

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA A PEQUENOS  
SINAIS

LUCAS GUIMARÃES LINS BRANDÃO

ORIENTADOR: FRANCISCO DAMASCENO FREITAS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: ENE – 01/2006

BRASÍLIA / DF: AGOSTO – 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA A PEQUENOS  
SINAIS

LUCAS GUIMARÃES LINS BRANDÃO

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.

APROVADO POR:

---

Prof. Francisco Damasceno Freitas, Dr. (ENE – Universidade de Brasília)  
(Orientador)

---

Prof. Luís Filomeno de Jesus Fernandes, Mestre (ENE – Universidade de Brasília)  
(Examinador Interno)

---

Prof. George Lauro R. de Brito, Mestre (UFT - Universidade Federal do Tocantins)  
(Examinador Externo)

Brasília / DF, 07 de Agosto de 2006

## FICHA CATALOGRÁFICA

BRANDÃO, LUCAS GUIMARÃES LINS

Ferramentas Computacionais Para Análise de Estabilidade de Sistemas de Potência a Pequenos Sinais. [Distrito Federal] 2006.

xi, 83 páginas, 297 mm (ENE / FT / UnB, Engenheiro Eletricista, 2006). Monografia de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Estabilidade

3. PacDyn

I. ENE / FT / UnB

2. Pequenos Sinais

4. Autovalores dominantes

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRANDÃO, LUCAS G. L. (2006). Ferramentas Computacionais Para Análise de Estabilidade de Sistemas de Potência a Pequenos Sinais. Monografia de Graduação, Publicação ENE 01/2006, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 páginas.

## CESSÃO DE DIREITOS:

AUTOR: Lucas Guimarães Lins Brandão.

TÍTULO: Ferramentas Computacionais Para Análise de Estabilidade de Sistemas de Potência a Pequenos Sinais.

GRAU / ANO: Engenheiro Eletricista / 2006

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. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Lucas Guimarães Lins Brandão  
Brasília – DF

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio que me tem dado.

Aos meus amigos próximos que sempre estão por perto quando preciso.

Aos colegas de curso de Engenharia Elétrica.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, por transmitir o seu conhecimento para os alunos, principalmente ao Professor Francisco Damasceno Freitas, orientador deste trabalho.

## RESUMO

### FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA A PEQUENOS SINAIS.

Autor: Lucas Guimarães Lins Brandão

Orientador: Francisco Damasceno Freitas

Palavras-Chave: Estabilidade, Pequenos Sinais, PacDyn, Autovalores dominantes.

Brasília, 07 de Agosto de 2006.

Ferramentas computacionais têm aplicação fundamental em sistemas elétricos de potência, porque por meio delas é possível simular o comportamento do sistema. Técnicas lineares, quando adequadamente empregadas, servem para avaliar o desempenho e a tendência do sistema. Neste contexto, o programa PacDyn desenvolvido pelo CEPEL é uma eficiente ferramenta utilizada por empresas do setor elétrico, institutos de pesquisa e universidades para estudos de perturbações a pequenos sinais em sistemas de potência. Embora apresente várias apresentações ao usuário, a interface do programa, em muitas situações, pode ser melhorada visando torná-la mais amigável ao usuário.

Este trabalho investiga o desempenho do programa frente a algumas técnicas nele programadas. A avaliação é verificada por meio de testes em dois sistemas de potência, sendo um deles de pequeno porte e outro de grande porte. Testes são verificados para avaliar a funcionalidade do programa considerando diagramas de bode, diagrama de Nyquist, cálculo de autovalores dominantes e simulação linear no tempo. Exemplos ilustrativos mostram como ficam as saídas e os resultados. O programa é utilizado para gerar arquivos padrões que podem ser utilizados no ambiente MATLAB. Além disso, aplicações são mostradas evidenciando o uso do programa para a análise de estabilidade e para projeto de estabilizadores.

## SUMÁRIO:

1 – INTRODUÇÃO .....	1
2 – O PROGRAMA PacDyn .....	3
3 – MODELAGEM E METODOLOGIA .....	5
3.1 – MODELAGEM DE SISTEMAS DE POTÊNCIA .....	5
3.2 – METODOLOGIA .....	7
4 – CASOS BASE .....	9
5 – TÉCNICAS LINEARES .....	10
5.1 – COMANDOS BÁSICOS .....	10
5.2 – AUTOVALORES .....	12
5.3 – FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA .....	16
5.4 – SIMULAÇÃO .....	19
5.5 – OUTRAS OPÇÕES .....	21
6 – APLICAÇÕES PRÁTICAS .....	22
6.1 – EXEMPLO 1: Sistema FBM e Projeto de Estabilizador .....	23
6.2 – EXEMPLO 2: Sistema Norte-Sul .....	54
6.3 – EXEMPLO 3:	
Conversão PacDyn-MATLAB no Formato de Espaços de Estados ....	65
6.4 – EXEMPLO 4:	
Conversão PacDyn-MATLAB no Formato de Sistema Descritor .....	72
7 – CONCLUSÕES .....	78
REFERÊNCIAS .....	80

## ANEXO

ALGORITMO DO PROGRAMA MONTA_JAC .....	82
---------------------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Modelos de Máquinas Síncronas .....	6
Tabela 6.1 – Autovalores Calculados .....	25
Tabela 6.2 – Pólos Encontrados .....	60
Tabela 6.3 – Autovalores Encontrados no PacDyn .....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 – Janela Principal do PacDyn .....	10
Figura 5.2 – Janela do Gerenciador de Casos .....	11
Figura 5.3 – Janela do Gerenciador de Casos .....	12
Figura 5.4 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência .....	13
Figura 5.5 – Adição de Novos “Shifts” .....	14
Figura 5.6 – Janela de Opções .....	16
Figura 5.7 – Gerenciador de Funções de Transferências .....	17
Figura 5.8 – Gerenciador de Funções de Transferência .....	17
Figura 5.9 – Editor do Somador de Entrada .....	18
Figura 5.10 – Janela Principal .....	19
Figura 5.11 – Parâmetros de Simulação .....	20
Figura 6.1 – Modelo Simplificado de um Sistema Elétrico com Duas Barras .....	23
Figura 6.2 – Diagrama de Blocos do Regulador Automático de Tensão .....	23
Figura 6.3 – Gerenciador de Casos .....	24
Figura 6.4 – Janela Principal .....	25
Figura 6.5 – Gerenciador de Funções de Transferência .....	26
Figura 6.6 – Resposta no Tempo a um Degrau .....	27
Figura 6.7 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência .....	28
Figura 6.8 – Janela Principal .....	29
Figura 6.9 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência .....	29
Figura 6.10 – Janela Principal .....	30
Figura 6.11 – Respostas no Tempo de Frequência para um Pólo Dominante .....	31



Figura 6.12 – Resposta no Tempo para os Outros Pólos Calculados .....	32
Figura 6.13 – Resposta no Tempo de Todos os Pólos Calculados .....	33
Figura 6.14 – Gerenciador de Funções de Transferências .....	33
Figura 6.15 – Parâmetros de Simulação .....	34
Figura 6.16 – Diagrama de Nyquist .....	35
Figura 6.17 – Diagramas de BODE de Ganho e Fase .....	36
Figura 6.18 – Diagramas de BODE de Ganho e Fase .....	37
Figura 6.19 – Gerenciador do Gráfico .....	38
Figura 6.20 – Calculadora .....	39
Figura 6.21 – Calculadora .....	40
Figura 6.22 – Diagrama do Sistema com Realimentação Positiva .....	41
Figura 6.23 – Opções para o Controlador Definido pelo Usuário (UDC) .....	42
Figura 6.24 – Projeto do Estabilizador .....	43
Figura 6.25 – Diagrama de Blocos do Funcionamento do Estabilizador .....	43
Figura 6.26 – Resposta em Frequência (Diagrama de BODE de Ganho) .....	44
Figura 6.27 – Diagrama de BODE Traçado no MATLAB .....	45
Figura 6.28 – Frequência de Centro a Ser Escolhida .....	46
Figura 6.29 – Diagrama de Nyquist do Sistema não Compensado (Vermelho) e do Compensador (Azul) .....	47
Figura 6.30 – Diagrama de Nyquist do Sistema Não-Compensado (Vermelho), do Compensador Inicial (Azul) e do Compensador Melhorado (Rosa) .....	48
Figura 6.31 – Diagrama de Nyquist do Sistema Não-Compensado (Vermelho), do Compensador Inicial (Azul), do Compensador Melhorado (Rosa) e do Compensador Final (Preto) .....	49
Figura 6.32 – Opções do Estabilizador Recém Projetado .....	50
Figura 6.33 – Janela Principal .....	51
Figura 6.34 – Gerenciador de Casos .....	51
Figura 6.35 – Resposta no Tempo ao Degrau .....	52
Figura 6.36 – Diagrama de Nyquist .....	53
Figura 6.37 – Aproximação no Diagrama de Nyquist .....	54
Figura 6.38 – Gráfico Mostrando os Pólos do Sistema .....	55

Figura 6.39 – Pólos do Sistema Próximos do Eixo Imaginário .....	56
Figura 6.40 – Resposta no Tempo de um Sistema a um Distúrbio por 10 Segundos .....	57
Figura 6.41 – Resposta no Tempo Durante 250 segundos de um Distúrbio .....	58
Figura 6.42 – Resposta no Tempo Comparando o Sistema Completo (Azul) com o Sistema Formado pelo Pólo Dominante Calculado (Vermelho) .....	59
Figura 6.43 – Diagrama de BODE Comparando o Sistema Completo (Azul) com o Sistema Formado pelo Pólo Dominante Calculado (Vermelho) .....	60
Figura 6.44 – Respostas dos Pólos Dominantes mais Próxima ao Sistema Completo .....	61
Figura 6.45 – Resposta no Tempo dos Pólos $-0,011429 \pm j 0,034521$ .....	62
Figura 6.46 – Diagrama de Nyquist para Amortecimento 10% .....	63
Figura 6.47 – Diagramas de BODE .....	64
Figura 6.48 – Janela Principal .....	65
Figura 6.49 – Escolha das Variáveis de Entrada e Saída do Espaço de Estados .....	66
Figura 6.50 – Autovalores encontrados no MATLAB .....	68
Figura 6.51 – Diagrama de Nyquist MATLAB .....	69
Figura 6.52 – Diagrama de Nyquist PacDyn .....	70
Figura 6.53 – Resposta no Tempo MATLAB .....	71
Figura 6.54 – Resposta no Tempo PacDyn .....	72
Figura 6.55 – Janela Principal .....	73
Figura 6.56 – Autovalores Encontrados no MATLAB .....	75
Figura 6.57 – Resposta no Tempo MATLAB .....	76
Figura 6.58 – Diagrama de Nyquist MATLAB .....	77

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACIONES:

AC: *Alternating Current* (Corrente Alternada).

ANDE: Administración Nacional de Eletricidad (Administração Nacional de Eletricidade).

ANEEL: Agencia Nacional de Energia Elétrica.

ANATEM: Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos.

ANAREDE: Programa de Análise de Redes.

AVR: *Automatic Voltage Regulator* (Regulador Automático de Tensão).

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

dB: Decibel.

DC: *Direct Current* (Corrente Direta ou Contínua).

FBM: *First Benchmark* (Primeiro Caso Referencial).

FACTS: *Flexible AC Transmission Systems* (Sistemas de Transmissão AC Flexíveis).

GM: *Gain Margin* (Margem de Ganho).

HVDC: *High-Voltage Direct Current* (Corrente Contínua em Alta Voltagem).

LGR: Lugar Geométrico das Raízes.

MATLAB: *Matrix Laboratory* (Laboratório Matricial).

MIMO: *Multiple Inputs and Multiple Outputs* (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas).

MISO: *Multiple Inputs and Single Outputs* (Múltiplas Entradas e Única Saída).

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PacDyn: Programa para Análise da Estabilidade Eletromecânica a Pequenas Perturbações.

PM: *Phase Margin* (Margem de Fase).

PSS: *Power System Stabilizer* (Estabilizador de Sistema de Potência).

Rad/s: Radianos por Segundo.

SIN: Sistema Interligado Nacional.

SISO: *Single Input and Single Output* (Única Entrada e Única Saída).

SIMO: *Single Input and Multiple Outputs* (Única Entrada e Múltiplas Saídas).

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um dos maiores sistemas de energia elétrica do mundo e tem inserido nele usinas de grande porte, como é o caso de Itaipu. Mesmo assim, o seu crescimento é inevitável, e com isso, aumenta também a sua complexidade.

O SIN abrange cerca de 98% do mercado de energia elétrica brasileiro sendo, aproximadamente, 85 % hidrelétrica, e os outros 15 %, de usinas termelétricas (número que pode aumentar com a construção de Usinas Nucleares, como Angra III). Para chegar à capacidade de produção total, temos que somar a capacidade interna de produção de energia com a disponibilidade de importação, tanto da Argentina como de Itaipu, da parte contratada da ANDE (Administración Nacional de Electricidad), empresa paraguaia [1].

Como qualquer sistema, o SIN vem sofrendo alguns problemas que afetam o seu funcionamento. Esses problemas existem desde o início dos sistemas elétricos e há muito vem sendo desenvolvidas diversas ferramentas e métodos para entendê-los e controlá-los. Com o crescente uso de novas tecnologias na área de comunicações, eletrônica, automação e controle, informática (programação), entre outras, as ferramentas computacionais estão mais avançadas, fazendo com que seja possível a tomada de decisões para resolver os problemas de forma cada vez mais rápida e precisa.

Atualmente, todos os agentes responsáveis por usinas de geração e linhas de transmissão do SIN, devem ser coordenados e controlados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que se encontra sob a supervisão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e tem suas normas próprias. Os agentes inseridos no SIN são responsáveis por suas ações e devem fornecer dados, formalmente, ao ONS, sobre suas decisões, assim como devem seguir suas orientações quanto ao modo de operar.

Para que as ações, tanto do ONS, como dos agentes, sejam bem coordenadas e suas decisões sempre tomadas de forma correta, todos os casos devem ser analisados criteriosamente. Programas computacionais desenvolvidos pelo Centro de pesquisa de

Energia Elétrica (CEPEL) auxiliam em muitas tomadas de decisão no SIN. Dentre esses programas, encontram-se o ANAREDE, ANATEM, PacDyn, PLOT CEPEL, entre outros.

Nesse contexto, o PacDyn é um aplicativo desenvolvido para análise de perturbações a pequenos sinais [2],[3],[4],[5], incluindo opção para ajuste de controladores do sistema. O PacDyn emprega algoritmos que utilizam técnicas computacionais avançadas para o cálculo de autovalores, zeros e resíduos de função de transferência, resposta no tempo e resposta em Frequência [6].

Este trabalho tem como objetivo avaliar as várias aplicações disponibilizadas pelo programa PacDyn e testá-las utilizando dois sistemas-teste, baseados em um sistema de potência de pequeno porte e outro de grande porte. Cálculo de autovalores dominantes, levantamento de função de transferência, diagrama de Bode e de Nyquist são verificados e ilustrados passo-a-passo, com o objetivo de tornar os procedimentos de cálculo mais claro ao usuário. A interface do programa com o MATLAB é explorada, realizando-se testes nos dois ambientes.

## 2. O PROGRAMA PacDyn

Dentre as suas principais aplicações estão a análise da estabilidade eletromecânica a pequenos sinais, análise de problemas de interação entre controles (velocidade, tensão) de máquinas, identificação rápida dos controladores do sistema com ajustes inadequados, projeto desses mesmos controladores, determinação das malhas de controle e combinação de sinais mais propícios à estabilização do sistema de potência. O PacDyn também é utilizado na escolha da melhor instalação de Estabilizadores de Sistema de Potência (“*Power System Stabilizer*” – PSS) em usinas geradoras e outros dispositivos FACTS em barras e circuitos, usados no amortecimento de modos de oscilações locais e inter-áreas.

Através do programa podemos fazer análises de respostas no tempo (respostas a distúrbios e incrementos de carga) e na frequência (Lugar Geométrico das Raízes – LGR –, alocação de Pólos, Margens de Ganho e Fase, características traçadas com o programa PLOT CEPEL), além de análise da estabilidade de tensão a pequenas perturbações e de problemas de Ressonância de Análise Subsíncrona. De acordo com uma função de transferência estabelecida é possível reduzir a ordem do sistema baseado nos seus Pólos Dominantes.

É possível, também, fazer um projeto coordenado de dispositivos para amortecimento de oscilações, considerando várias condições operativas; determinação automática de fronteiras de estabilidade a pequenos sinais, em função de variações paramétricas no sistema; verificação da robustez de controladores frente a grandes variações paramétricas no sistema e maximização dos limites de intercâmbio entre sistemas via otimização de controladores [7].

O PacDyn também é utilizado em conjunto com o PLOT CEPEL, programa que, utilizando os dados gerados pelo PacDyn, pode traçar diversas características como o gráfico do LGR, Diagrama de BODE (módulo e fase), diagrama de Nyquist, resposta no tempo, e também, permite projetar alguns tipos de compensadores.

Programando em forma de “Scripts” (Macros ou “Decks”), pode-se executar uma certa rotina ou função automaticamente.

A versão do programa PacDyn utilizada nesse trabalho será a 6.3.

### 3. MODELAGEM E METODOLOGIA

#### 3.1 Modelagem de Sistemas de Potência

O PacDyn, como já foi dito, trabalha com oscilações no sistema elétrico. Logo, o seu maior foco está nas máquinas geradoras do Sistema Elétrico. Como se sabe, a maioria dessas máquinas são de geração hidrelétrica e, portanto, são máquinas síncronas de pólos salientes. Dessa forma, a modelagem matemática delas é baseada no Modelo de Blondel, onde encontramos tensões, fluxos, potências, correntes, constantes de tempo (transitório e subtransitório) e reatâncias de quadratura (q) e direta (d) [8].

Levando isso em conta, podemos modelar a máquina de forma a obter diversos modelos para o estudo de estabilidade eletromecânica (com equações da máquina síncrona e de saturação), dependendo de quão complexo queremos fazer o nosso modelo (inserindo características transitórias e subtransitórias). O equacionamento desses modelos não será mostrado aqui, pois esse não é o foco do trabalho, mas na próxima página se encontra a Tabela 3.1 representando as principais características de cada um [9]:



**Tabela 3.1 – Modelos de Máquinas Síncronas**

Modelo	Descrição	Equações Elétricas		Enrolamentos					
		Diferencial	Algébrica	Armadura		Rotor			
				d	q	fd	kd	kq1	kq2
<b>1</b>	Reatância transitória de eixo direto $X'd$	–	Estado transitório $X'q = X'd$	x	x				
<b>2</b>	Representa efeitos transitórios do enrolamento de campo	$E'q$	Estado transitório $X'q = Xq$ $X'd \neq Xq$	x	x	x			
<b>3</b>	Representa efeitos transitórios dos dois enrolamentos do rotor	$E'q$ $E'd$	Estado transitório $X'q \neq X'd$	x	x	x		x	
<b>4</b>	Representa efeitos transitórios (campo e enrolamento) e subtransitório	$E'd$ $E'q$ $E''q$	Estado subtransitório $X''d \neq X''q$	x	x	x	x	x	
<b>5</b>	Representa efeito transitório e subtransitório nos dois eixos	$E'd$ $E'q$ $E''d$ $E''q$	Estado subtransitório $X''d \neq X''q$	x	x	x	x	x	x
<b>6</b>	Representa efeitos transitórios (campo e enrolamento) e subtransitório	$E''d$ $E'q$ $E''q$	Estado subtransitório $X''d \neq X''q$	x	x	x	x	x	
<b>7</b>	Representa efeito transitório e subtransitório nos dois eixos	$E'd$ $E'q$ $E''d$ $E''q$	Estado subtransitório $X''d \neq X''q$	x	x	x	x	x	x
<b>8</b>	Representa efeitos transitórios (campo e enrolamento) e subtransitório	$E''d$ $E'q$ $E''q$	Estado subtransitório $X''d \neq X''q$	x	x	x	x	x	

Da mesma forma, há uma modelagem dos sistemas de excitação da máquina, dos motores de indução, FACTs, HVDC, etc, mas para esses últimos, a modelagem é feita por diagrama de blocos, dessa forma fica mais simples o entendimento das mudanças causadas por eles nos sistemas estudados.

### 3.2 Metodologia

A estabilidade dos sistemas elétricos de potência vem sendo muito estudada ultimamente. Usando as técnicas de modelagem de sistemas (como no caso de um sistema composto por diversas máquinas síncronas), podemos descrever tal sistema na forma de espaços de estado. Suponhamos as equações do sistema descritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ 0 &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Observando o modelo acima, onde  $\mathbf{x}$  é uma variável de estado e  $\mathbf{r}$  uma variável algébrica, podemos então utilizar modelos de linearização, em um certo ponto de operação ( $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$  e  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ ), e chegar ao modelo de espaço de estados abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{c}_1 \ \mathbf{c}_2] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Consideremos a(s) entrada(s) do sistema como  $\mathbf{u}$ , e a(s) saída(s) como  $\mathbf{y}$ , além de  $\mathbf{c}_1$ ,  $\mathbf{c}_2$ ,  $\mathbf{b}_1$ ,  $\mathbf{b}_2$  como matrizes constantes de estado.

No programa PacDyn, cada fator  $\mathbf{J}$  da matriz acima, representa uma parte do sistema modelado. O fator  $\mathbf{J}_1$  será formado pela parte de componentes dinâmicos do

sistema (geradores, motores, HVDC, compensadores) e, conectado ao sistema elétrico,  $J_4$ , pelas matrizes  $J_2$  e  $J_3$  [9].

Com base nessas informações, podemos entender um pouco do funcionamento dos algoritmos numéricos do PacDyn em conjunto com o PLOT CEPEL.

#### 4. CASOS BASE

O programa PacDyn utiliza dois tipos de arquivos como casos base. O primeiro é o arquivo Histórico (.his). Nesse arquivo estão contidos os dados de rede que serão utilizados pelo programa, como os dados das linhas de transmissão, cargas, etc. O Arquivo Histórico é gerado pelo programa ANAREDE de acordo com o caso base utilizado, e não pode ser editado por um editor de texto.

Para se gerar um Arquivo Histórico é preciso utilizar o programa ANAREDE, de forma rodar um caso base de fluxo de potência e em seguida criar um Arquivo Histórico que será utilizado pelo programa PacDyn.

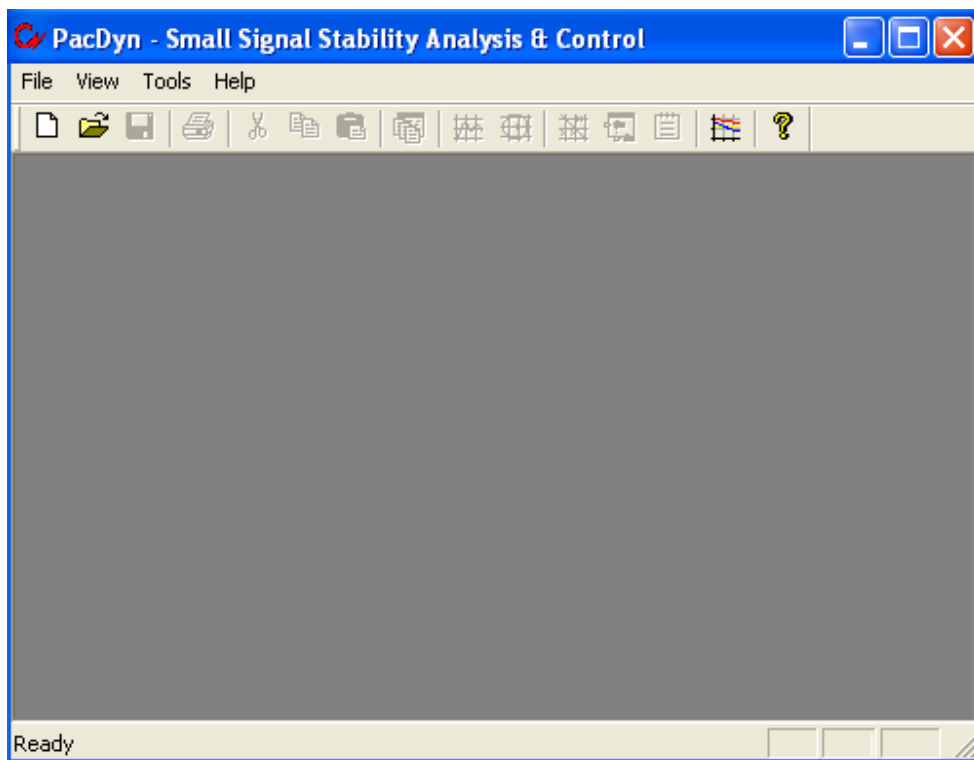
O segundo arquivo utilizado é o Dinâmico (.dyn), que pode ser editado em qualquer programa de edição de texto. Nesse arquivo serão indicados os componentes de controle das máquinas (HVDC, AVR, etc) e as características de cada máquina, como as suas impedâncias subtransitórias, constantes de inércia, e etc.

