99.797	99.797	-15.883	0.00070
5	-0.01505	202.79	202.79	32.274	0.00742
6	-0.01505	-202.79	202.79	-32.274	0.00742
7	-0.1395	298.18	298.18	47.456	0.04679
8	-0.1395	-298.18	298.18	-47.456	0.04679
9	-0.1210	160.28	160.28	25.510	0.07549
10	-0.1210	-160.28	160.28	-25.510	0.07549
11	-4.6337	616.62	616.64	98.139	0.7514
12	-4.6337	-616.62	616.64	-98.139	0.7514
13	-3.3300	136.79	136.83	21.770	2.4337
14	-3.3300	-136.79	136.83	-21.770	2.4337
15	-0.4878	10.319	10.331	1.6424	4.7222
16	-0.4878	-10.319	10.331	-1.6424	4.7222
17	-41.198	0.	41.198	0.	100.00
18	-25.425	0.	25.425	0.	100.00
19	-3.0734	0.	3.0734	0.	100.00
20	-0.2486	0.	0.2486	0.	100.00

O regulador de tensão exerce forte impacto no modo eletromecânico reduzindo o amortecimento do sistema. Isto pode implicar em diversos problemas na operação do sistema de potência, levando o sistema a condição de instabilidade mesmo sem a existência de uma falta. Nos modos torcionais essa interação com o regulador de tensão não é tão forte e este contribui para aumentar o amortecimento nesses modos.

Tabela 6.9 – Modos para pólos sem regulador de tensão

Pólos sem regulador de tensão	Frequência. (Hz)	Modo
$-4.6337 + j 616.62$	98.139	Supersíncrono
$-3.3300 + j 136.79$	21.77	Subsíncrono
$-0.1395 + j 298.18$	47.456	Torcional
$-0.01505 + j 202.79$	32.274	Torcional
$-0.01210 + j 160.28$	25.510	Torcional
$-0.000002 + j 127.23$	20.249	Torcional
$-0.0007 + j 99.798$	15.883	Torcional
$0.4878 + j 10.319$	1.6424	Eletromecânico
-41.198	0	Gerador
-25.4215	0	Gerador
-3.0734	0	Gerador

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O desenvolvimento industrial, científico e econômico trouxe muito conforto para o homem moderno. Mas a cada dia se percebe uma maior demanda de energia para suprir as novas necessidades do mundo civilizado.

Certamente o ramo de produção e distribuição de energia crescerá significativamente ainda. Todos os países que hoje não poupam esforços para terem usinas geradoras têm como objetivo suprir suas necessidades para garantir o crescimento e o bem-estar da população.

Além de se produzir energia, é necessário distribuí-la aos centros consumidores, que estão a cada dia mais distantes dos centros geradores de energia. Nesse âmbito, faz-se necessário o uso de ferramentas que permitam estudar fenômenos abordados no presente trabalho, como os que ocorrem devido a perturbações nas linhas de transmissão. Uma dessas ferramentas, o PacDyn,

faz simulações nos sistemas elétricos de potência, permitindo aos especialistas melhor compreensão e operação destes em segurança.

Nessa monografia estudou-se as oscilações, em particular a ressonância subsíncrona. Exemplos foram dados no capítulo 6 para provar a eficiência dessa ferramenta computacional na análise desse fenômeno.

Uma sugestão para estudo futuro visando melhorar a capacidade de transmissão da linha com a inclusão de dispositivos como banco de capacitores shunt, compensadores estáticos e compensadores série de capacitores e evitar possíveis ocorrências de fenômenos relacionados a sub-ressonância poderia ser aplicado ao parque térmico da região de Cuiabá, conforme figura 7.1.