## 5. TÉCNICAS LINEARES



Serão apresentadas agora as Técnicas Lineares do programa PacDyn. Inicialmente serão mostrados os principais comandos básicos e, em seguida, os principais cálculos feitos com o programa.

### 5.1 Comandos Básicos

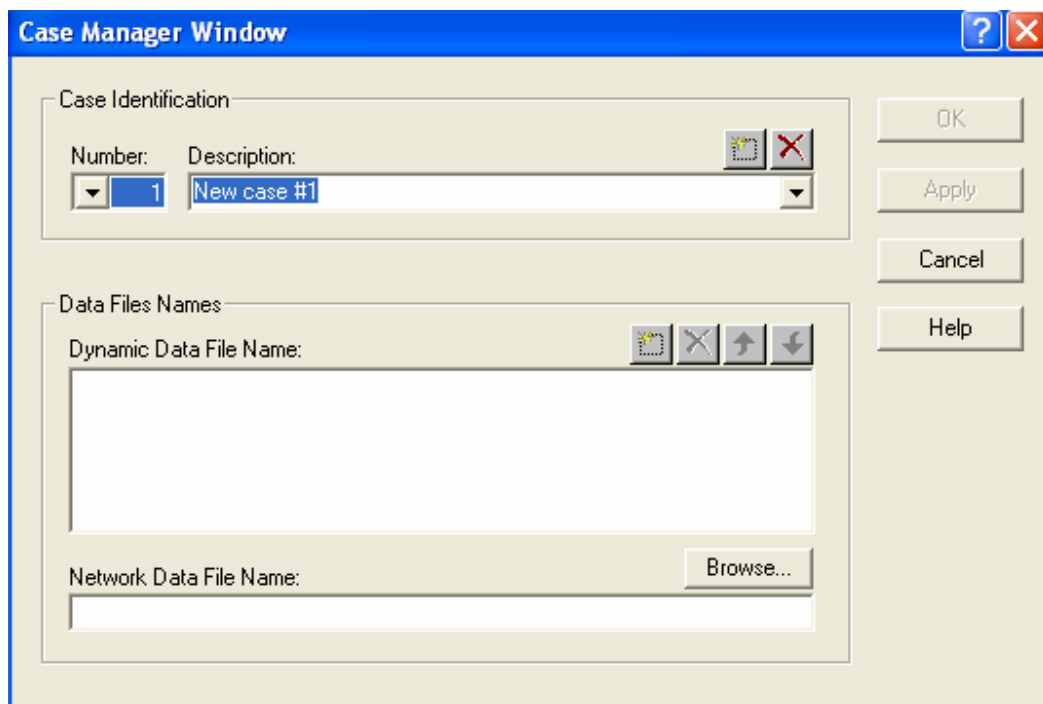
Agora que temos o conhecimento do objetivo do programa, precisamos conhecer o funcionamento da ferramenta, para que possamos executar as tarefas desejadas. Primeiramente, para nos familiarizarmos com o programa, observemos a janela principal do programa:




**Figura 5.1 – Janela Principal do PacDyn**

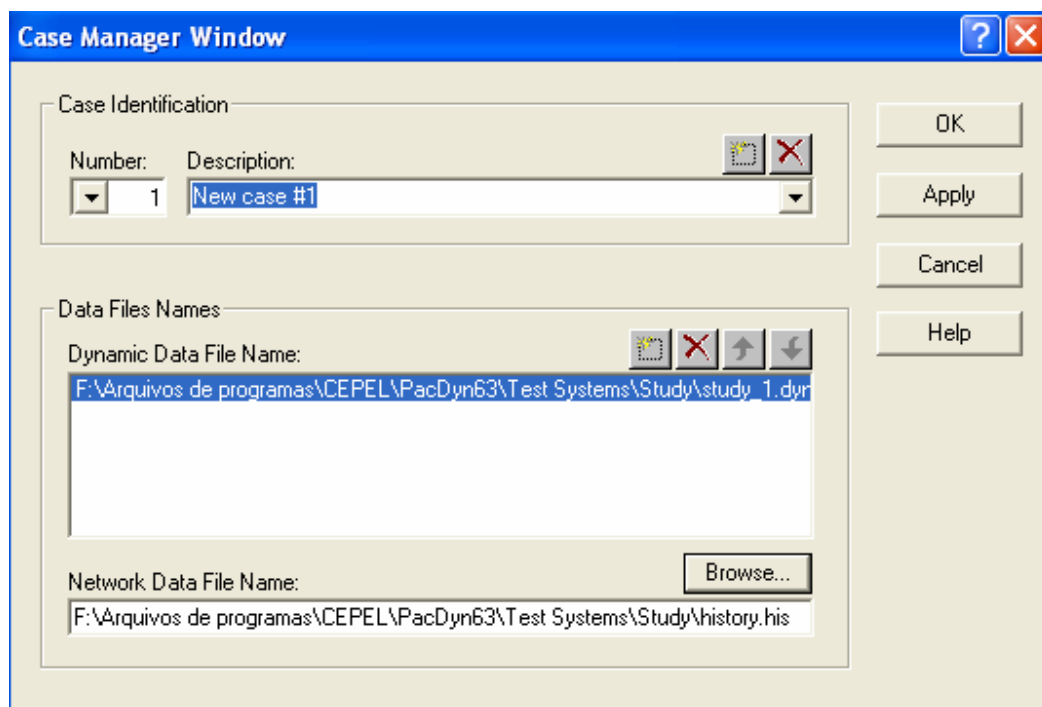
Para iniciar o trabalho no PacDyn, deve-se criar um arquivo Novo (clicando no desenho da folha branca , ou indo em “File” e em seguida em “New”), ou Abrir um arquivo (clicando no desenho da pasta amarela , ou indo em “File” e em seguida em “Open”) do tipo “.pac”.

No caso de se iniciar um arquivo Novo, deve-se inserir o nome do arquivo “.pac” (por exemplo, “Study.pac”) que será criado e, em seguida, aparecerá a seguinte tela:

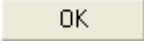


**Figura 5.2 – Janela do Gerenciador de Casos**

Nessa janela, podemos observar três partes. Na primeira, escolheremos o nome da pasta onde todos os gráficos traçados e arquivos exportados serão guardados (nesse caso, “New Case #1”), no segundo espaço será inserido o arquivo “.dyn” (clicando no desenho da pasta , onde estão inseridos os componentes dinâmicos do sistema e, finalmente, no último espaço (clicando em “Browse”), deve-se escolher o arquivo histórico, “.his”, onde estão os componentes da rede, como mostrado na Figura 5.3:



**Figura 5.3 – Janela do Gerenciador de Casos**

Após aceitar (clcando em ) , o PacDyn vai apresentar uma tela onde podemos finalmente utilizar as técnicas de análise do programa.

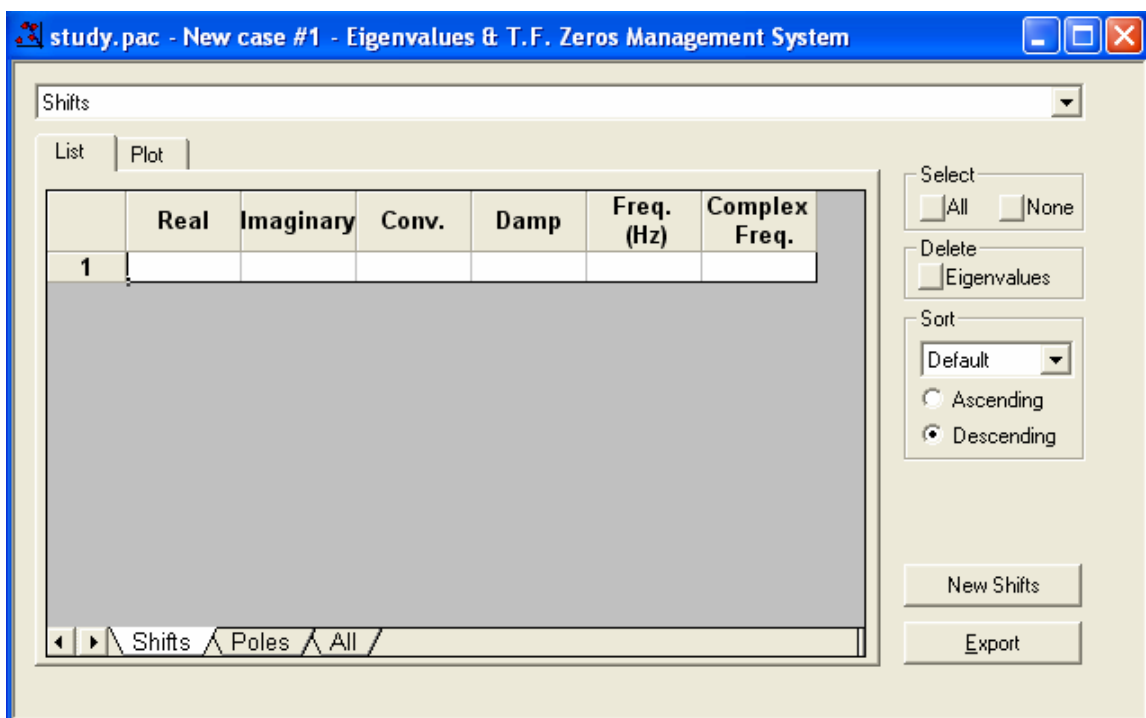
Caso o usuário deseje sair do programa e retornar para o mesmo caso, basta, em vez de criar outro arquivo da mesma forma, abrir o arquivo (“Study.pac”).

## 5.2 Autovalores

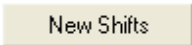
Uma ferramenta muito utilizada é o cálculo de Autovalores. No programa PacDyn esse cálculo é feito de várias formas. Inicialmente, será mostrado o cálculo dos Autovalores da forma como são adicionados quaisquer Pólos ao sistema (“Shifts”) e através de iterações serão calculados os Autovalores mais próximos para cada um deles (podemos calcular, ao invés de Autovalores, os Pólos Dominantes, mas isso será

mostrado posteriormente). O “Shift” será um valor aleatório escolhido que após a iteração do programa, tenderá a um certo valor de acordo com o sistema.

Para se adicionar os Pólos iniciais, deve-se então observar as janelas que são abertas ao se criar um arquivo ou abrir um arquivo. A janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência (“Eigenvalues & T.F. Zeros”) é mostrada na Figura 5.4:



**Figura 5.4 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência**

Para se adicionar os Pólos iniciais (“Shifts”), deve-se clicar na aba “Shifts” e, em seguida, clicar no botão  (“New Shifts”, novas mudanças, ou novos valores iniciais), exibido na Figura 5.4. Aparecerá então a tela mostrada pela Figura 5.5:



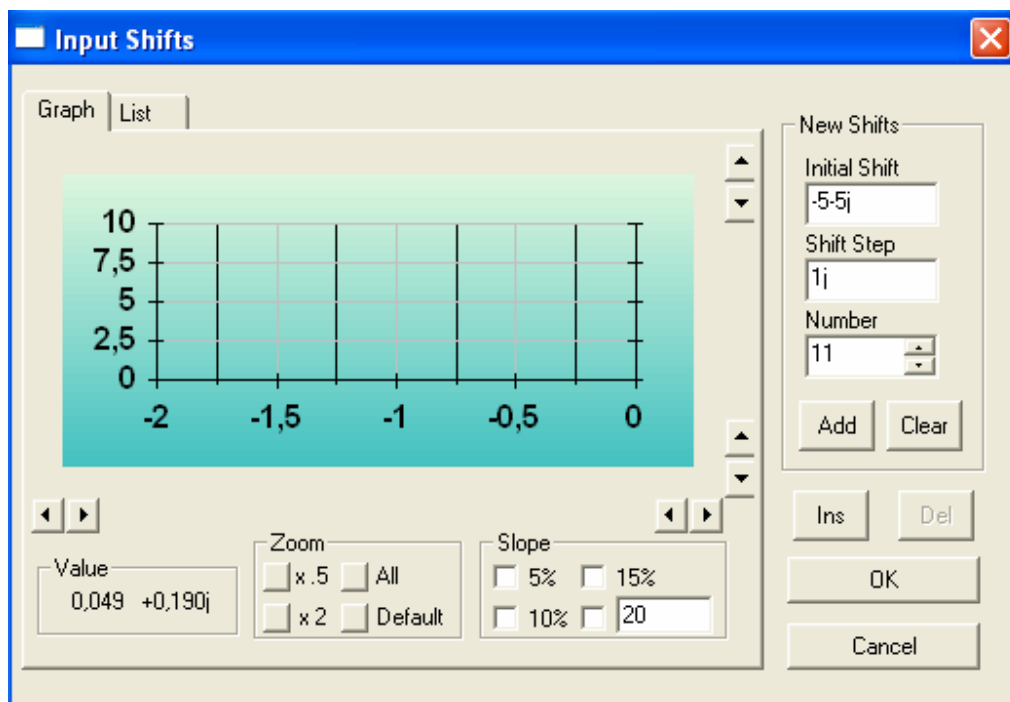


Figura 5.5 –Adição de Novos “Shifts”

Deve-se, então, em “Initial Shift” (mudança inicial, melhor traduzido por primeiro valor, pois esse será o primeiro, e talvez, o único a ser dado, os outros são conseqüências de iterações com o primeiro, como será visto), colocar o valor do primeiro Pólo a ser adicionado (na Figura 5.5 os campos já estão completos para facilitar o entendimento do leitor), e em “Shift Step” (passo do chute), será colocado o valor a ser incrementado e, por último, o número de Pólos que serão utilizados em “Number” (número). Por exemplo, utilizamos o Pólo inicial como **-5-5j**, em seguida adicionamos o incremento de **1j** e teremos os seguintes onze Pólos: **-5-5j**, **-5-4j**, **-5-3j**, (...) e **-5+5j**. O próximo passo é, então, adicionar esses Pólos iniciais (“Shifts”) clicando em “Add” (adicionar). Eles aparecerão no plano complexo mostrado pela aba “Graph” (Gráfico). Caso queira adicionar mais algum Pólo, basta escrever nos campos citados, e adicionar. Caso queira apagar algum Pólo, basta clicar na aba “List” (Lista) e selecionar o Pólo indesejado e, em seguida, clicar em “Del” (Apagar). Clicar em “Graph” para se ter uma melhor visualização, utilizar o “Zoom”, clicando nos botões 0,5%, 2%, “All” – tudo – ou “Default” – padrão. Se for necessário traçar uma reta para localizar o quão

amortecido está o seu Pólo: utilizar o “Slope” (inclinações de 5%, 10%, 15% ou qualquer inclinação desejada). Em “List” (Lista) é possível observar as características dos Pólos adicionados, como frequência e amortecimento. Para dar continuidade ao processo, clicar em “Ok”.

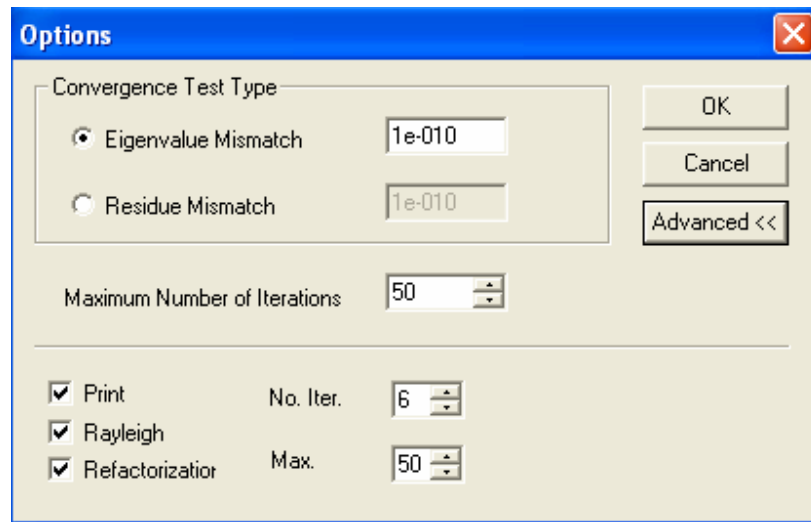
Agora precisamos estimar os Autovalores, dessa forma devemos utilizar o processo numérico do programa (nesse caso, o Quociente de Rayleigh, no exemplo apresentado no Capítulo 5, veremos outra forma de utilizar o pólo inicial, para se obter os pólos dominantes). Na janela principal do programa, deve-se clicar em “Poles” (ou “**Eigenvalues**” para outras versões) e selecionar “Rayleigh Quotient” (Quociente de Rayleigh) ou “Rayleigh Quotient With Deflation” (Quociente de Rayleigh com Redução). O primeiro irá calcular os Autovalores sem se importar com a localização deles, e o segundo, após o cálculo de um autovalor, não deixará que eles sejam repetidos (não é recomendado para sistemas muito grandes, o sistema pode divergir).

Após o processo são mostrados, então, os Autovalores calculados pelo método, na própria janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência.

Outro método para o cálculo dos Autovalores é o Método QR, que calcula todos os Autovalores de um certo sistema. Para maiores informações do Método QR consultar a referência [10]. A resposta dada por esse método é mostrada no PLOT CEPEL, onde podemos visualizar (na aba “Plot” – plotar), no gráfico, e observar as características de frequência e amortecimento (na aba “List”). No primeiro exemplo será mostrada passo a passo a utilização desse método.

O último método RBI (“Refactored Bi-Iteration Algorithm”) não será utilizado nesse trabalho.

Caso seja necessário aumentar (ou reduzir) a precisão dos cálculos ou aumentar (ou reduzir) o número de iterações, deve-se clicar em “Options...” (Opções), dentro de “Poles”, na janela principal, e a seguinte janela será mostrada:




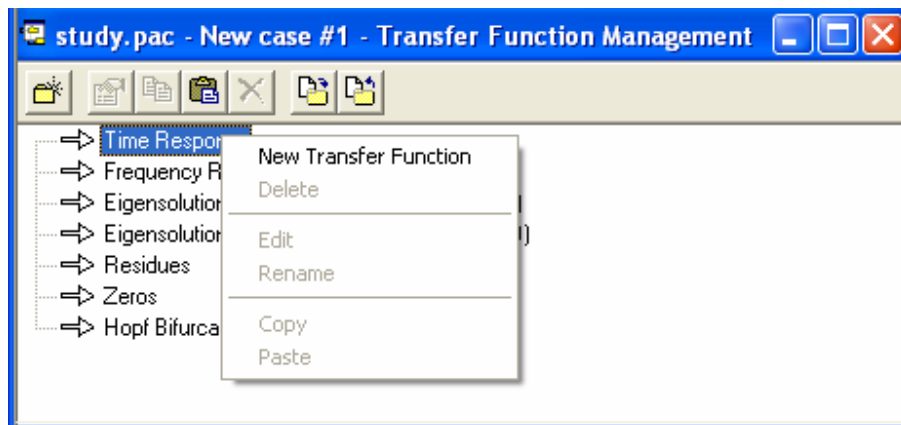
**Figura 5.6 – Janela de Opções**

Na parte superior é possível modificar a Precisão (“Mismatch”) do cálculo (o padrão é  $10^{-10}$ ), e, logo abaixo, é possível modificar o Máximo Número de Iterações (“Maximum Number of iterations”).

### 5.3 Função de Transferência

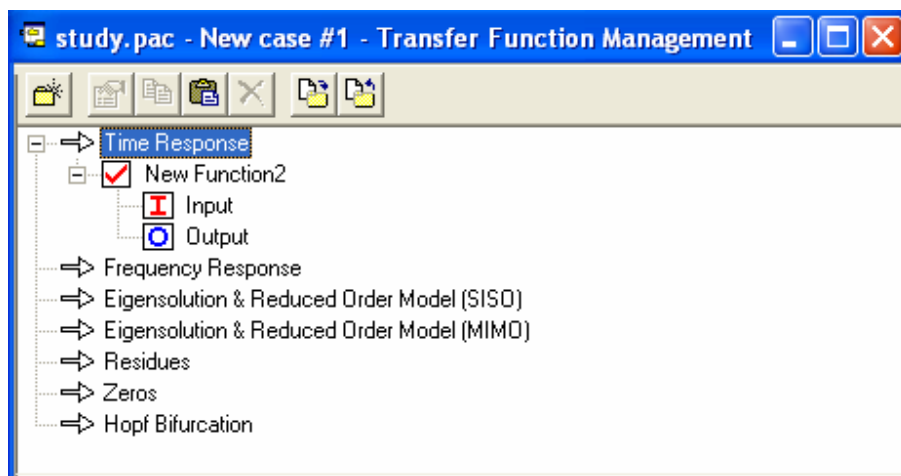
Para fazer alguns cálculos, como de Pólos Dominantes, Resposta em Frequência, Resposta no Tempo, precisamos adicionar ao sistema uma Função de Transferência.

O procedimento é simples. Inicialmente, na janela do Gerenciador de Funções de Transferência (“Transfer Function Management”), deve-se, ou clicar com o botão direito do *mouse* em cima da operação final a ser realizada (Resposta no Tempo – “Time Response”, Resposta em Frequência – “Frequency Response”, etc), aparecendo o menu mostrado na Figura 5.7, em seguida ir a “New Transfer Function” (Nova Função de Transferência), ou, ao invés de todo o procedimento anterior, pode-se clicar direto na pasta amarela  (localizada acima à esquerda):




**Figura 5.7 – Gerenciador de Funções de Transferências**

Em seguida, aparecerá nessa mesma janela, uma nova parte, onde serão inseridas a entrada e a saída da Função de Transferência, como mostrado na Figura 5.8:

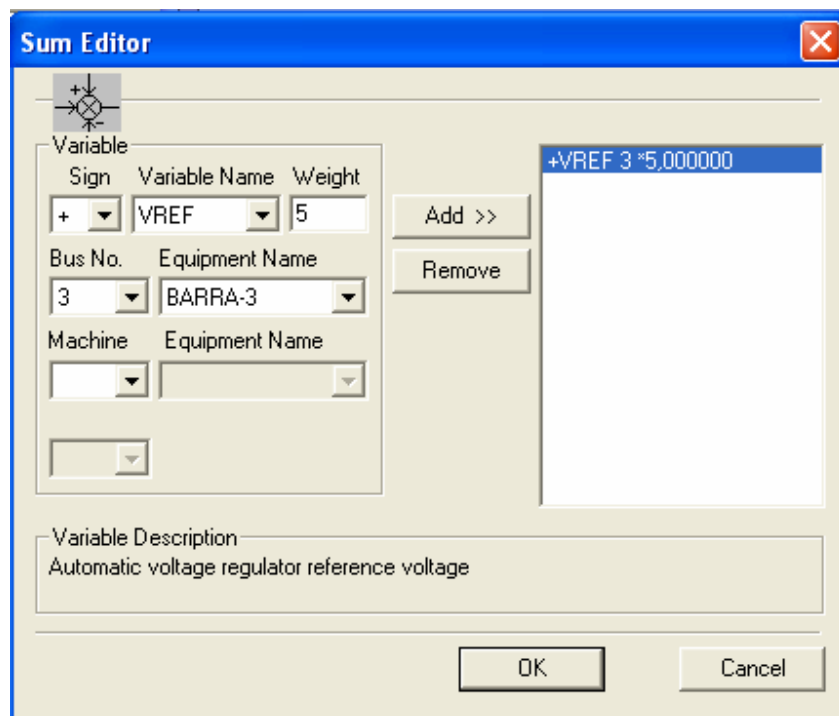


**Figura 5.8 – Gerenciador de Funções de Transferência**

Após adicionar uma certa Função de Transferência, deve-se conferir se o quadrado ao lado da Função está marcado com um V vermelho(☑), pois é isso que valida a Função de Transferência para o cálculo.

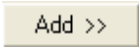
Agora, para selecionar a entrada da Função de Transferência (“Input”) deve-se clicar na pasta amarela , aparecendo assim outra janela (ou, da mesma forma como antes, com o botão direito do *mouse* e “New sum” – nova soma), onde serão escolhidas as variáveis de entrada a serem somadas – entrada somadora – (no caso de se somar várias entradas, não se caracteriza um sistema MISO ou MIMO, pois a entrada será única, e assim, considerada como a soma das variáveis escolhidas; para o caso de múltiplas entradas, deve-se clicar em “Input” – entrada, adicionar uma entrada – clicando na pasta amarela – em seguida aceitar a operação e novamente clicar em “Input” e adicionar uma outra entrada somadora).

Observe a Figura 5.9:




**Figura 5.9 – Editor do Somador de Entrada**

No exemplo mostrado acima, foi adicionada (“Sign”: +) uma variável Tensão de Referência (“Variable Name”: VREF) multiplicada por cinco (“Weight”: 5) da barra 3

(“Bus No.”: 3) chamada BARRA-3 (“Equipment Name”), Máquina X (“Machine”) e, em seguida, foi adicionada a Função de Transferência, pelo botão  (toda a operação já feita na Figura 5.9). Basta agora avançar clicando em “Ok”.

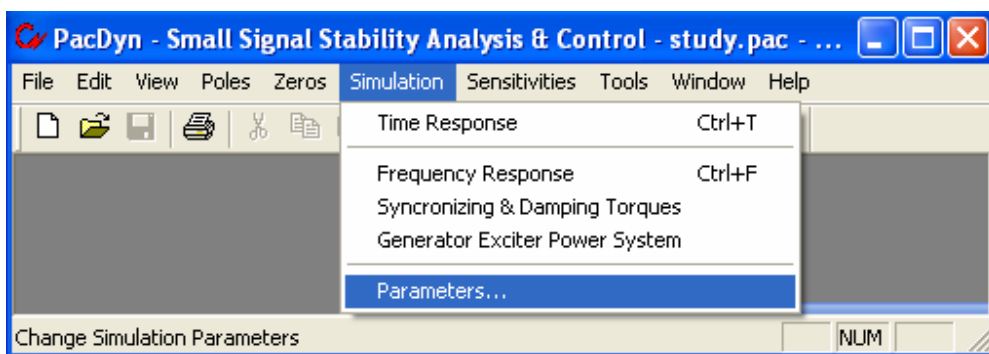
Observe, existem muitas variáveis. Quando selecionada uma variável qualquer, em “Variable Description” (Descrição da Variável), é explicado o significado dessa variável escolhida.

Da mesma forma é, então, escolhida uma variável de saída (em “Output”), e já é possível traçar a característica de Resposta no Tempo para essa Função de Transferência.

Nas versões anteriores do PacDyn é necessário salvar a sua Função de Transferência, deve-se, então, clicar em um pequeno disquete  que aparece na janela de Gerenciamento das Funções de Transferências (“Transfer Function Management”).

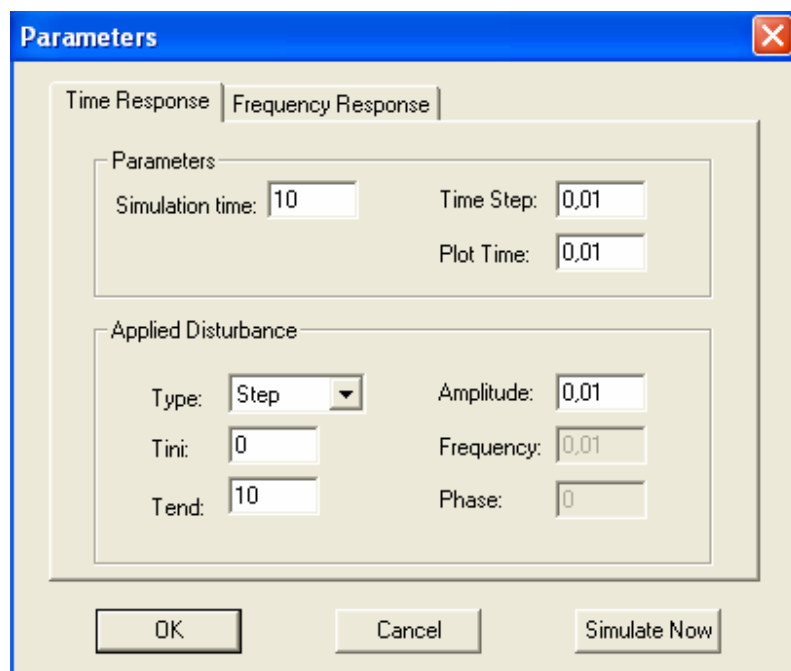
## 5.4 Simulação

Para traçar a característica de Resposta no Tempo, na janela principal deve-se clicar em “Simulation” (Simulação) e, em seguida, em “Parameters” (Parâmetros) como mostrado na Figura 5.10:



**Figura 5.10 – Janela Principal**

Uma nova janela aparecerá:



**Figura 5.11 – Parâmetros de Simulação**

Nessa janela, é possível escolher as opções da Simulação, como o tempo de simulação (“Simulation time”, em segundos), a precisão do gráfico (“Time Step” e “Plot Time”), o tipo de distúrbio (“Applied Disturbance”), onde escolhemos o sinal de distúrbio (“Type”: “Step” – Degrau, “Ramp” – Rampa, “Sin” – Senóide), a amplitude (“Amplitude”, em p.u.), o início e o fim do distúrbio (“Tini” e “Tend”, em segundos). Para simular, basta clicar em “Simulate Now”.

Da mesma forma, temos a simulação de Resposta em Frequência (Observação: Para a simulação em Resposta em Frequência, não existe frequência inicial nula). Após realizar a simulação, podemos observar, no programa PLOT CEPEL, o Diagrama de Bode da Função de Transferência escrita e também o seu Diagrama de Nyquist (mais opções de como editar os gráficos, editar as cores, e outras opções, podem ser esclarecidas no manual do PLOT CEPEL).

### 5.5 Outras Opções

Com o programa PacDyn é possível exportar arquivos e relatórios para diversos formatos. Serão apresentados dois exemplos (Seção 6.3 e 6.4) no Capítulo 6, onde será exportado para o MATLAB.



## 6. APLICAÇÕES PRÁTICAS

A utilização das técnicas lineares ficará mais clara com o uso de exemplos práticos do programa. Serão apresentados então, nesse Capítulo, alguns exemplos de aplicações práticas do programa PacDyn.

O primeiro exemplo é formado por apenas uma máquina e duas barras. Nele serão mostradas algumas técnicas práticas no entendimento do sistema (passo a passo, para o entendimento fácil do leitor), ressaltando a importância delas, apresentando os resultados e analisando cada um deles. Será também projetado um estabilizador de forma a corrigir o sistema.

No segundo exemplo, será mostrado um sistema maior, o sistema de interligação Norte-Sul, com suas principais usinas geradoras, onde serão mostradas as técnicas de análise práticas, ressaltando a importância delas, (esse exemplo será apresentado de forma mais dinâmica), apresentando os resultados e analisando cada um deles.

O terceiro exemplo possui o mesmo sistema do primeiro exemplo, mas já estabilizado, onde será mostrado a exportação do arquivo (em forma de espaços de estados) do PacDyn para o MATLAB e será feita uma análise de técnicas comuns aos dois programas.

O quarto e último exemplo será também o primeiro sistema exportado para o MATLAB, mas ao invés de utilizar espaço de estados, será utilizado o formato do sistema descritor. Em seguida, será utilizada uma rotina do MATLAB para converter as variáveis criadas no MATLAB em variáveis compatíveis com os modelos normalmente utilizados. A partir delas poderemos analisar as técnicas comuns entre os dois programas, comparando com os dados obtidos no terceiro exemplo.

## 6.1 Exemplo 1 – Sistema FBM e Projeto de Estabilizador

Nesse exemplo será apresentado um sistema simples, com apenas uma máquina ligada através de uma linha de transmissão a um barramento infinito, como mostrado pela Figura 6.1 [11]:

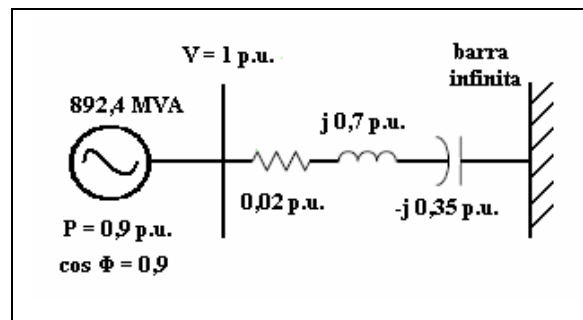


Figura 6.1 – Modelo Simplificado de um Sistema Elétrico com Duas Barras

Esse sistema encontra-se entre os casos de estudo do PacDyn (caso fbm01). Nesse sistema temos um Regulador Automático de Tensão (AVR), como mostrado abaixo:

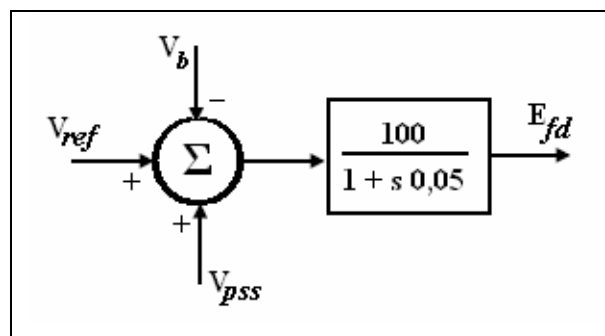
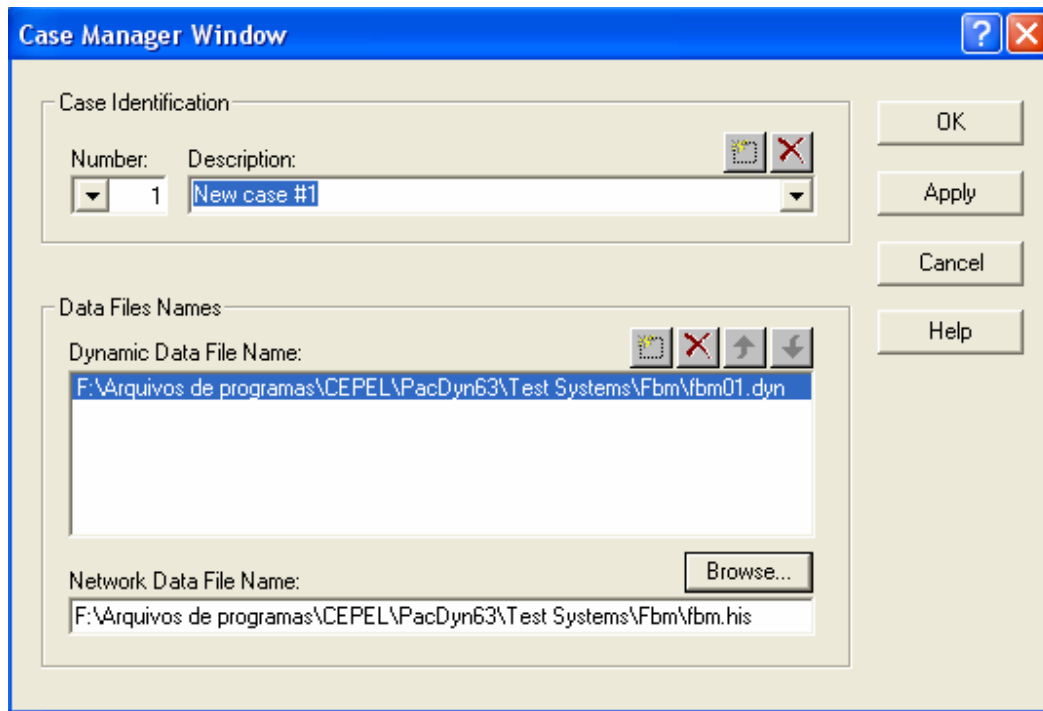


Figura 6.2 – Diagrama de Blocos do Regulador Automático de Tensão

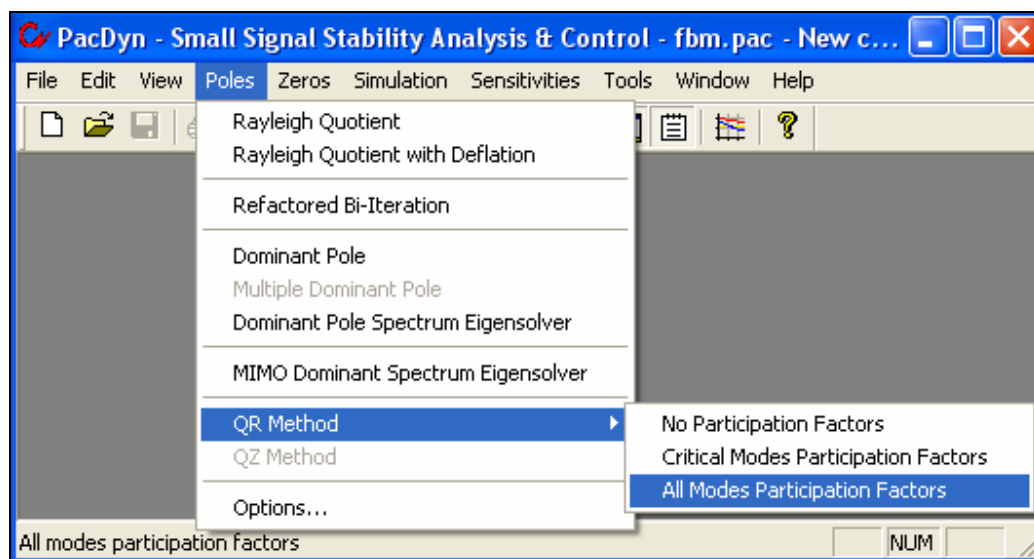
Com todas as técnicas apresentadas anteriormente, vamos analisar o exemplo e, caso seja necessário, vamos introduzir ao sistema algum tipo de compensador.

Inicialmente devemos criar um caso para estudo, ou seja, criar um arquivo do tipo “.pac”, como mostrado na Figura 6.3:



**Figura 6.3 – Gerenciador de Casos**

Vamos, então, observar os Autovalores do sistema, para observar como ele se comporta. Utilizaremos o método QR com todos os fatores, ou seja, serão calculados todos os pólos e todos os fatores de participação de cada um deles, mostrado na Figura 6.4:



**Figura 6.4 – Janela Principal**

Dessa forma obtemos os seguintes Pólos (mostrados no PLOT CEPOL):

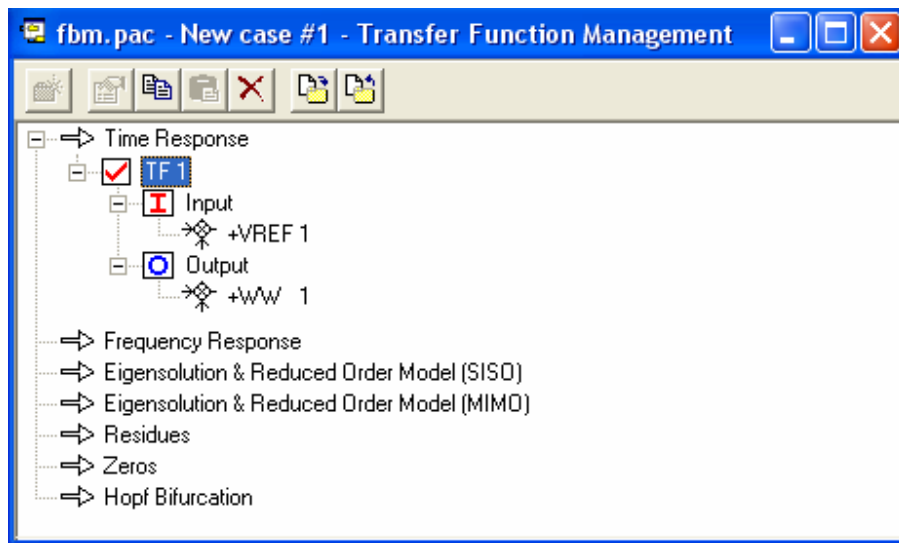
**Tabela 6.1 – Autovalores Obtidos**

	<b>Parte Real</b>	<b>Parte Imaginária</b>	<b>Módulo</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Amortecimento (%)</b>
<b>1</b>	<b>-0,03292</b>	<b>10,595</b>	<b>10,595</b>	<b>1,6862</b>	<b>0,3107</b>
<b>2</b>	<b>-0,03292</b>	<b>-10,595</b>	<b>10,595</b>	<b>-1,6862</b>	<b>0,3107</b>
3	-8,3369	11,414	14,134	1,8166	58,983
4	-8,3369	-11,414	14,134	-1,8166	58,983
5	-46,607	0	46,607	0	100
6	-25,425	0	25,425	0	100
7	-2,2295	0	2,2295	0	100


Observando os autovalores, vemos que o sistema possui sete pólos, e dentre eles, existem dois que possuem um amortecimento muito baixo. Como esses pólos estão muito próximos do eixo imaginário, podemos imaginar que a presença deles, de certa

forma, desestabiliza o sistema [12]. A partir disso, vamos traçar a resposta no tempo de uma certa Função de Transferência e observar como o sistema está se comportando.

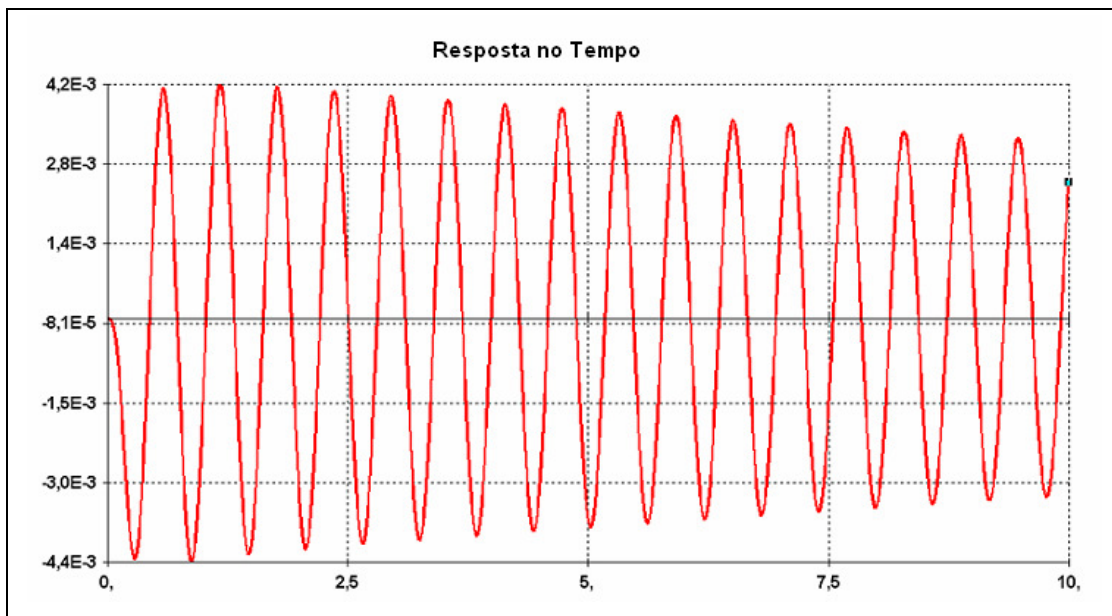
Escolheremos a função da Tensão de Referência (VREF) pela Velocidade do Rotor da Máquina Síncrona (WW). Como já mostrado anteriormente vamos definir a Função de Transferência escolhida:



**Figura 6.5 – Gerenciador de Funções de Transferência**

Como mostrado, vamos em “Simulation”, em seguida em “Parameters”, onde escolheremos uma simulação de 10 segundos (“Simulation Time” e “Time Step” / “Plot Time” = 0,01 segundo), um Distúrbio do tipo Degrau (“Step”) com 10 segundos de duração (começando – “Tini” – em 0 e terminando – “Tend” – em 10 segundos) com amplitude de 0,1 p.u. Após escolher os parâmetros,  (Simular Agora).

A resposta que obteremos será a mostrada pela Figura 6.6:



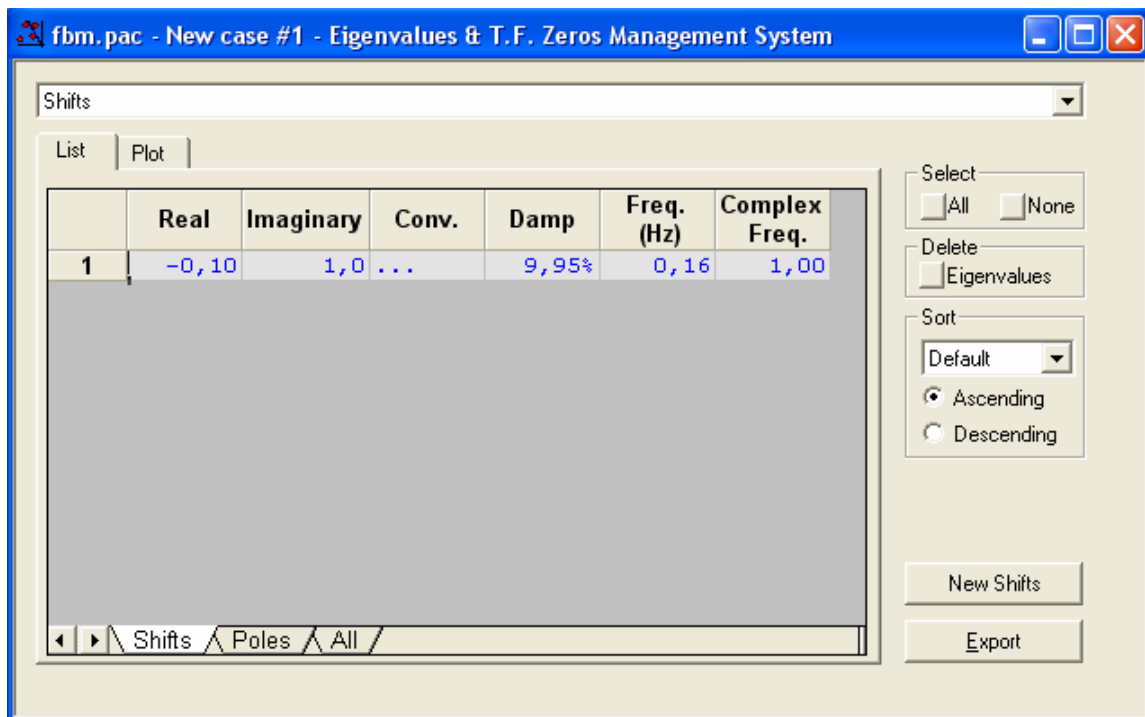
**Figura 6.6 – Resposta no Tempo a um Degrau**

Como podemos observar na Figura 6.6, o tempo de acomodação da função será muito grande, ou seja, qualquer distúrbio no sistema causa consequências que só serão sanadas muito tempo depois do distúrbio (o sistema possui uma resposta muito lenta). Dessa forma, vamos comprovar que o pólo em  $-0,032 \pm j 10,595$ , é realmente dominante no sistema. Para que, enfim, possamos ajustar o sistema.



Podemos observar que a forma de onda obtida corresponde apenas à variação com o tempo da função e, não, um Gráfico da função como um todo. A função como um todo, seria representada pela soma do mostrado pelo Gráfico, mais a resposta em relação, nesse caso, a Tensão de Referência da máquina, após o distúrbio do Degrau.

Para confirmar se o pólo é realmente dominante, devemos utilizar o método de adicionar um pólo inicial ao sistema e verificar para qual ponto ele converge ao se reduzir o sistema.

Adicionaremos um pólo (“Shift”) ao sistema (já mostrado anteriormente na Seção 5.2), como mostrado na Figura 6.7:



**Figura 6.7 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência**

Com esse valor inicial escolhido, vamos reduzir o sistema para observar a resposta do Pólo inicial. Primeiramente, vamos copiar a Função de Transferência utilizada antes para o campo “Eigensolution & Reduced Order Model (SISO)”. Para copiar a Função de Transferência que estava em “Time Response”, basta clicar na Função de Transferência (TF 1) e arrastá-la para o lugar desejado. Outra forma de copiar, para não ter que refazer toda a função é selecionar a Função e clicar no botão  (Copiar – “Copy”), depois ir para o campo desejado e clicar em  (Colar – “Paste”).