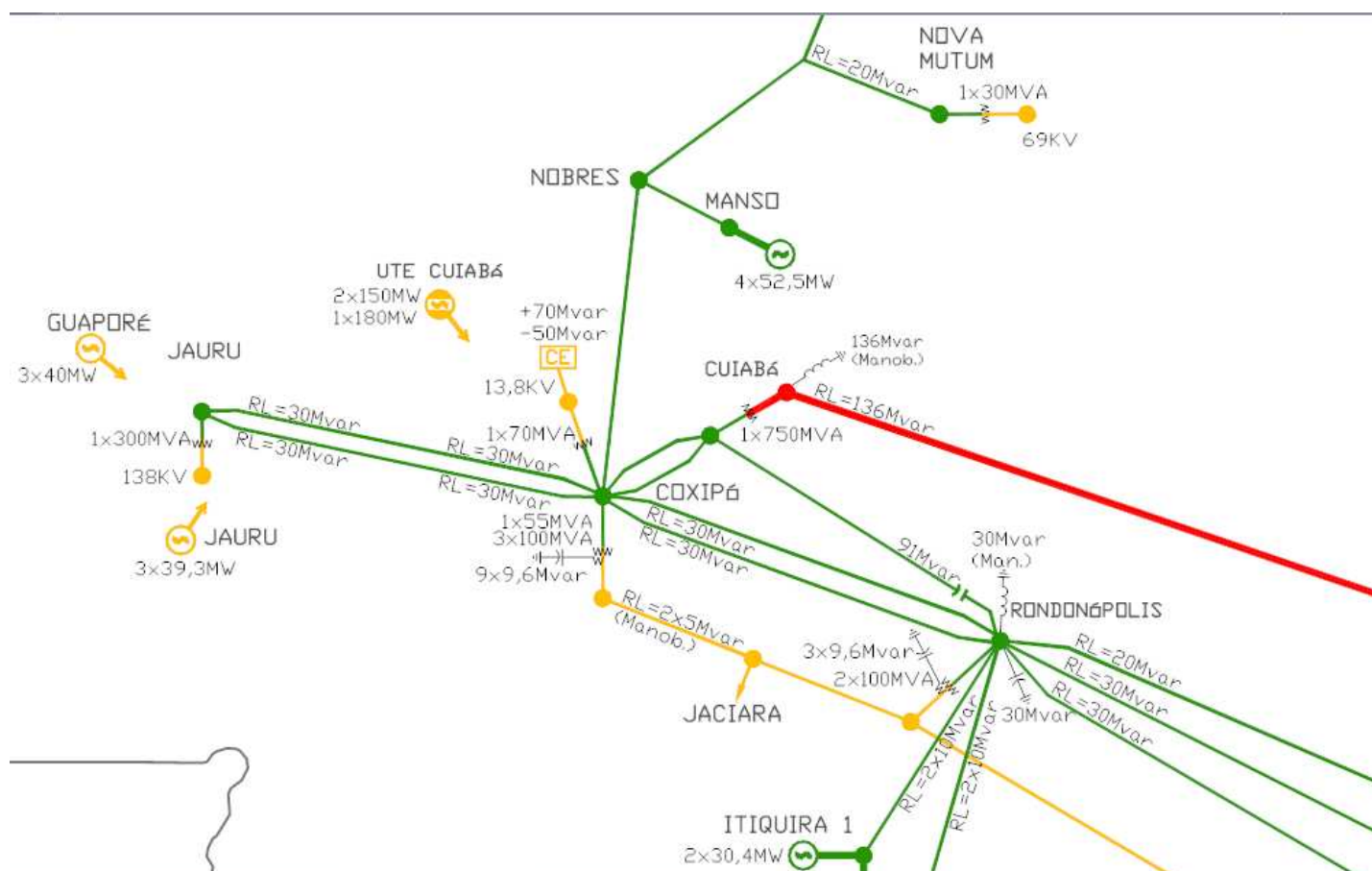


Figura 7.1 – Sistema energético nas proximidades de Cuiabá

Concluimos que as simulações e análises feitas permitiram confrontar resultados computacionais e alguns resultados teóricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kundur, Pabra. “Power System Stability and Control”. 1ª Edição, 1994, Editora MCGRAW-HILL.
- [2] Persson, Jonas. Linear Models of Non-linear Power System Components. Stockholm, 2002, pg 95-100.
- [3] Martini, Craig M., Overbye, Thomas J. Visualization of Oscillation Mode Shapes and Participation Factors. University of Illinois at Urbana-Champaign
- [4] Tavares, Carlos André Andrade. Ressonância Subsíncrona e outras formas de instabilidade eletromecânica . Rio de Janeiro, 2005
- [5] http://media.wiley.com/product_data/excerpt/01/07803535/0780353501-2.pdf
- [6] Nise, S. N. Engenharia de sistemas de controle, LTC, Rio de Janeiro. 2002.
- [7] Ogata, K. Engenharia de controle Moderno, 4.ª Edição, Prentice Hall, São Paulo. 2003.
- [8] Junior, Sérgio Gomes, Martins, Nelson. Subsynchronous Resonance Results Obtained with a Comprehensive Small-Signal Stability Program, IX SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING. Rio de Janeiro, 2004.
- [9] <http://www.pacdyn.cepel.br/ssrmodule.htm>