Com a Função devidamente copiada, vamos então fazer com que os pólos tendam aos Pólos Dominantes do sistema. Na janela principal, clicar em “Poles” (Pólos), ou “Eigenvalues” (Autovalores), dependendo da Versão do Programa PacDyn, e, em seguida, em “Dominat Poles” (Pólos Dominantes), como mostrado na Figura 6.8:

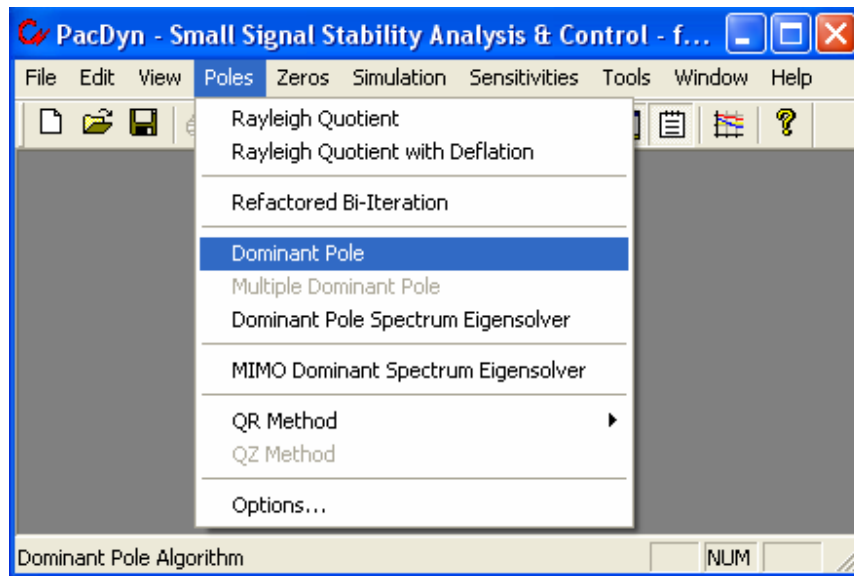


Figura 6.8 – Janela Principal

Os Pólos Dominantes calculados pelo programa estão mostrados na Figura 6.9:

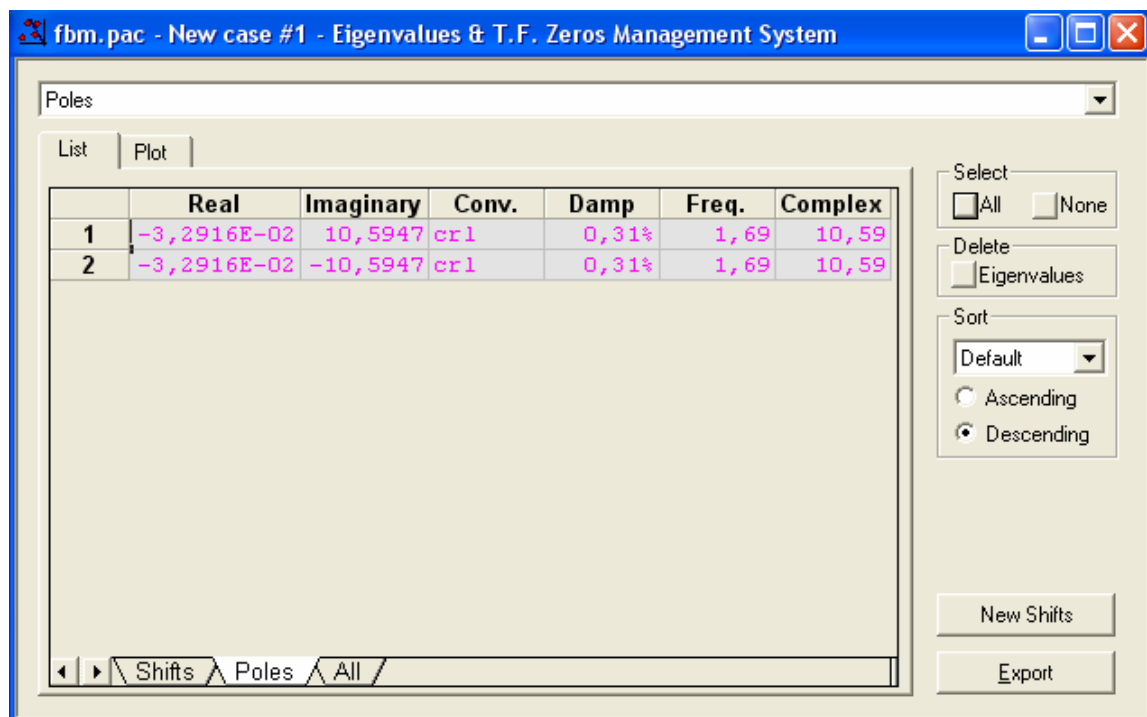
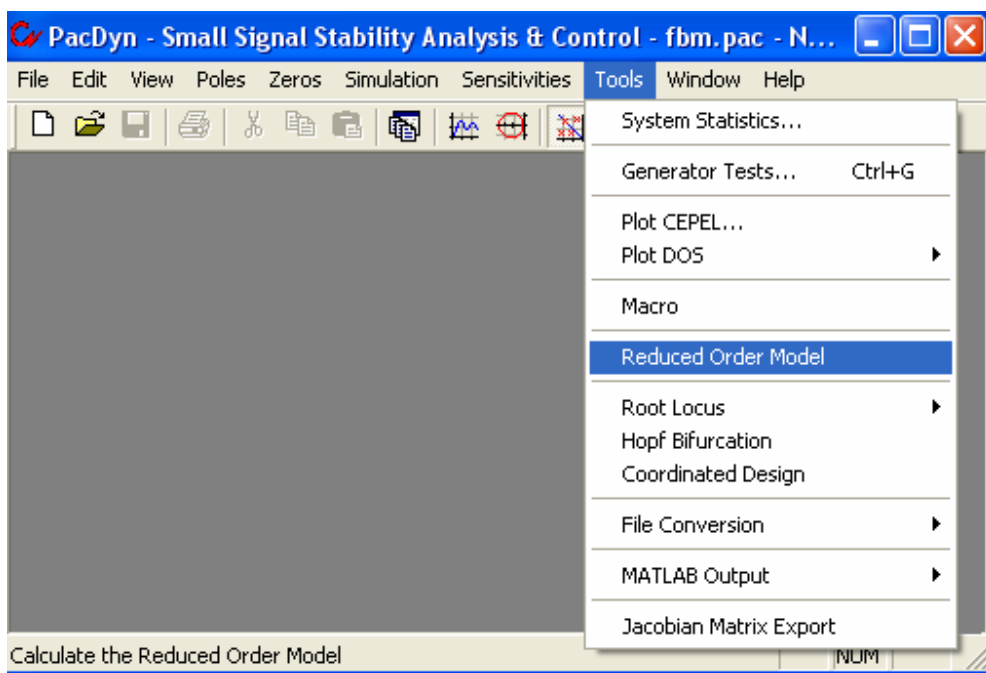


Figura 6.9 – Janela de Autovalores e Zeros da Função de Transferência



Observando os valores obtidos, podemos ver que são os mesmos pólos problemáticos encontrados anteriormente. Vamos, então, reduzir a ordem do sistema (como será mostrado), para que possamos observar a característica do sistema total e formado apenas pelos Pólos Dominantes. Dessa forma, podemos observar a característica desses pólos e saber com certeza se são os responsáveis pela característica oscilatória da resposta.

Clicando na janela principal em “Tools” (Ferramentas) e, em seguida, em “Reduced Order Model” (Modelo de Ordem Reduzida), como mostrado na Figura 6.10, vamos traçar a resposta do sistema como se ele só tivesse os Pólos Dominantes como Pólos:



**Figura 6.10 – Janela Principal**

Dependendo da versão, o programa vai perguntar quais características o usuário quer traçar. Para o nosso caso, não é necessária a resposta no domínio da frequência, mas utilizaremos um fator dessa resposta posteriormente, (“frequency response”, coloque ‘y’ – “yes” – sim). Também vamos precisar da resposta no tempo (“time

response”, coloque ‘y’ – “yes” – sim), e por último, tecle ENTER para aceitar as configurações padrão já ajustadas anteriormente. Para as versões mais novas do PacDyn, uma janela se abrirá com todos os gráficos das respostas, como mostrada na Figura 6.11:

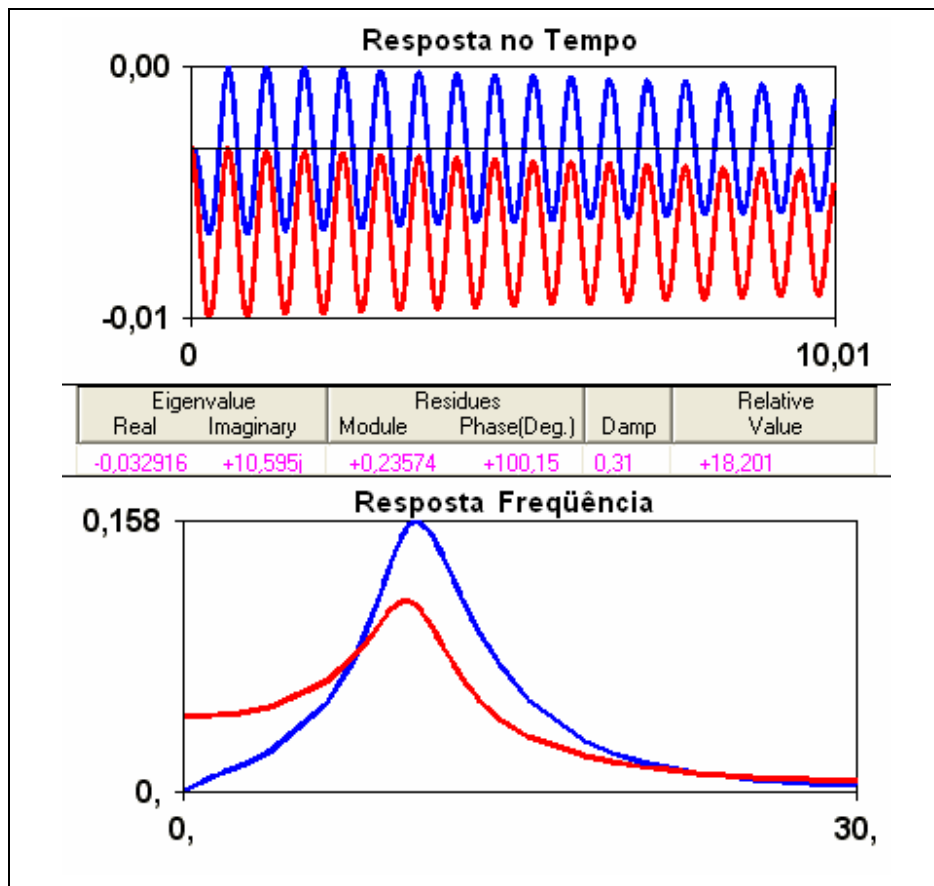
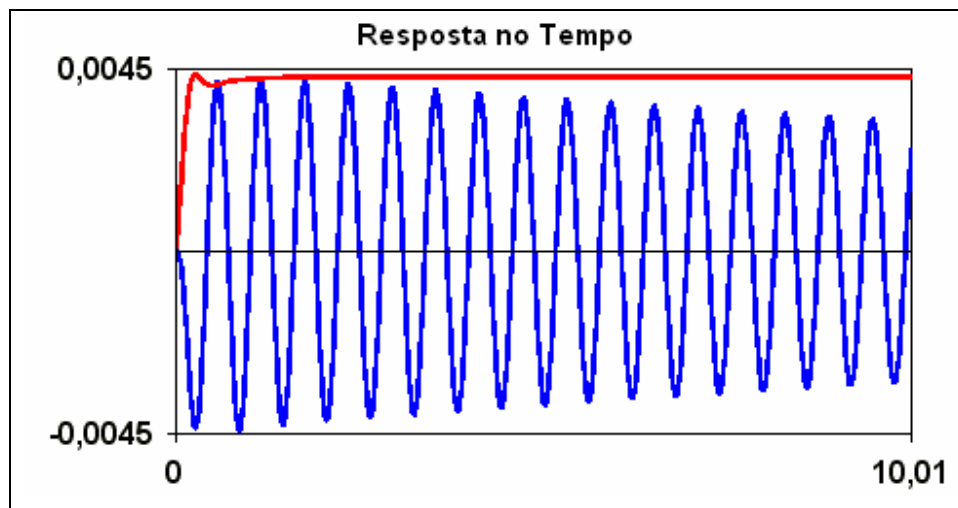


Figura 6.11 – Respostas no Tempo e Freqüência para um Pólo Dominante

Podemos observar, em azul, a resposta do sistema completo e, em vermelho, a resposta do sistema reduzido. Observando a resposta no tempo (primeiro gráfico da Figura 6.11), aparentemente, observamos que a resposta dos pólos é realmente oscilatória, mas não está coincidente com a curva, por isso devemos nos certificar das características dos outros pólos para observarmos se algum deles pode ser responsável também pela oscilação do sistema completo.

Observando bem as curvas no tempo, vemos que as curvas em azul e em vermelho são extremamente parecidas, apenas uma está deslocada em relação à outra, logo esperamos que a resposta dos outros pólos do sistema sejam retas constantes com valores positivos. Procederemos como da forma anterior, adicionando outros “Shifts” e obtendo os pólos dominantes (os “Shifts” utilizados levaram aos pólos complexos conjugados em  $-8,33 \pm j 11,41$  e o Pólo Real  $-2,22$ ). Em seguida, reduzindo o sistema, temos a resposta no tempo desses pólos e do sistema completo, mostrada na Figura 6.12:



**Figura 6.12 – Resposta no Tempo para os Outros Pólos Calculados**

A curva é a resposta no tempo dos novos pólos ( $-8,33 \pm j 11,41$  e o pólo real  $-2,22$ ), em vermelho. Como era esperado, esses pólos tendem a acompanhar o degrau de excitação. Vamos agora somar essa resposta comportada com a resposta obtida pelo pólo dominante:

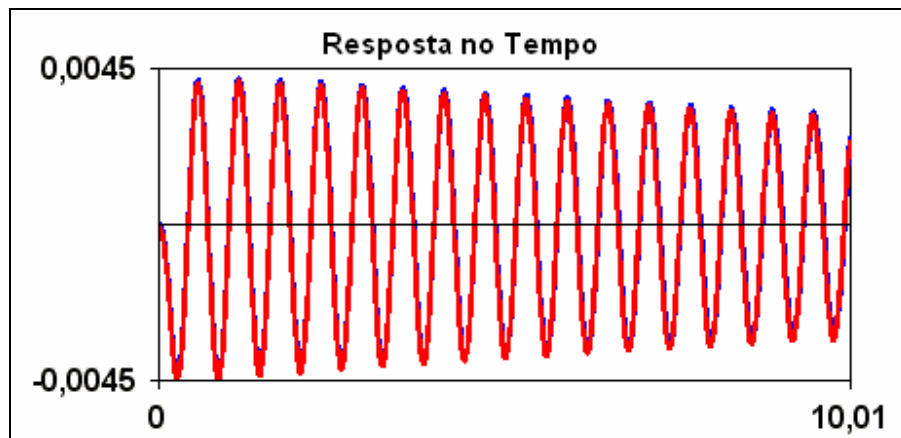


Figura 6.13 – Resposta no Tempo de Todos os Pólos Calculados

Pode-se observar, agora, que a curva vermelha se sobrepõe à curva azul, dessa forma vemos que a resposta oscilatória é devida aos Pólos em  $-0,032 \pm j 10,595$ .

Retornando ao PacDyn, devemos traçar a Resposta em Frequência do sistema completo. Da mesma forma como anteriormente, vamos copiar a nossa Função de Transferência para o campo “Frequency Response” (Resposta em Frequência), mostrado na Figura 6.14:

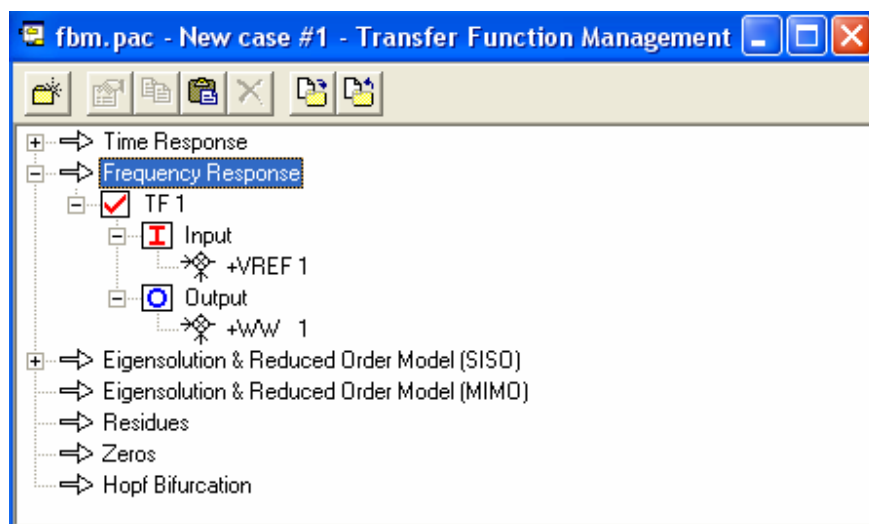


Figura 6.14 – Gerenciador de Funções de Transferências

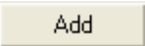
Como na simulação no Domínio do Tempo, vamos em “Simulation” (Simulação) e “Parameters” (Parâmetros), se abrirá uma pequena janela, onde clicaremos na aba “Frequency Response” (Resposta em Frequência). Aparecerá a janela mostrada na Figura 6.15:

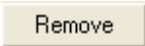
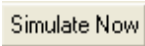
The screenshot shows a 'Parameters' dialog box with a blue title bar and a close button. It has two tabs: 'Time Response' and 'Frequency Response', with the latter being active. Inside the dialog, there are four input fields: 'Min. Freq.' with the value '0,01', 'Max. Freq.' with '40', 'Damping' with '0', and 'Step' with '0,01'. Below these fields are 'Add' and 'Remove' buttons. To the right of the 'Step' field is a checkbox labeled 'Auto' which is checked. Below these elements is a table with the following data:

Step	Min. Freq.	Max. Freq.	Damping
Auto	0,01	40	0

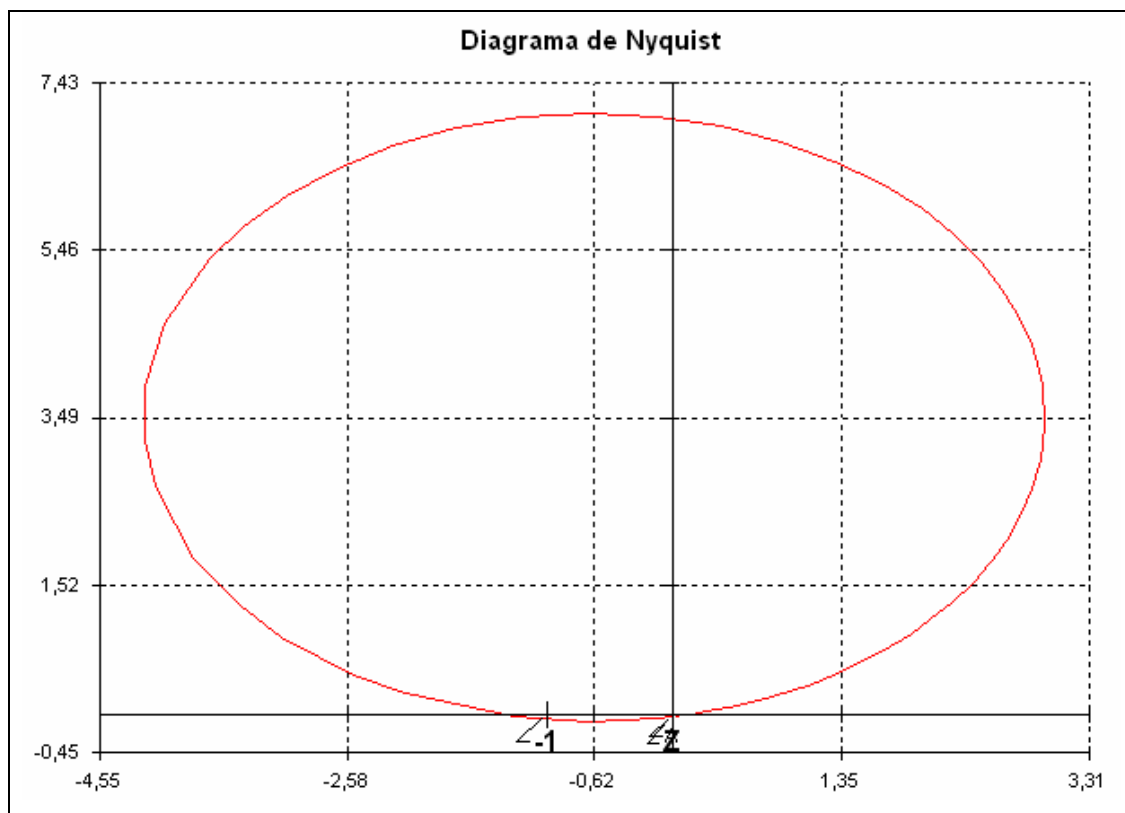
At the bottom of the dialog are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Simulate Now'.

**Figura 6.15 – Parâmetros de Simulação**

Nessa janela devem-se especificar as opções da simulação. No espaço “Min. Freq.” (Frequência mínima) , colocaremos a menor frequência que será simulada (lembrar que na Resposta em Frequência não existe frequência mínima nula, deve ser algo do tipo: 1, 0,5; 0,1; 0,08; 0,01; etc), nesse caso, utilizamos 0,01 Hertz, no espaço “Max. Freq.” (Frequência máxima), colocamos a maior frequência de simulação (que deve ser maior que a frequência mínima), nesse caso 40 Hertz. Para o amortecimento, devemos colocar um valor  $X$  onde possamos observar o traçado do Diagrama de Nyquist com  $X\%$  do amortecimento, agora colocamos zero, ou seja, 0%. Após ajustarmos esses parâmetros, devemos clicar no botão  (Adicionar), mas certifique-se que o quadro abaixo está vazio, senão será exibida uma mensagem de erro.

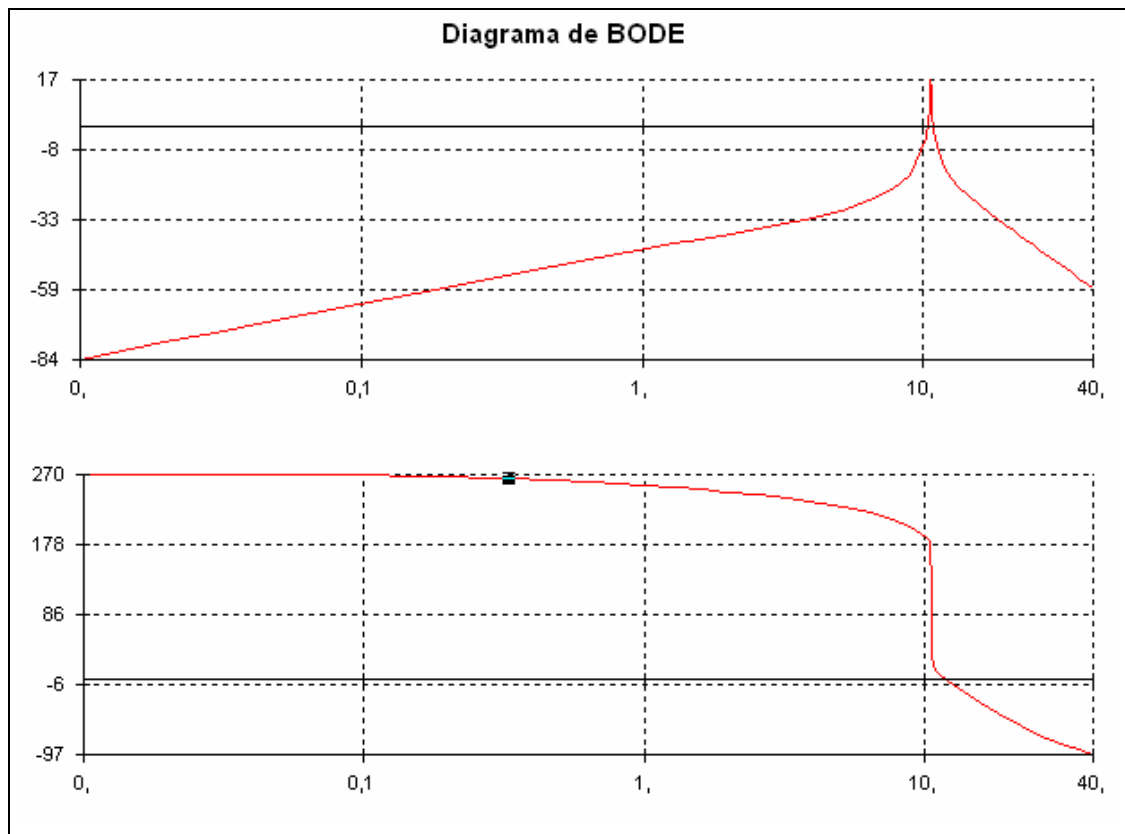
Caso o quadro não esteja vazio, deve-se limpá-lo clicando em  (Remover) e, em seguida adicionar. Comparando com a Figura 6.15, se estiver tudo correto, basta então clicar em  (Simular Agora).

Da simulação, que será mostrada no PLOT CEPEL, teremos o seguinte Diagrama de Nyquist:



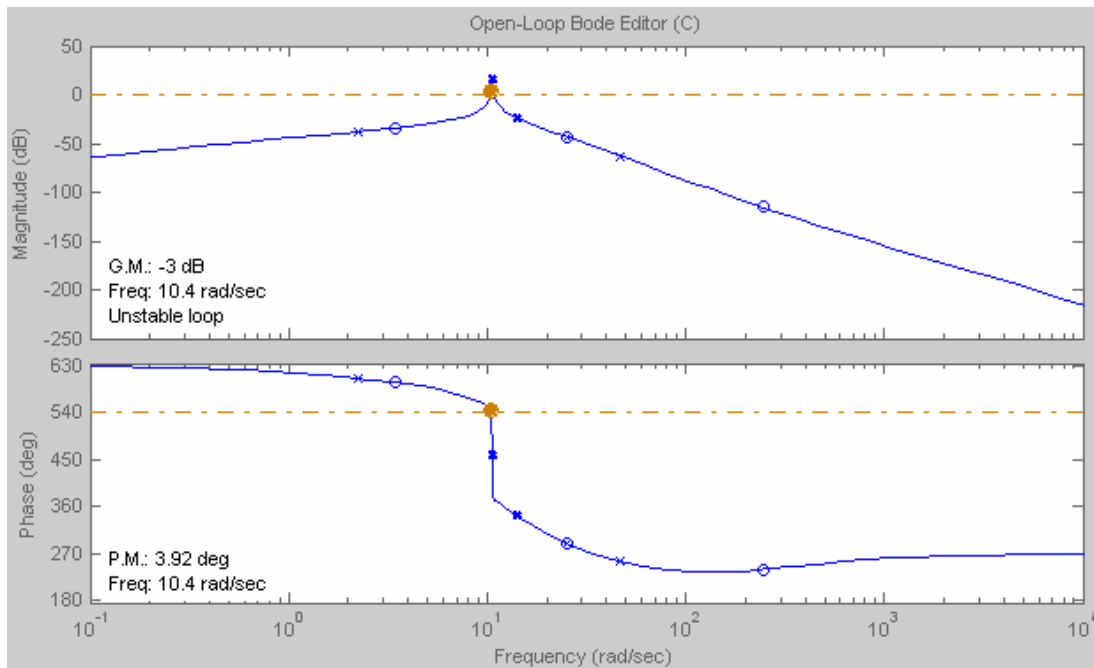
**Figura 6.16 – Diagrama de Nyquist**

E o seguinte Diagrama de BODE, clicando em  (Ganho) e  (Fase):



**Figura 6.17 – Diagramas de BODE de Ganho e Fase**

O gráfico traçado pelo PLOT CEPEL pode não ter uma precisão muito grande. Traçamos então no MATLAB (procedimento de exportação do arquivo será mostrado em outro exemplo), pois esse nos fornece imediatamente os valores requeridos de margem de fase e de ganho, obtivemos então o seguinte Diagrama de BODE:



**Figura 6.18 – Diagramas de BODE de Ganho e Fase**

Observando o gráfico, vemos que a margem de fase é mínima (P.M.:  $3,92^\circ$ ), basta observar onde o Gráfico do ganho cruza o eixo de 0 dB, ou seja, em aproximadamente 10 rad/s. A margem de ganho é negativa, como mostrado (G.M.: -3 dB). Essas margens de fase e de ganho caracterizariam um sistema instável [12].

Essa margem de ganho negativa traz uma consequência no Diagrama de Nyquist traçado na Figura 6.16, o envolvimento do ponto  $-1 + j 0$  no sentido horário, o que caracterizaria também uma instabilidade do sistema [12], [13].

Logo, como visto anteriormente, na Figura 6.6, a resposta do sistema não caracteriza um sistema instável, mas apenas com resposta muito lenta. Pelos Diagramas de BODE e Nyquist (Figuras 6.16, 6.17 e 6.18) traçados anteriormente, observamos que o sistema está num nível próximo de instabilidade [12]. Dessa forma podemos então projetar um estabilizador para melhorar assim a resposta do sistema mostrado.




Utilizaremos agora o PLOT CEPEL para projetar um compensador (Estabilizador de Sistema de Potência, PSS – “*Power System Stabilizer*”), utilizando um novo Diagrama de Nyquist traçado.

Devemos traçar então um novo diagrama de Nyquist com um amortecimento que será aplicado nos pólos do sistema. Utilizaremos então um amortecimento de 20%.

Com o Diagrama traçado, começaremos o projeto do estabilizador (PSS).

O PSS utiliza uma realimentação positiva de Ganho, logo temos que modificar o sistema para que ele tenha uma realimentação positiva (sendo à do sistema uma realimentação negativa).

Para inverter o sentido, vamos modificar o gráfico, clicando em  (Gráfico). A janela abaixo será mostrada:

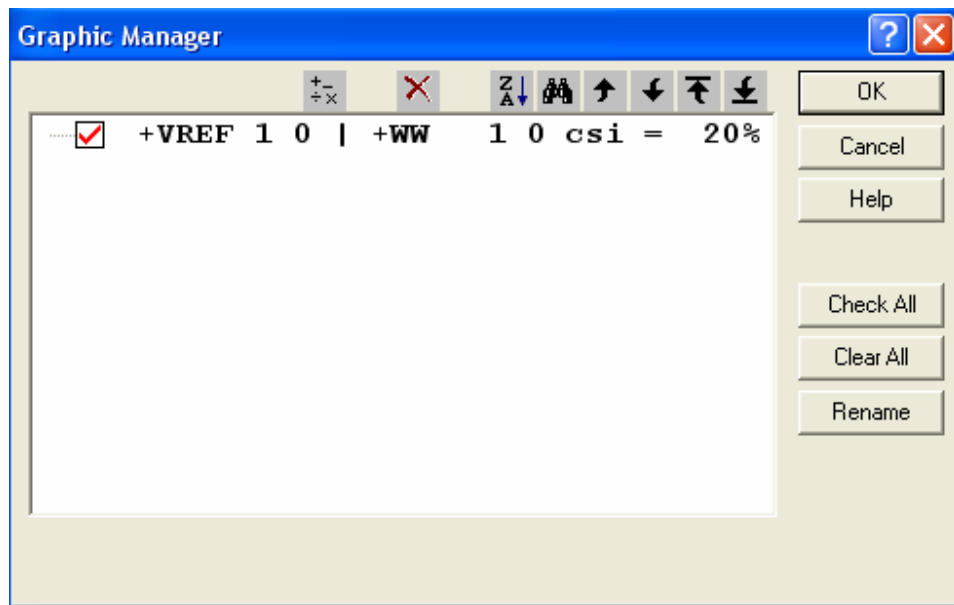

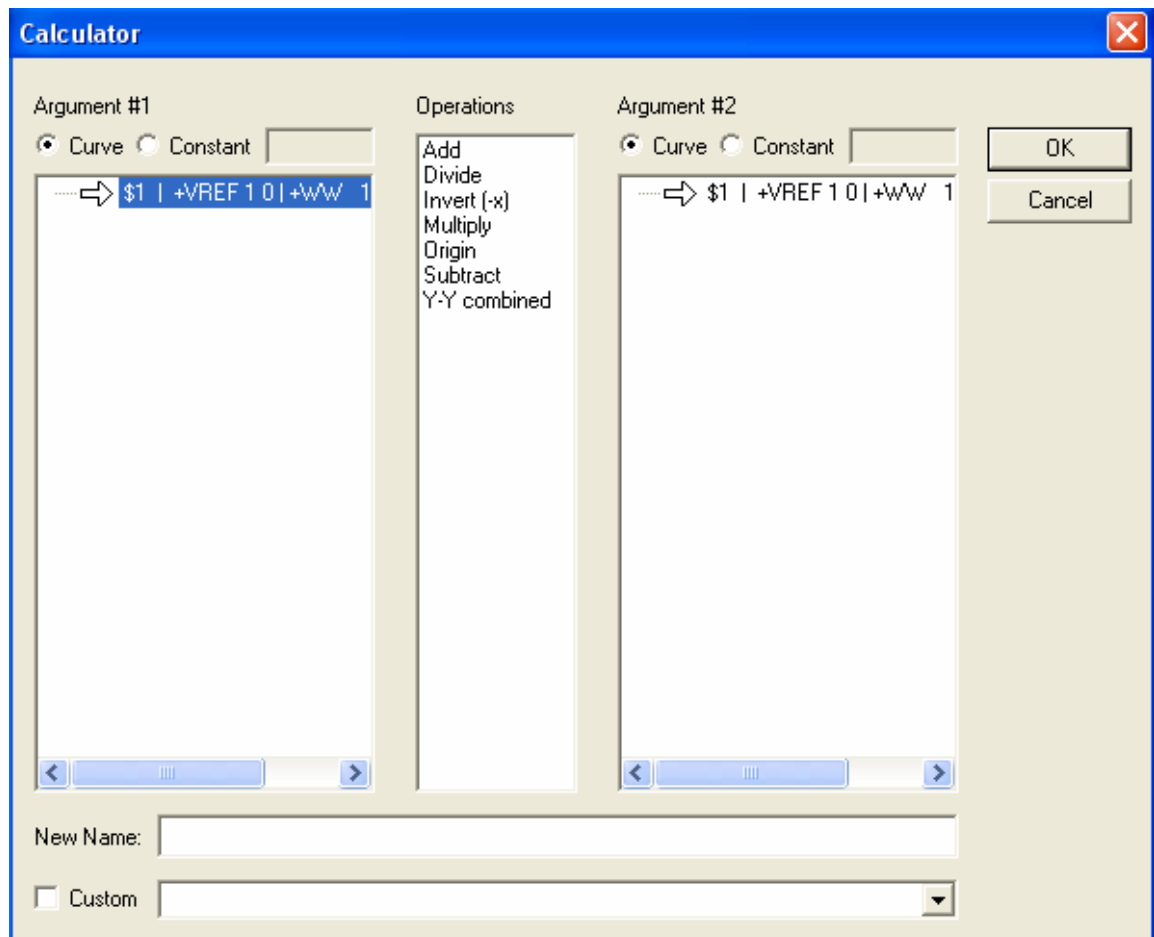
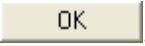
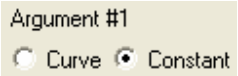


Figura 6.19 – Gerenciador do Gráfico

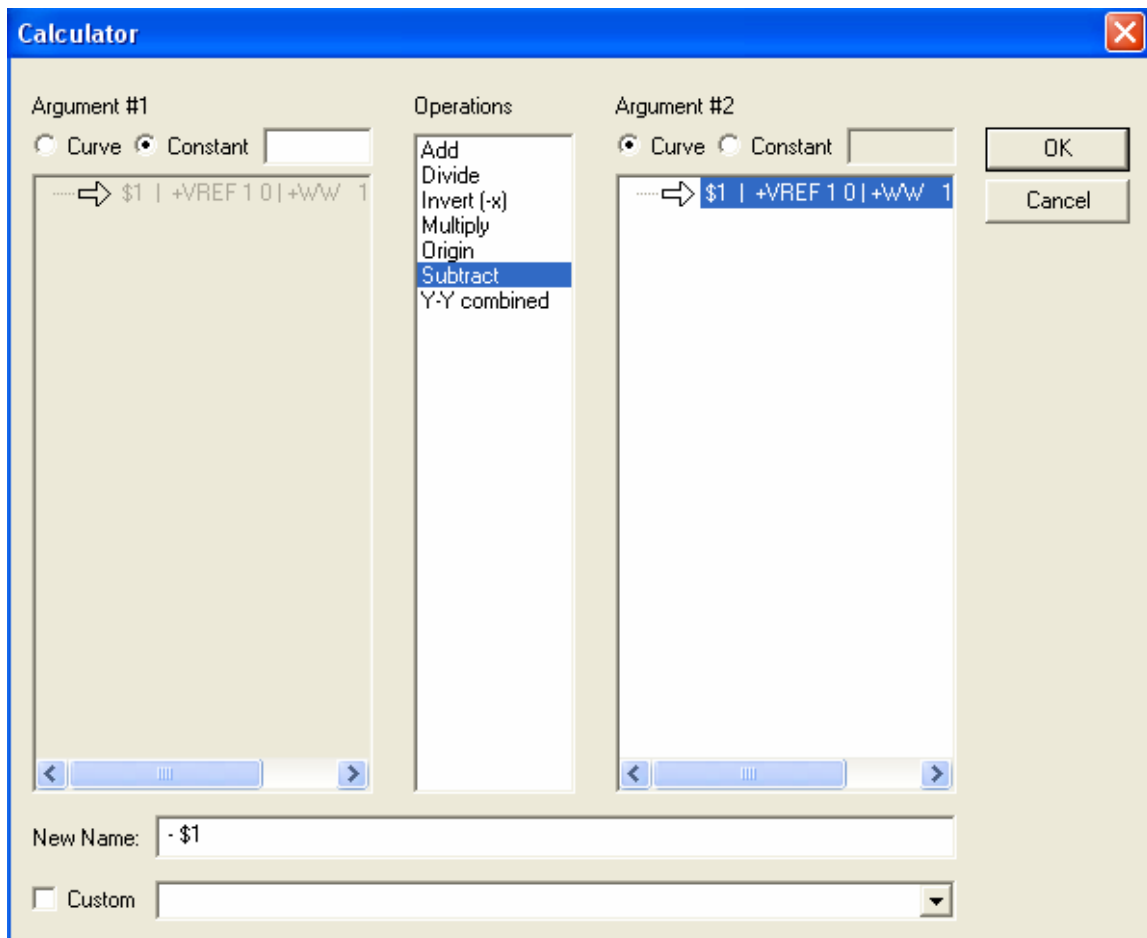
Atualmente só teremos um Gráfico, o atual, sendo mostradas as características dele acima. Como queremos modificar o sinal do Gráfico, deve-se clicar em  (adicionar uma operação – “Add Custom Serie”). Aparecerá então a seguinte janela:



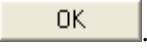
**Figura 6.20 – Calculadora**

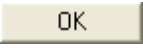
Há duas formas de inverter o Gráfico, uma é clicar diretamente em “Invert(-x)” no espaço “Operation” e em . Outra forma é multiplicando a função por -1, logo, vamos marcar no primeiro campo “Argument #1” (Argumento 1) como “Constant” (Constante), como mostrado: 

Em seguida, em “Operations” (Operações), vamos clicar em “Subtract” (Subtrair). E, finalmente, em “Argument #2”, deixe “Curve” selecionado e clicar na função, ao final desse processo teremos na tela como mostrado na Figura 6.21:

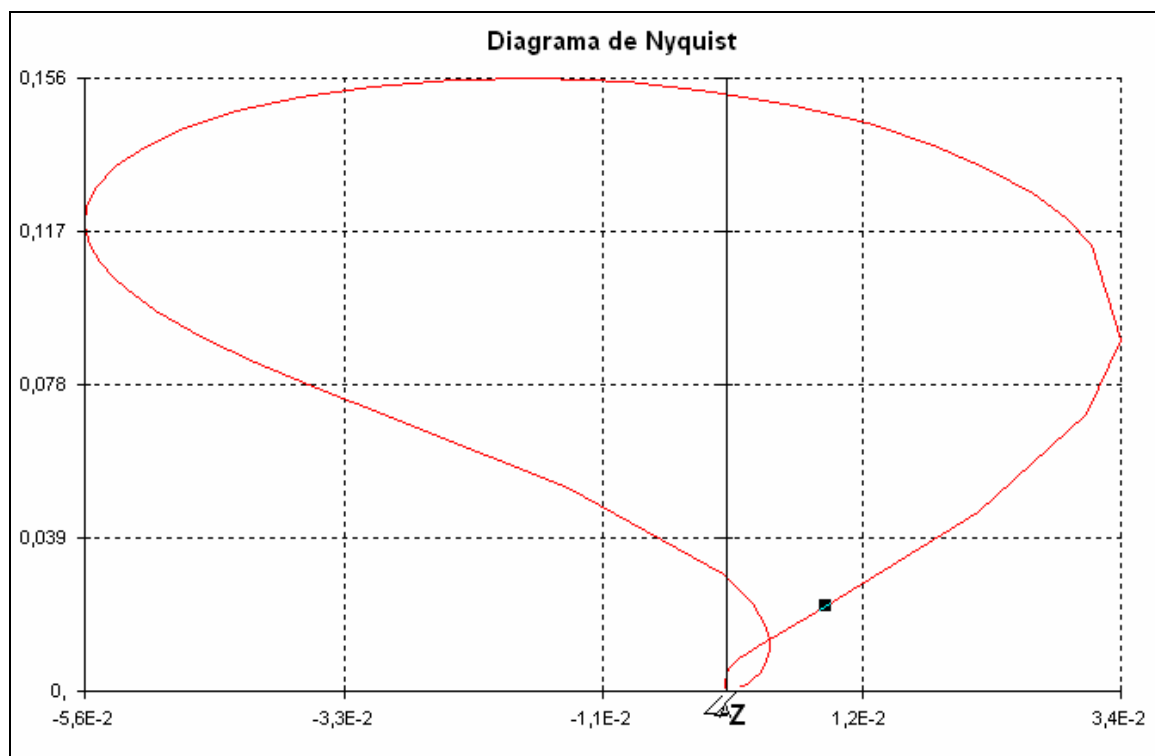


**Figura 6.21 – Calculadora**


Basta então aceitar a operação clicando em .

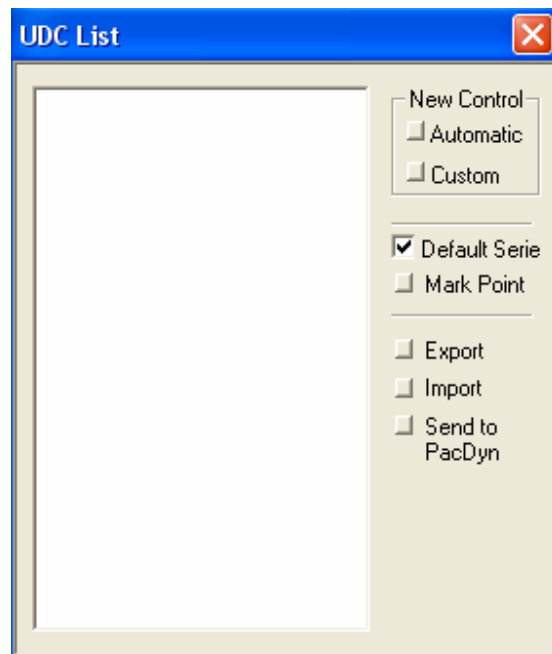
A antiga janela de funções terá agora duas opções, marque apenas a segunda opção (-\$1) e clique novamente em .

O novo Diagrama de Nyquist será mostrado, como na Figura 6.22:



**Figura 6.22 – Diagrama do Sistema com Realimentação Positiva**

Inicialmente devemos clicar em  (projeto). Uma janela nova aparecerá, como mostrado na Figura 6.23:



**Figura 6.23 – Opções para o Controlador Definido pelo Usuário (UDC)**

Onde UDC são Controladores Definidos pelo Usuário (“User Defined Controllers”). Para um maior detalhamento sobre os parâmetros desses controladores o leitor pode consultar capítulo 2 da referência [9].

Vamos adicionar um Novo Controle (“New Control”), e este será planejado de acordo com características do Diagrama de Nyquist. Deve-se então clicar em “Automatic” (Automático), pois vamos apenas clicar nos parâmetros desejados no Diagrama e os cálculos serão feitos pelo programa. Observe a janela na Figura 6.24:

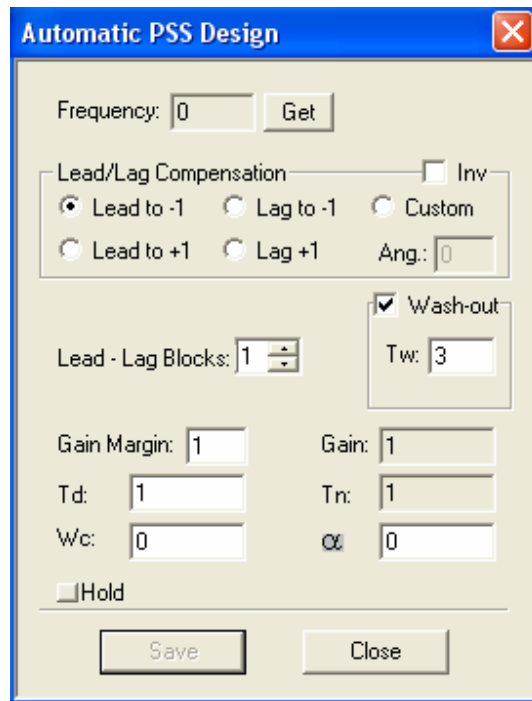


Figura 6.24 – Projeto do Estabilizador

Olhando a Figura acima, podemos observar a estrutura do estabilizador que será projetado. Veja o esquema mostrado na Figura 6.25:

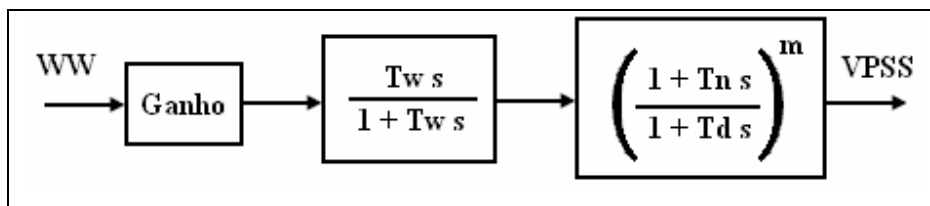


Figura 6.25 – Diagrama de Blocos do Funcionamento do Estabilizador

**$T_w$**  (“Wash-out Time” – Tempo de “Prevenção”) será a constante de tempo do Bloco de Avanço,  **$T_n$**  (“Numerator Time” – Tempo do Numerador) será a constante de tempo do numerador do segundo bloco,  **$T_d$**  (“Denominator Time” – Tempo do Denominador) será a constante de tempo do denominador do segundo bloco, e  **$m$**  será o número de blocos de Avanço-Atraso (“Lead-Lag”)

Inicialmente, vamos obter a frequência de centro no Diagrama de Nyquist. Basta clicar no botão **Get** (Obter), e o cursor será um asterisco, quando se deve clicar no Diagrama de Nyquist na frequência de centro desejada. Essa frequência de centro será obtida de acordo com os Pólos indesejados, os quais se deseja eliminar. No caso, são os Pólos  $-0,032 \pm j 10,595$ . Observando o Diagrama de Bode traçado na Figura 6.11, e novamente mostrado abaixo, podemos ver que a frequência a ser escolhida é a frequência aproximada de 10,57 rad/s:

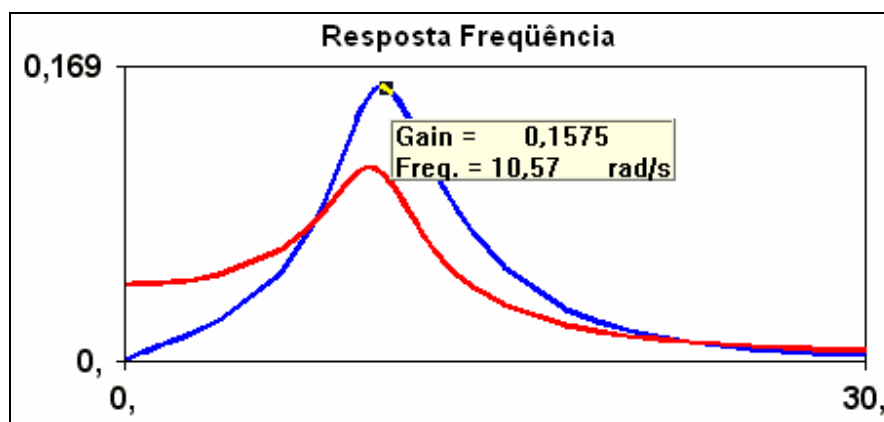
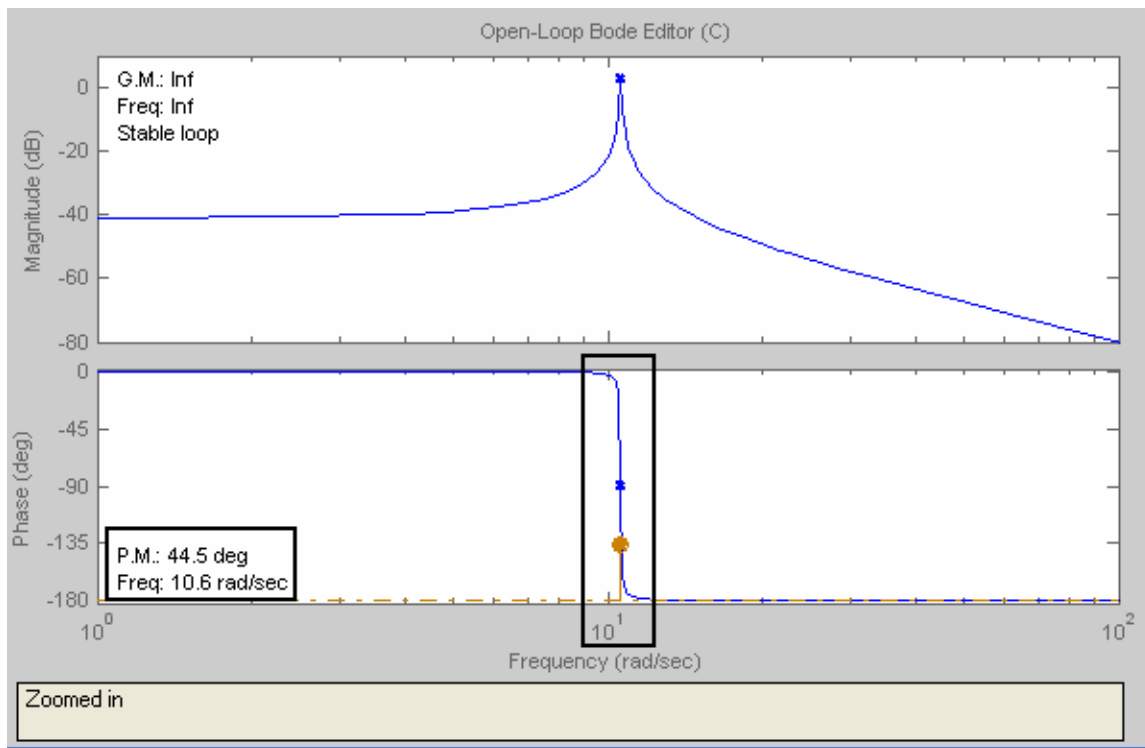


Figura 6.26 – Resposta em Frequência (Diagrama de BODE de Ganho)

Foi traçada pelo software MATLAB, a Função de Transferência, com o Pólo dominante encontrado. Para que tenhamos certeza da frequência do Pólo Dominante, observemos a frequência no Diagrama de BODE da Figura 6.27:

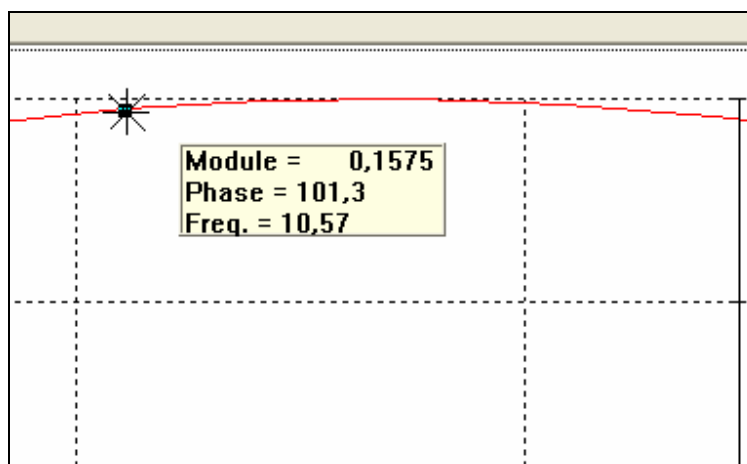


**Figura 6.27 – Diagrama de BODE Traçado no MATLAB**

Podemos notar que o ponto onde o ganho cruza o eixo (P.M. – Margem de Fase) é exatamente onde se encontram os pólos indesejados (complexos conjugados). Observando o quadrado, feito exatamente para realçar o valor onde medimos a margem de fase, vemos que o valor é de 10,6 rad/s.

Vamos então escolher essa frequência, clicando em **Get** e posicionando o mouse em cima do gráfico, como mostrado na Figura 6.28:





**Figura 6.28 – Frequência de Centro a Ser Escolhida**

Escolhendo esse valor, o programa traçará um Diagrama de Nyquist do sistema compensador, em outra cor, como mostrado na Figura 6.29:

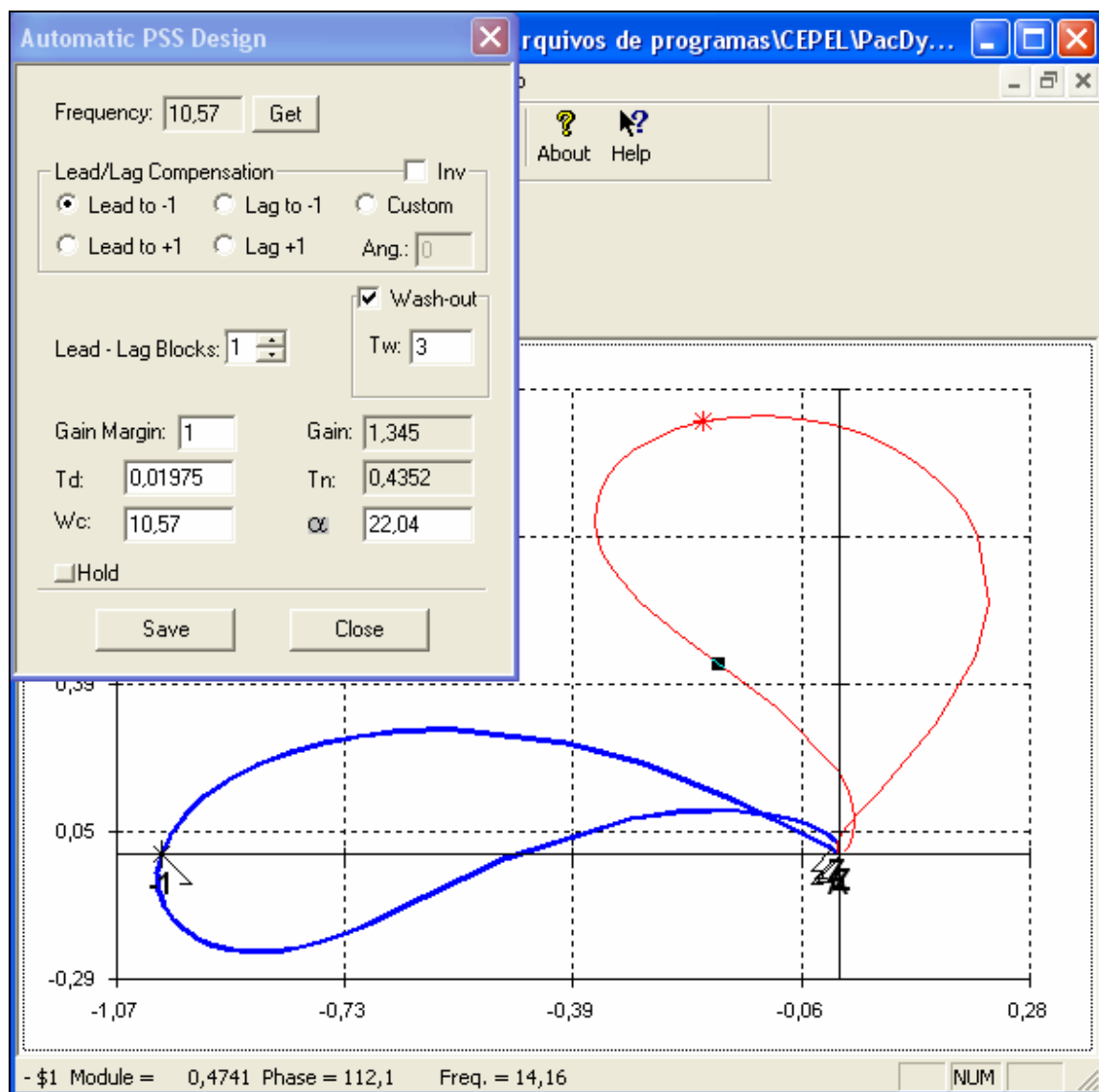
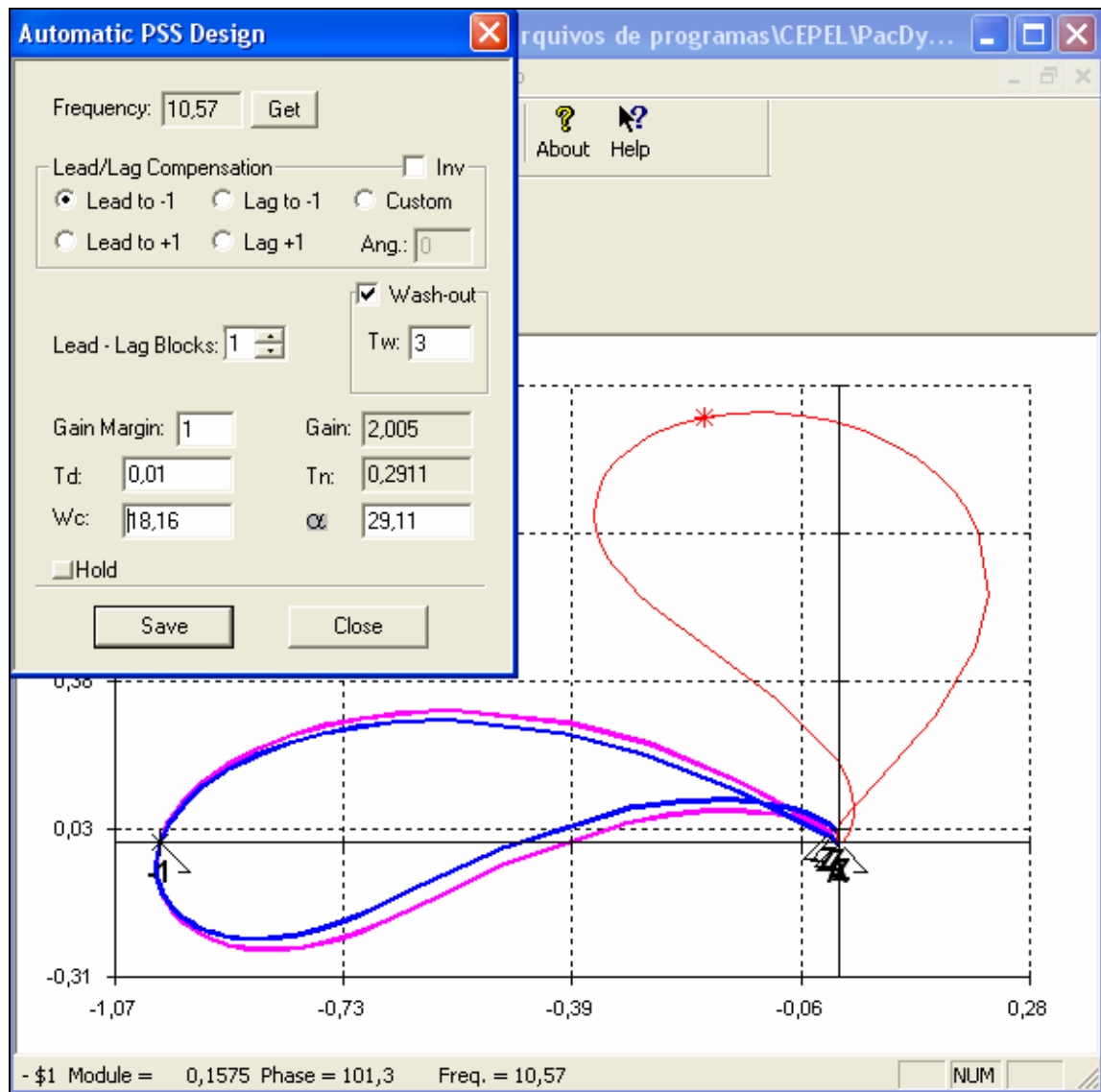


Figura 6.29 – Diagrama de Nyquist do Sistema não Compensado (Vermelho) e do Compensador (Azul)

Devemos agora ajustar o sistema compensador para que a sua resposta seja a mais comportada, vamos aproximar o pólo e o zero (reduzindo o **Td**), e adicionar outro Bloco de Avanço-Atraso ("Lead-Lag Block"), para observar o que acontece com a resposta do sistema.

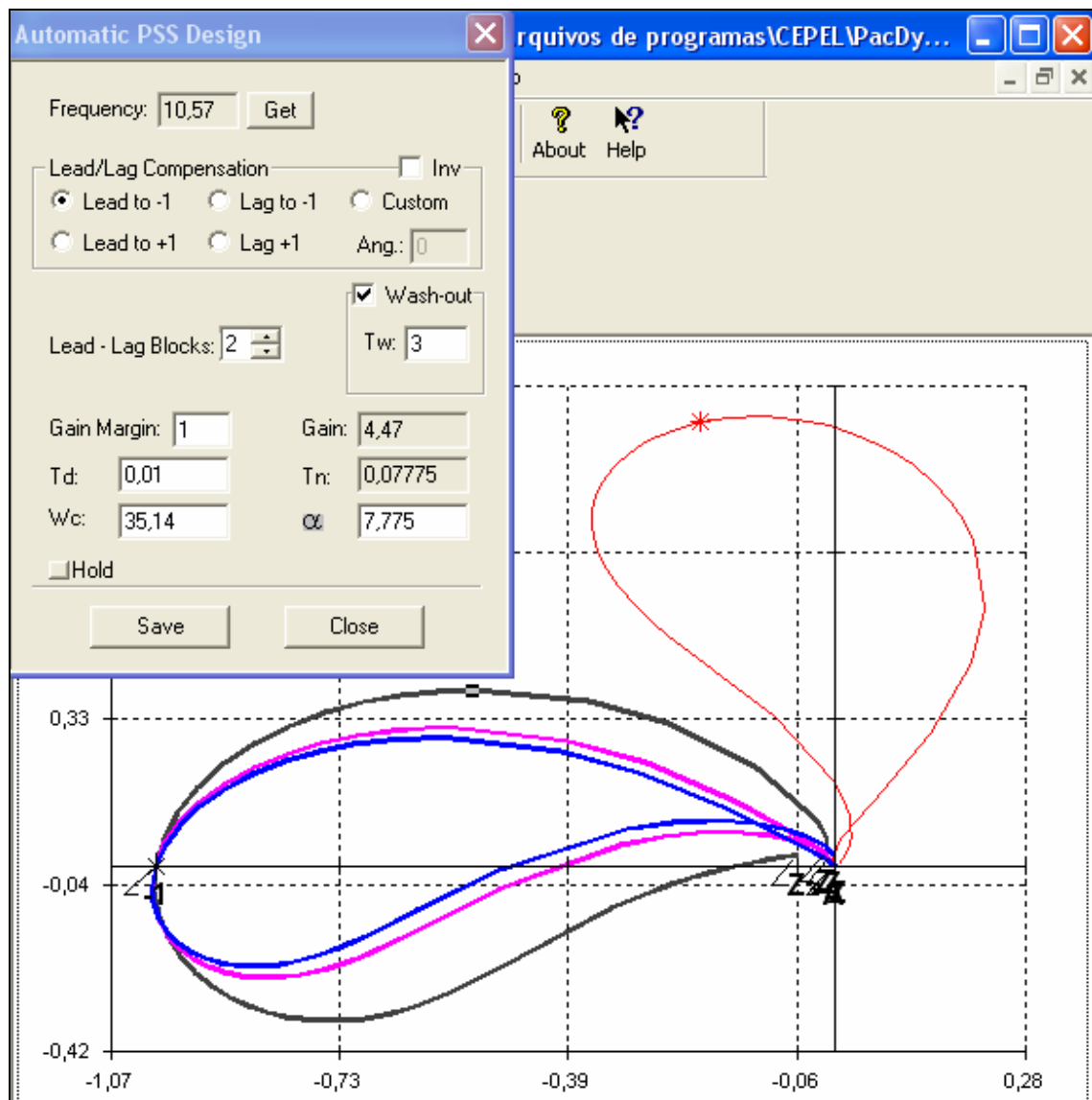
Para modificar o **Td** e observar a transformação no Gráfico, deve-se então clicar em **Hold** e modificar o **Td**. Nesse caso, vamos colocar **Td** de 0,01 e clicar em qualquer outro campo. Observe que um novo traçado em rosa aparecerá:



**Figura 6.30 – Diagrama de Nyquist do Sistema Não-Compensado (Vermelho), do Compensador Inicial (Azul) e do Compensador Melhorado (Rosa)**

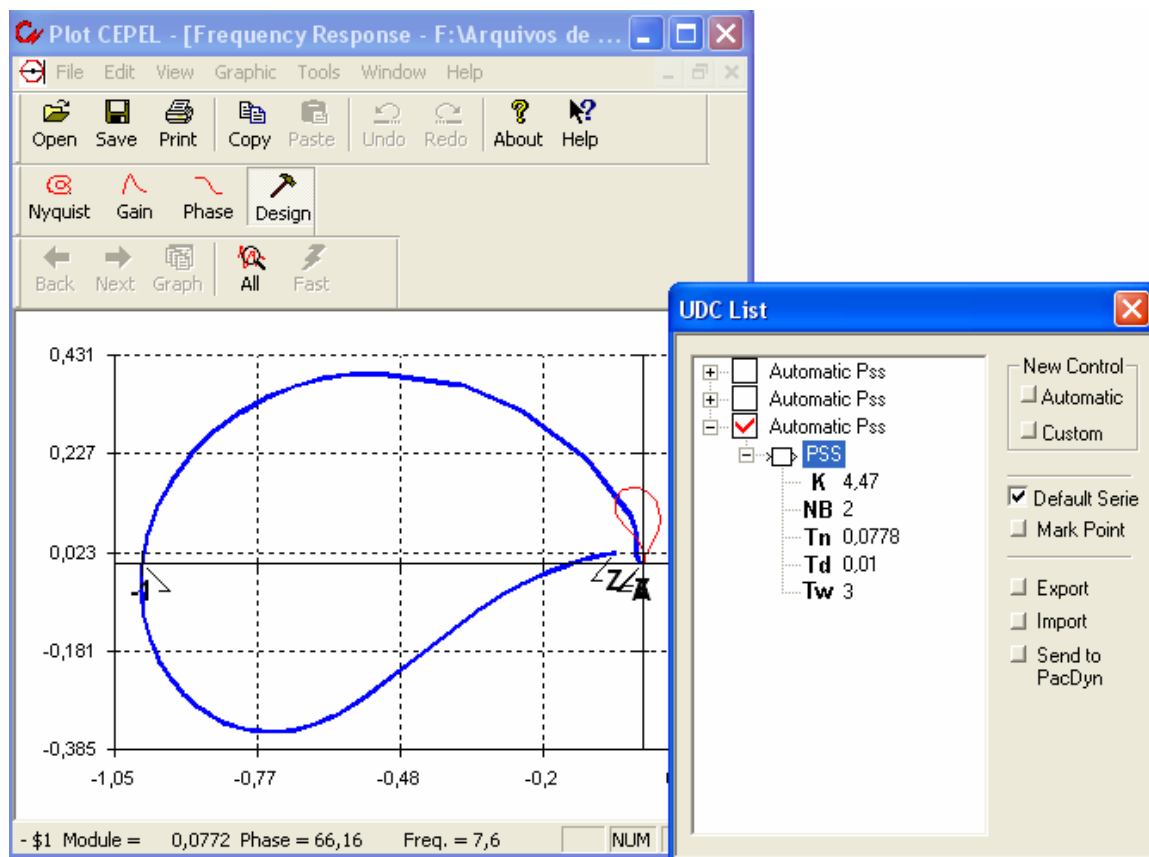
Observamos que a característica mudou, se tornando mais próxima de um círculo, mas ainda podemos observar que o avanço prevalece sobre o atraso. Vamos, então,

adicionar outro bloco de Avanço-Atraso. Para modificar o número de blocos, devemos primeiramente clicar em ☐ Hold e em seguida alterar **Lead - Lag Blocks: 1** para 2. O resultado final está apresentado abaixo:



**Figura 6.31 – Diagrama de Nyquist do Sistema Não-Compensado (Vermelho), do Compensador Inicial (Azul), do Compensador Melhorado (Rosa) e do Compensador Final (Preto)**

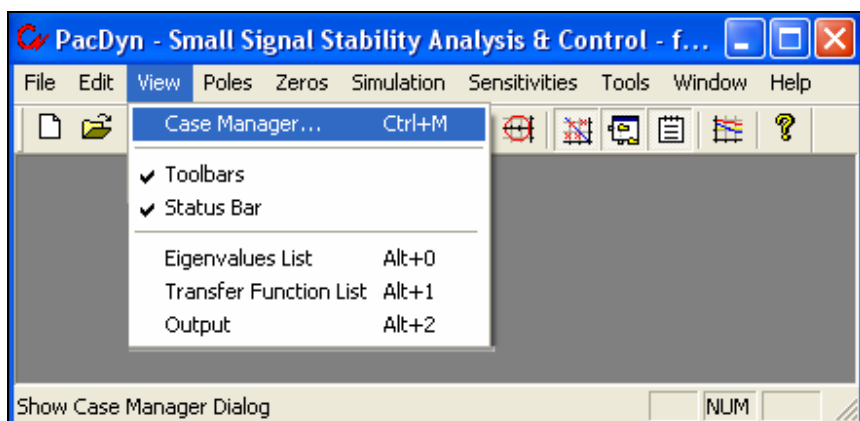
A curva traçada em preto será a nossa resposta final do compensador. Vamos agora adicionar o compensador ao sistema original e verificar a resposta total (sistema + estabilizador). Para adicionar o estabilizador ao sistema deve-se salvar o que acaba de ser feito, clicando em **Save** (salvar), e em seguida podemos fechar, clicando em **Close** (fechar). Devemos então selecionar o último “Automatic PSS” (PSS Automático), mostrado abaixo, e mandá-lo para o PacDyn clicando em **Send to PacDyn** (mandar para o PacDyn):



**Figura 6.32 – Opções do Estabilizador Recém Projetado**

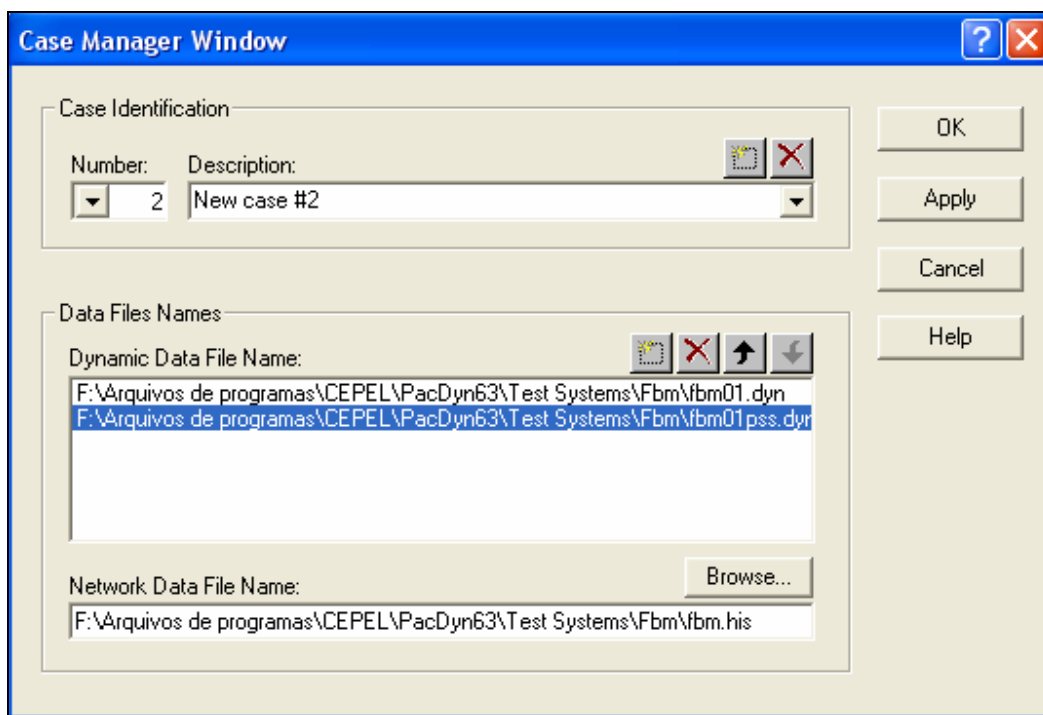
Uma janela se abrirá e deve-se salvar o arquivo que contém o estabilizador (por exemplo, “fbm01pss.dyn”). Em seguida, voltando ao PacDyn, vamos usar o sistema anterior junto com o estabilizador projetado.

Na janela principal, devemos ir em “View” (Ver) e “Case Manager” (Gerenciador do Caso), como mostrado abaixo:



**Figura 6.33 – Janela Principal**

A seguinte janela se abrirá:



**Figura 6.34 – Gerenciador de Casos**

Basta aceitar clicando em . Agora vamos verificar a resposta do sistema compensado.

Primeiramente vamos observar a resposta no tempo:

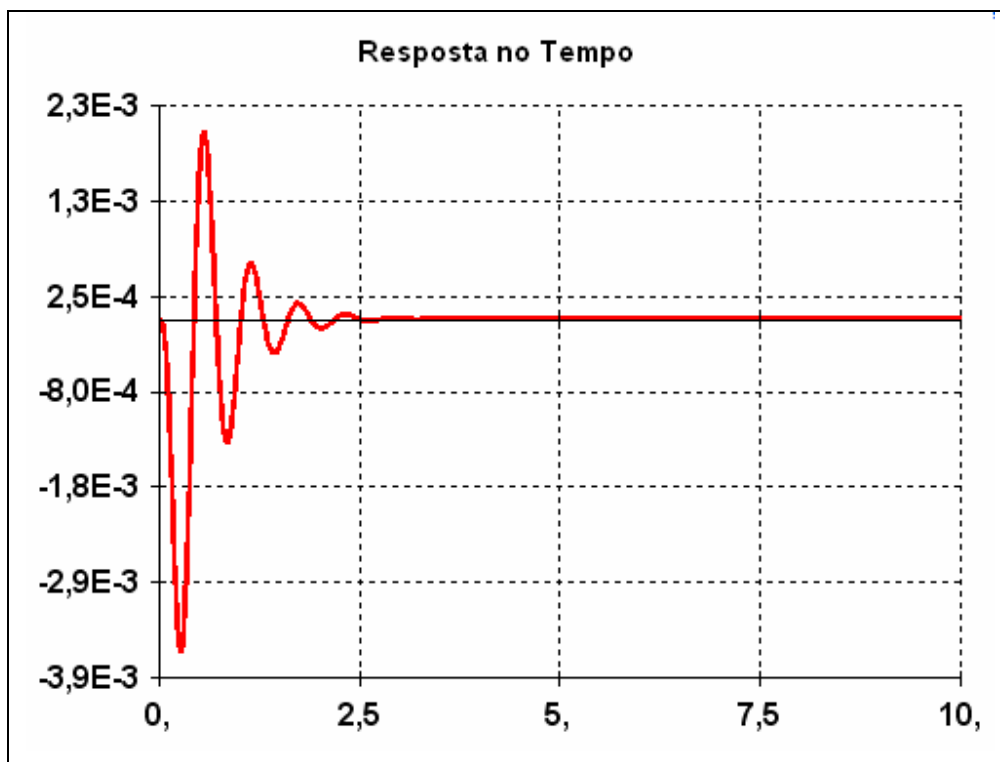
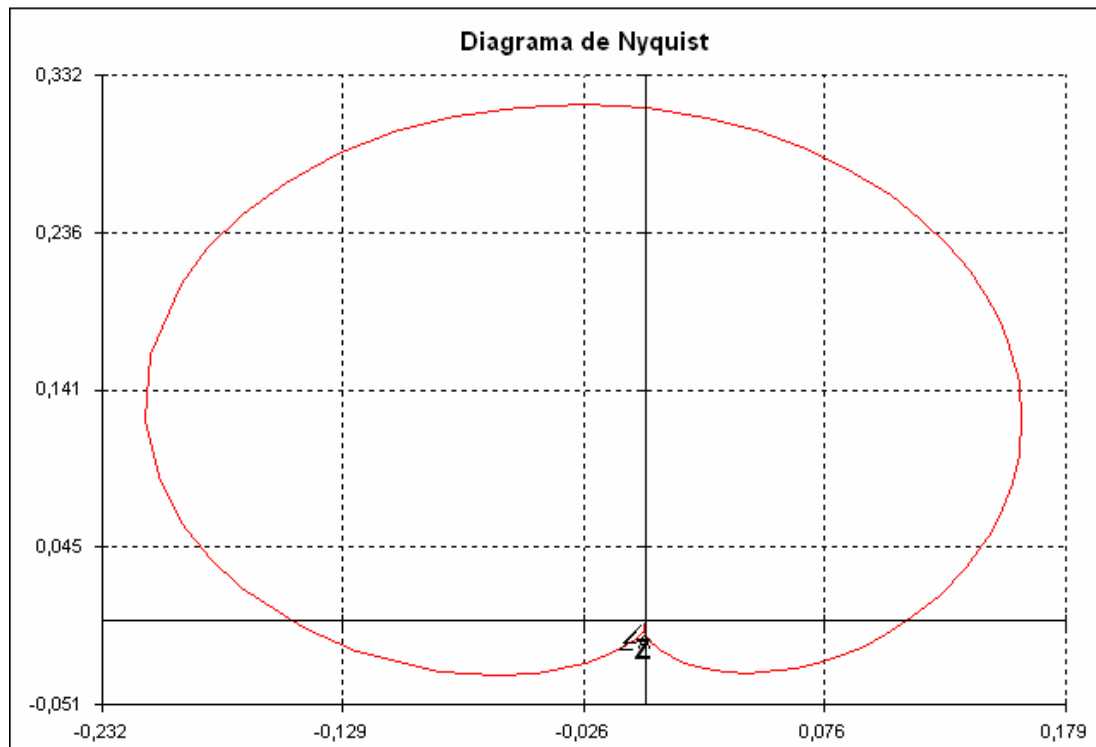


Figura 6.35 – Resposta no Tempo ao Degrau

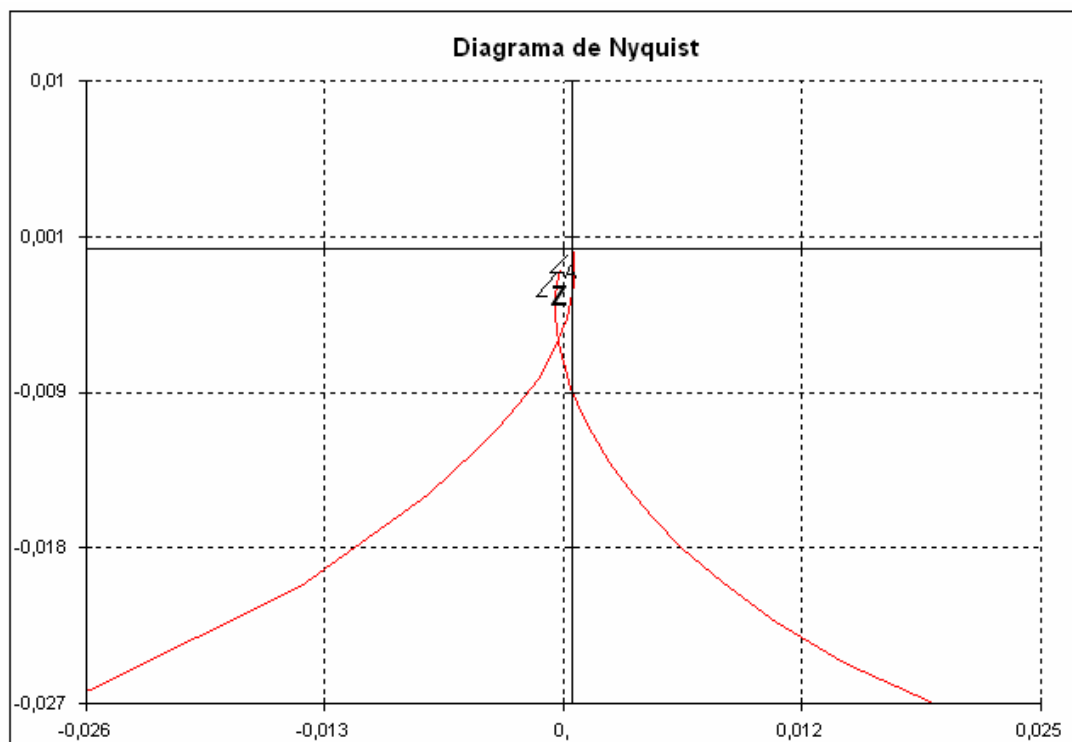
Observamos com a resposta acima que o sistema deixou de ser oscilatório. Vamos comprovar observando o Diagrama de Nyquist:



**Figura 6.36 – Diagrama de Nyquist**

Nesse Diagrama podemos observar que não há envolvimento da origem do Gráfico (veja a Figura 6.37), nem do ponto  $-1 + j0$ , ou seja, não temos Zeros no semiplano direito do plano  $s$  [12], [13].





**Figura 6.37 – Aproximação no Diagrama de Nyquist**

Com o detalhamento mostrado pela Figura 6.37, constatamos que não há envoltórios da origem, ou seja, o sistema será estável se não houver pólos no semiplano direito do plano  $s$ . Como observamos anteriormente, também não há pólos, então o sistema é estável [12], [13].

## 6.2 Exemplo 2 – Sistema Norte-Sul

Nesse exemplo será apresentado, como no exemplo acima, a utilização de técnicas de análise do PacDyn, mas para esse exemplo utilizaremos um sistema maior. O sistema estudado será o sistema Norte-Sul com suas principais usinas geradoras.

Como anteriormente, devemos abrir um arquivo do tipo “.pac” ou criar um novo, onde serão carregados o caso dinâmico “nortesul.dyn” e o histórico “nortesul.his”.

Com o caso carregado, devemos então calcular os pólos do sistema, para termos uma noção do sistema em questão. O que utilizamos anteriormente era simples, com apenas uma máquina, apresentando sete Autovalores. Para esse novo caso, com aproximadamente 130 máquinas, temos 1143 Autovalores, mostrados graficamente (Parte Real x Parte Imaginária) pela Figura 6.38:

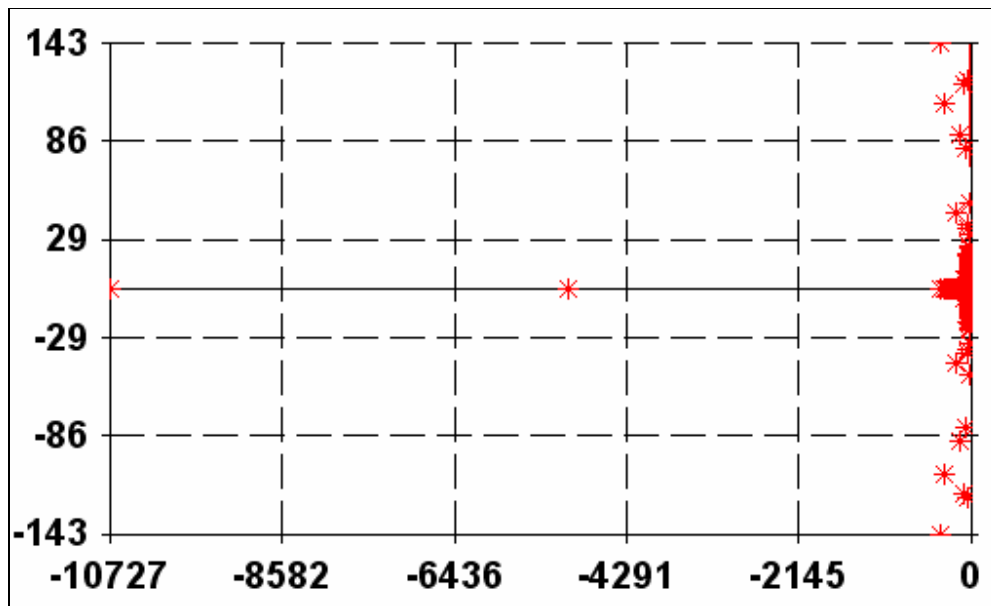


Figura 6.38 – Gráfico Mostrando os Pólos do Sistema

Podemos perceber que a grande maioria dos pólos encontrados estão bem próximos do eixo imaginário. Fazendo um Zoom (aproximação), termos a seguinte visualização, mostrada pela Figura 6.39:

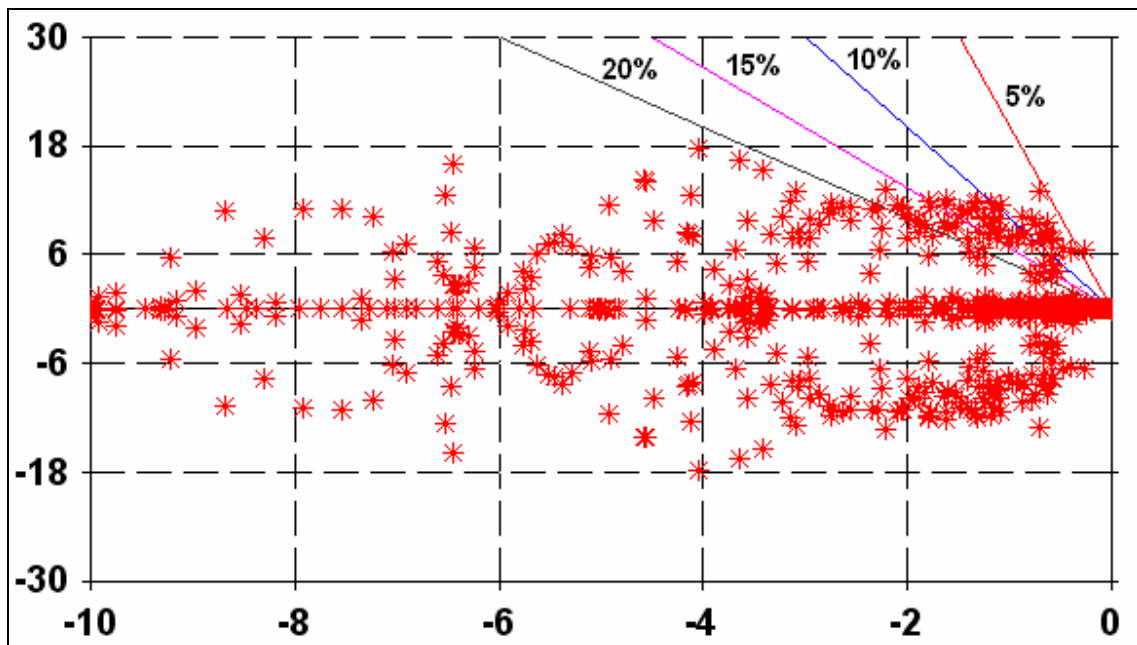
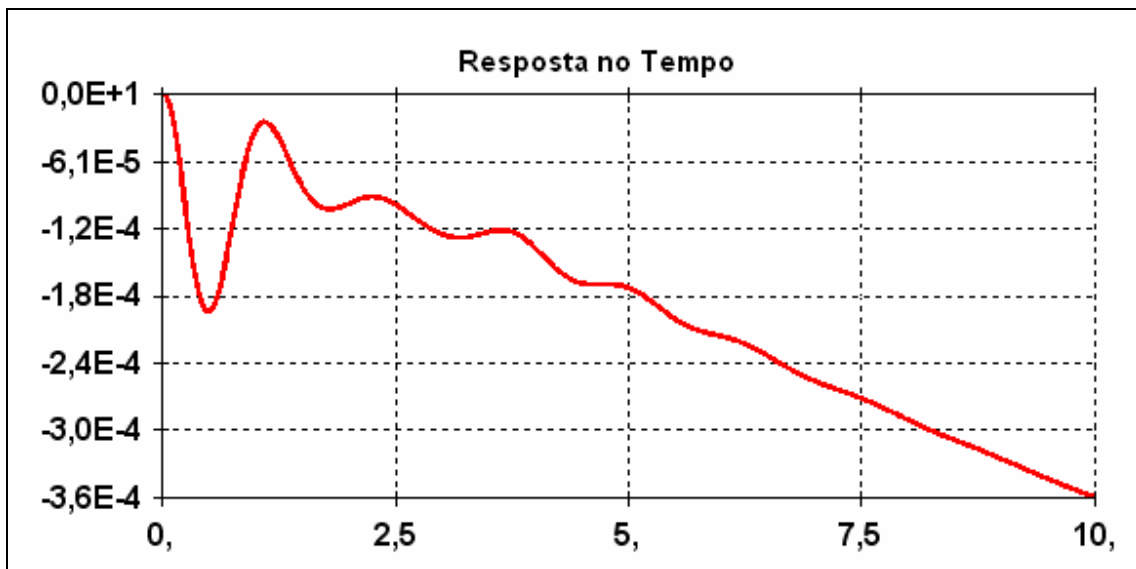


Figura 6.39 – Pólos do Sistema Próximos ao Eixo Imaginário

Observamos, então, o grande número de pólos dominantes no sistema. Só existem dois pólos com amortecimento menor que 5% (reta em vermelho), em  $-0,2708 \pm j 6,6261$ .

Devemos escolher uma Usina e verificar a sua resposta, como no exemplo anterior. Vamos escolher então a Usina de Itaipu (60 Hz e 9 máquinas). A entrada do sistema será a tensão de referência (VREF) de Itaipu, e a saída será a velocidade (WW). Observaremos, então, duas respostas no tempo do sistema: a primeira corresponderá ao intervalo do distúrbio (degrau com amplitude de 0,01 p.u.), e a segunda, dando ênfase ao período após o distúrbio.

Observe a simulação (de 10 segundos) com o distúrbio (de 10 segundos):



**Figura 6.40 – Resposta no Tempo de um Sistema a um Distúrbio por 10 Segundos**

Vemos que o sistema responde de forma a acompanhar o distúrbio (de 0,01), mas de forma lenta, já que a máxima amplitude encontrada foi de 0,00036. Aplicando um distúrbio ao sistema, mas durante um tempo maior (250 segundos), e aumentando o tempo de simulação (250 segundos), observamos a seguinte curva:

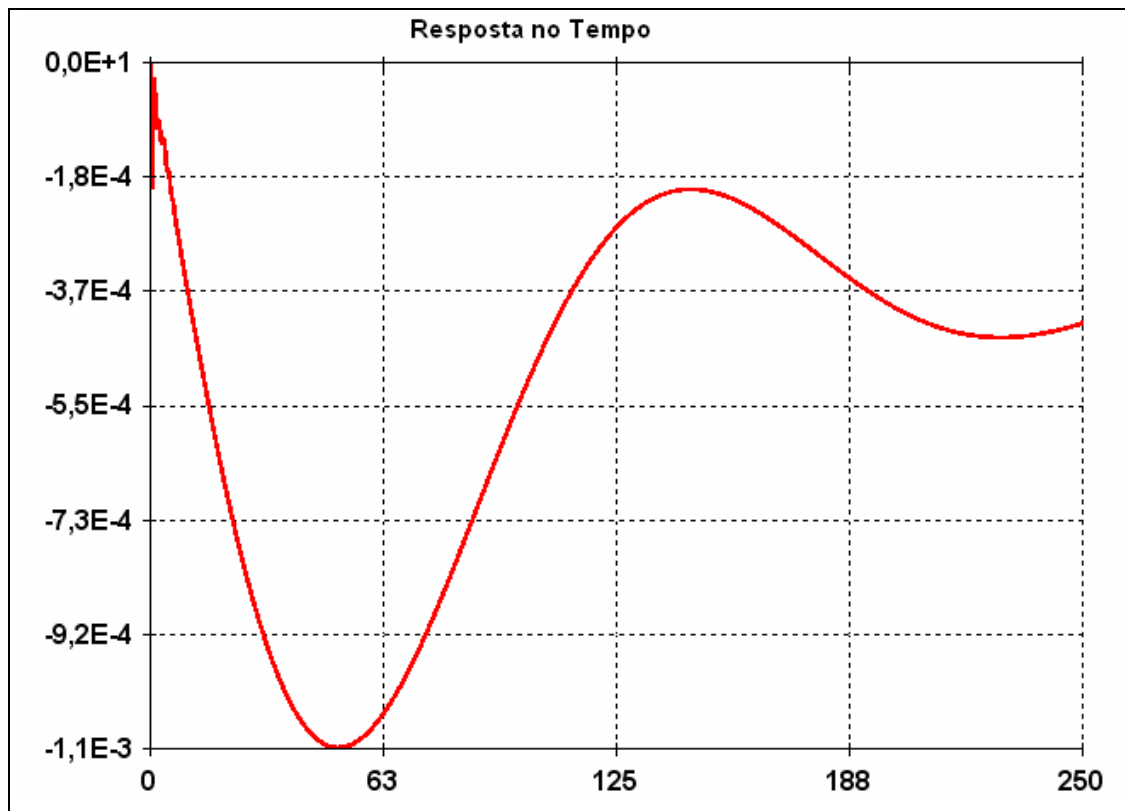
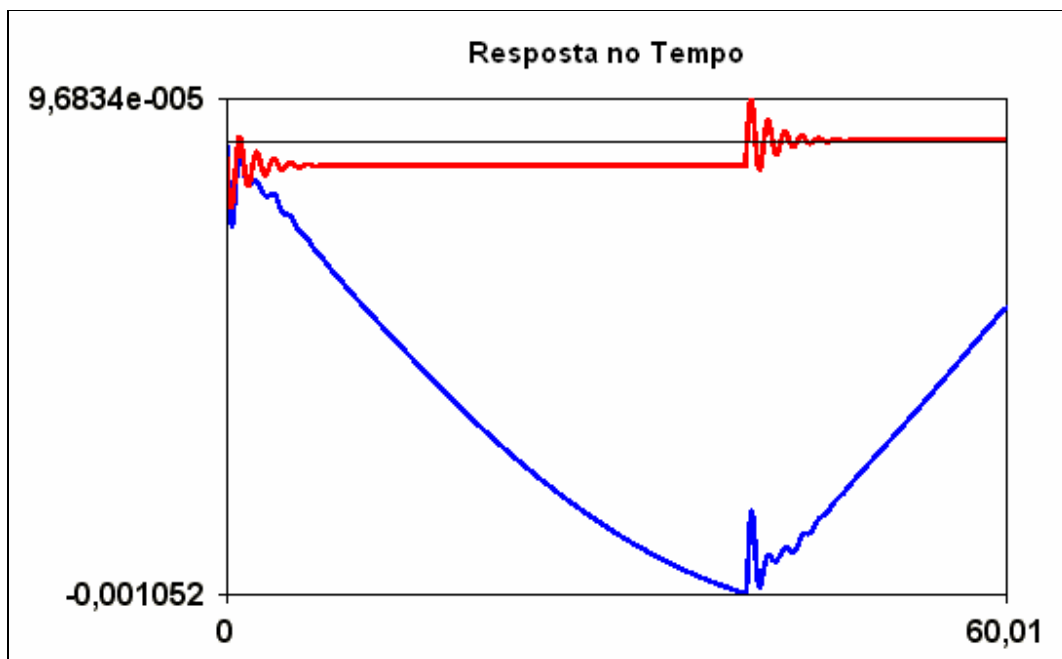


Figura 6.41 – Resposta no Tempo Durante 250 segundos de um Distúrbio

Aqui observamos a mesma característica da curva anterior durante os dez primeiros segundos. Em seguida, o sistema tende a voltar para a posição de equilíbrio. A resposta é muito lenta.

Podemos observar que o sistema é um oscilatório, pois ao aplicarmos o distúrbio durante 250 segundos, ele não conseguiu se estabilizar em um valor.

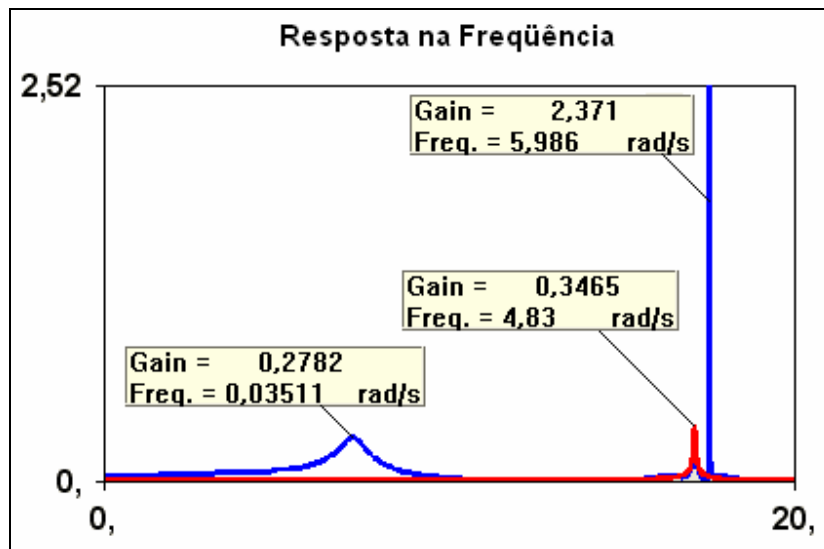
Essa característica não é causada apenas pelo sistema da barra de Itaipu (ou seja, pelos pólos dominantes nessa barra). Para mostrar isso, devemos calcular os Pólos Dominantes do sistema e observar a resposta desse em relação à do sistema completo. Veja na Figura 6.42 a resposta no tempo do sistema completo (em azul) e dos Pólos Dominantes (em vermelho – localizados em  $-0,5735 \pm j 4,8207$ ):



**Figura 6.42 – Resposta no Tempo Comparando o Sistema Completo (Azul) com o Sistema Formado pelo Pólo Dominante Calculado (Vermelho)**

Observe que, na característica acima, os Pólos Dominantes da máquina respondem de forma oscilatória, mas não tendem a mudar muito de amplitude, enquanto a característica total é uma soma dessa característica oscilatória com uma mudança de amplitude, caracterizada pela ligação dessa usina a outras usinas e componentes do Sistema Norte-Sul, de forma que outros pólos interferem na resposta final do sistema.

Analisando a Resposta em Frequência total (em Azul, na Figura 6.43) comparada com a do pólo dominante encontrado, (em vermelho, mostrada na Figura 6.43), pode-se observar que a resposta total (em azul) difere da resposta dos Pólos Dominantes por dois fatores nas frequências de 0,035 rad/s e 5,986 rad/s:



**Figura 6.43 – Diagrama de BODE Comparando o Sistema Completo (Azul) com o Sistema Formado pelo Pólo Dominante Calculado (Vermelho)**

Essas perturbações na resposta em frequência são resultantes de pólos de outras usinas. Pelo Diagrama de BODE acima podemos identificar a parte complexa dos Pólos duplos pela frequência onde estão as perturbações mostradas em detalhe acima. Com essas frequências chegamos aos seguintes pares de Pólos:

**Tabela 6.2 – Pólos Encontrados**

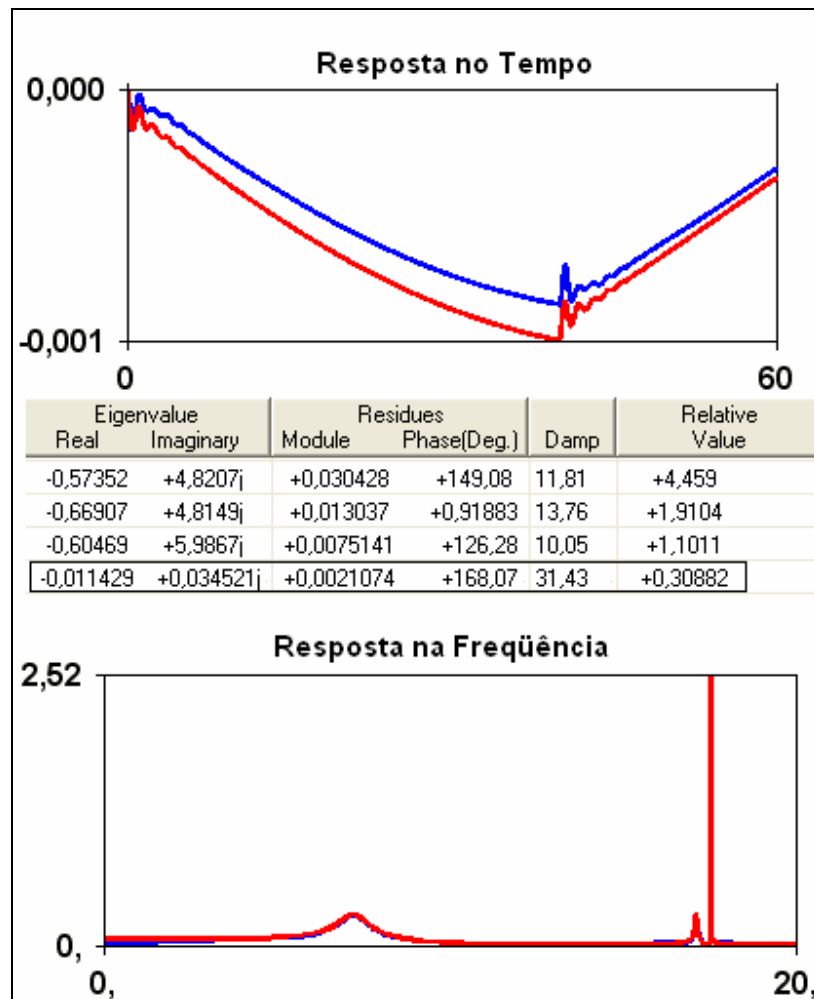
Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
-0.01143	0.03452	0.03636	0.00549	31.430	DELT TUC.GR1--5MQ# 6419 0
-0.01143	-0.03452	0.03636	-0.00549	31.430	
-0.5735	-4.8207	4.8547	-0.7672	11.814	
-0.5735	4.8207	4.8547	0.7672	11.814	WW ITAIPU60-9MQ# 1107 0
-0.6047	5.9867	6.0171	0.9528	10.049	DELT JACUI----6MQ# 1162 0
-0.6047	-5.9867	6.0171	-0.9528	10.049	

O procedimento usado para se chegar nos valores dos Pólos foi observar a frequência no Diagrama de BODE e procurar nos Autovalores calculados inicialmente, chegando aos valores acima.

Utilizando valores próximos aos acima como “Shifts” (valores iniciais), chegaremos então a uma resposta próxima da mostrada em azul na Figura 6.42. Para

que a resposta fique próxima da desejada, utilizaremos um “Shift” (valor inicial) além dos três anteriores, que será um dos Autovalores da Usina de Itaipu ( $-0,6691 \pm j 4,8149$ ).

A resposta então será a mostrada na Figura 6.44:



**Figura 6.44 – Respostas dos Pólos Dominantes mais Próxima ao Sistema Completo**

Podemos observar que a resposta dos novos pólos chega mais próxima (fica praticamente impossível chegar a uma resposta idêntica, pois o sistema é formado por muitos componentes e como observamos, eles influenciam também a resposta dos demais componentes) do sistema completo (em azul). E ficam destacados os



Autovalores em  $-0,011429 \pm j 0,034521$ , principais responsáveis pela resposta do sistema se curvar, como mostrado abaixo:

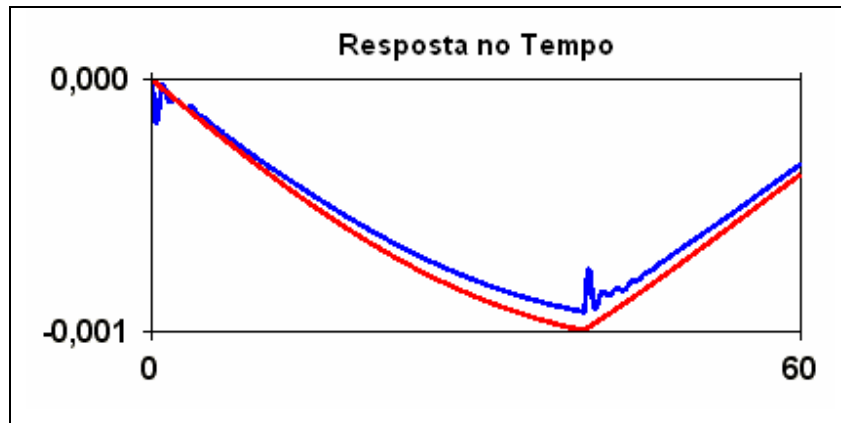
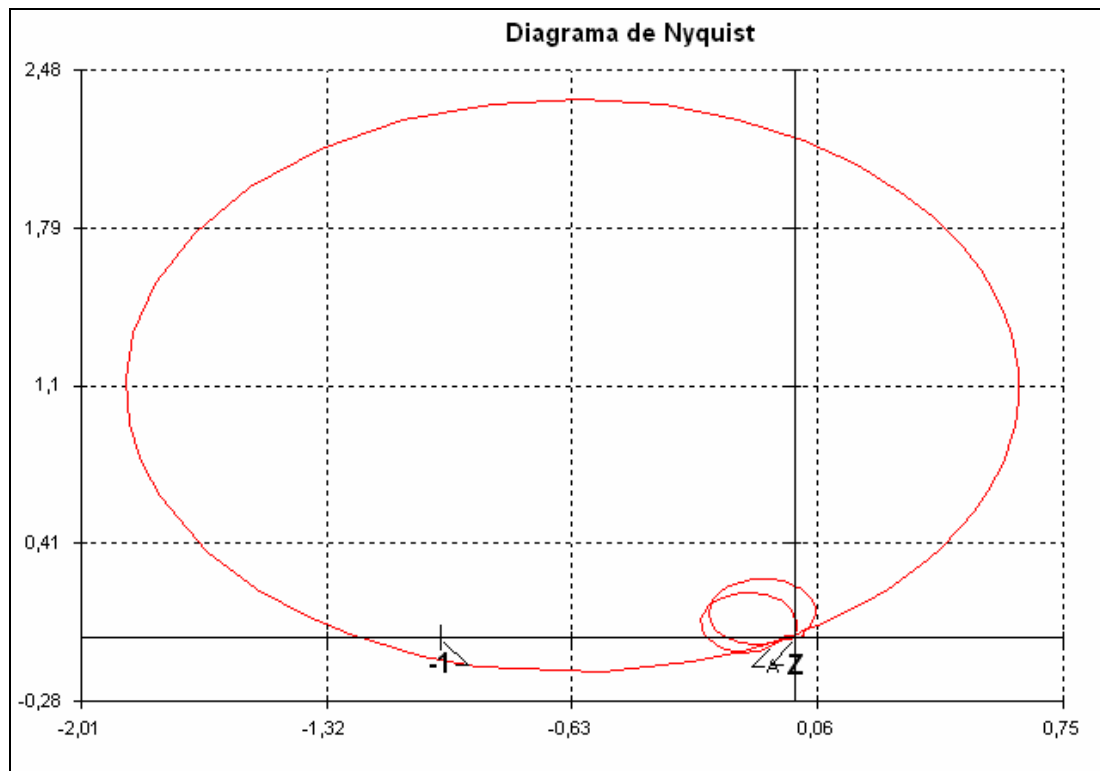


Figura 6.45 – Resposta no Tempo dos Pólos  $-0,011429 \pm j 0,034521$

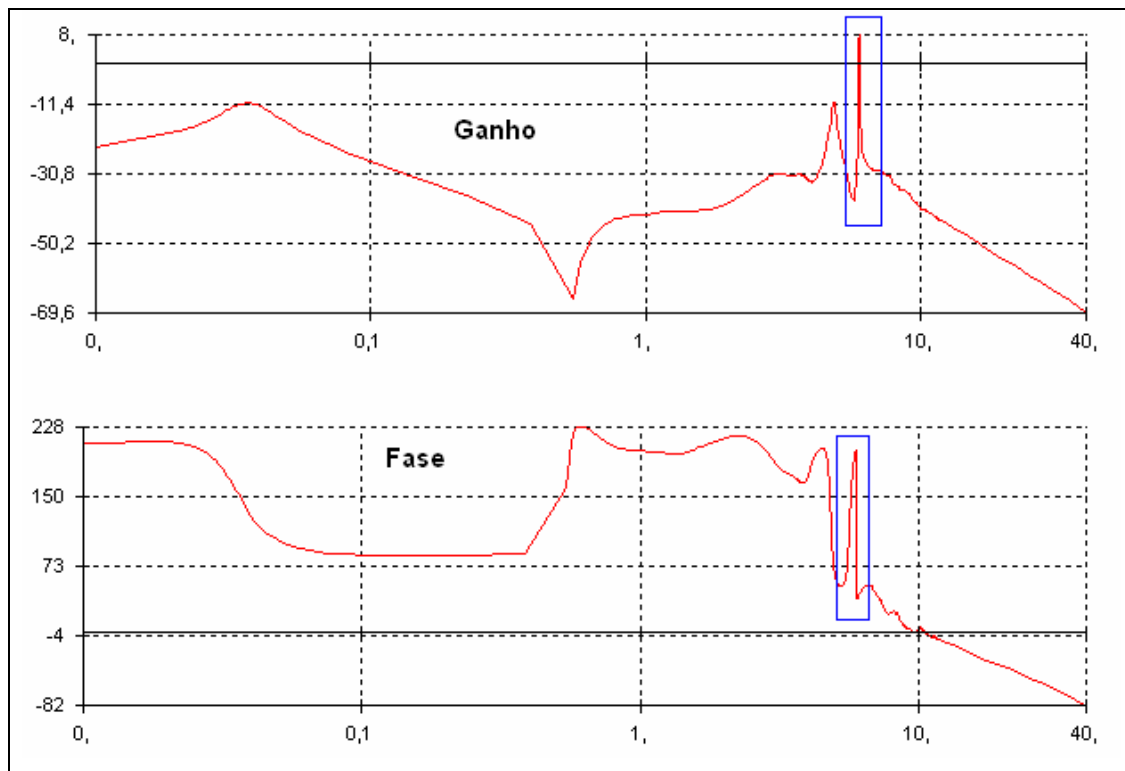
Agora iremos observar a Resposta no Domínio da Frequência. Utilizaremos uma faixa de frequências entre 0,01 e 20 rad/s e um fator de amortecimento de 10%, chegando ao seguinte Diagrama de Nyquist:



**Figura 6.46 – Diagrama de Nyquist para Amortecimento 10%**

Observando o Diagrama de Nyquist acima vemos que o Diagrama envolve o ponto  $-1 + j0$ , no sentido horário, ou seja, existe um zero no semiplano direito do plano  $s$ , caracterizando então um sistema instável [12], [13].

São os seguintes Diagramas de BODE (Ganho e Fase):



**Figura 6.47 – Diagrama de BODE**

Observamos que existe no sistema uma faixa de instabilidade no sistema, onde a margem de ganho é positiva (onde o Diagrama de Nyquist circula o ponto  $-1 + j 0$ ), que está marcada em azul. Como visto anteriormente, o sistema apenas apresenta uma resposta lenta, mas não instável. Mas com as características observadas pelo Diagrama de BODE e Nyquist poderíamos dizer que o sistema tem características instáveis [12], [13].

Algumas técnicas não foram mostradas nesse trabalho, como, por exemplo, o cálculo de zeros, Controlabilidade, Observabilidade, “Modes Shapes” e etc.

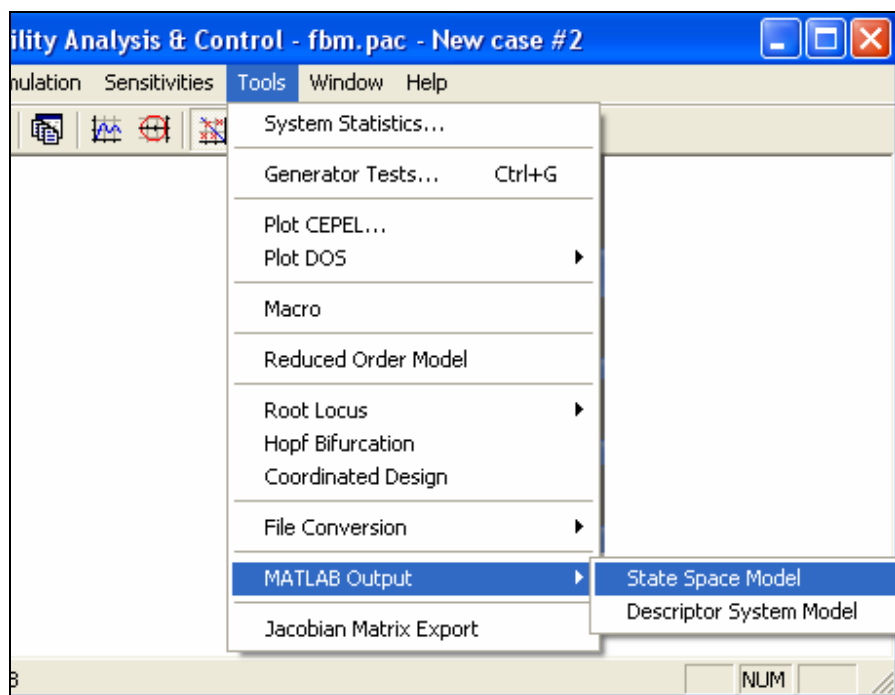
### 6.3 Exemplo 3 – Conversão PacDyn -MATLAB no Formato de Espaços de Estados

Nesse exemplo será apresentado o método de transformação de um sistema no PacDyn para o MATLAB.

Vamos utilizar o mesmo sistema utilizado no exemplo anterior, podemos assim comparar as respostas obtidas no MATLAB com as observadas no PacDyn.

Inicialmente, devemos abrir o arquivo “.pac” ou criar um caso novo. Os arquivos dinâmicos utilizados serão fbm01.dyn e pss01.dyn e o histórico será o fbm.his.

Em seguida, vamos clicar na janela principal em “Tools” (Ferramentas) e em “MATLAB Output” (Saída MATLAB) e podemos escolher se o arquivo será em espaços de estados ou sistema descritor. Usaremos primeiramente a representação em espaços de estados, como mostrado na Figura 6.48:



**Figura 6.48 – Janela Principal**

Em seguida, temos que escolher as variáveis de entrada e a barra onde ela se encontra. Usaremos a entrada VREF na Barra 1. Após digitar, deve-se dar ENTER, em seguida digitar “end” e, em seguida, entrar com a variável de saída, no caso será WW na Barra 1, e em seguida “end”, como mostrado na Figura 6.49:

```

Name Id#01 Id#02 Id#03 Weight
*--*+*---* *---* *---* *---*
VREF      1
end

Choose one of the permitted Output Variables:

          WW   PT   QT   VPSS TETA VB
          PIJ  QIJ  XSS  IIJ  RAIJ XAIJ
          EQ-M EQ-A IFD  BSHU DELT EFD
          IDC  DCSS VDC  ALFA PDC  QDC
          PLD  QLD  PMEC ED2  EQ2  EQ1
          VBI  VBJ  VUDC GAMA PSHU QSHU
          VTR  XOUT MI   ID   IQ   XIFD
          WMAS SLIP

Name Id#01 Id#02 Id#03 Weight
*--*+*---* *---* *---* *---*
WW      1
end
Writing input matrix...
Writing output matrix...
Writing direct transmission matrix...

Done.
```

Figura 6.49 – Escolha das Variáveis de Entrada e Saída do Espaço de Estados

Ao fazer isso, o programa criará um arquivo chamado “matlab.out” numa pasta dentro do diretório onde estão os arquivos dinâmicos e históricos usados. A pasta chama-se Case e terá um número, de acordo com o caso que está sendo utilizado. Olhando a Figura 6.33, o caso rodado lá é o Case #2.

Copiando o arquivo “matlab.out” para uma outra pasta qualquer, devemos utilizar uma rotina a qual transforme esse arquivo “.out” em um formato que o programa MATLAB entenda. Dentro do diretório do PacDyn, existe uma pasta chamada

MATLAB (\CEPEL\PacDyn63\MATLAB). Nesse diretório existem dois arquivos “.m”, “pacstat.m” e “pacdesc.m”. O primeiro contém uma rotina que transforma os dados do arquivo “matlab.out” em variáveis de estado, o segundo deve ser utilizado quando o arquivo “matlab.out” foi gerado no PacDyn para ser um modelo do sistema descritor (“Descriptor System Model”) e, da mesma forma, como o “pacstat.m”. Essa rotina faz com que o arquivo “.out” seja transformado em variáveis entendidas pelo MATLAB. Copiamos então o arquivo “pacstat.m” para a mesma pasta onde copiamos o “matlab.out”.

Agora faremos a conversão dos dados do arquivo “matlab.out” em variáveis de estado. Dentro do MATLAB, devemos escolher a pasta onde se encontram os arquivos copiados. Com o comando “help pacstat” temos acesso ao comando o qual transfere os dados do arquivo “matlab.out” para variáveis de estado.

O comando é:

```
>> [A,b,c,d] = pacstat('matlab.out');
```

Em seguida, o MATLAB diz o tamanho da matriz do sistema:

State Matrix Dimension = 10

Isso significa que a matriz A é uma matriz 10x10, a matriz B é uma matriz 10x1 (1, pois apenas escolhemos uma entrada para o sistema – SI, “single input”, entrada única), a matriz C é uma matriz 1x10 (1, pois escolhemos apenas uma saída para o sistema – SO, “single output”, saída única) e a matriz D é uma matriz 1x1 (sistema SISO).

Agora podemos começar a comparar os sistemas. Calculando os Autovalores no PacDyn, obtemos:

**Tabela 6.3 – Autovalores Encontrados no PacDyn**

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)
<b>1</b>	-2.1573	10.569	10.787	1.6821	20.000
<b>2</b>	-2.1573	-10.569	10.787	-1.6821	20.000
<b>3</b>	-6.6686	12.697	14.341	2.0208	46.499
<b>4</b>	-6.6686	-12.697	14.341	-2.0208	46.499
<b>5</b>	-101.69	10.057	102.19	1.6006	99.515
<b>6</b>	-101.69	-10.057	102.19	-1.6006	99.515
<b>7</b>	-42.362	0.	42.362	0.	100.00
<b>8</b>	-25.424	0.	25.424	0.	100.00
<b>9</b>	-2.1795	0.	2.1795	0.	100.00
<b>10</b>	-0.3367	0.	0.3367	0.	100.00

Calculando pelo MATLAB:

>> eig(A)

```
>> eig(A)

ans =

    -101.69006679747 +    10.0570279101855i
    -101.69006679747 -    10.0570279101855i
    -42.3615647851425
    -6.66859638462478 +    12.696754806685i
    -6.66859638462478 -    12.696754806685i
    -2.15733701390174 +    10.5687500199458i
    -2.15733701390174 -    10.5687500199458i
    -25.4244675464663
    -2.17945755554965
    -0.3366789581014
```

**Figura 6.50 – Autovalores encontrados no MATLAB**

Comparando os Autovalores encontrados, Figuras 6.50 e Tabela 6.3, vemos que são os mesmos Autovalores.

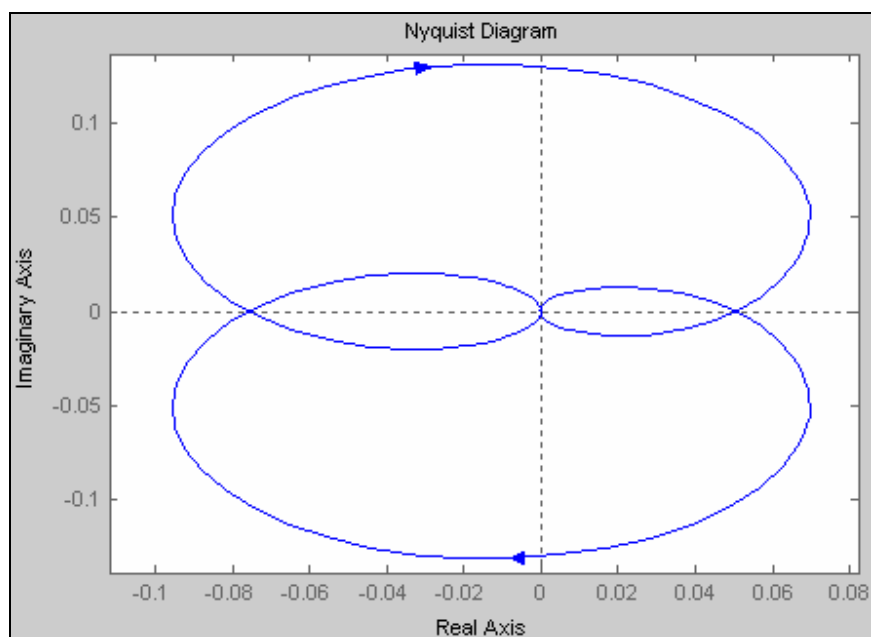
Outras operações podem ser executadas no MATLAB, como, por exemplo, a transformação de espaço de estados em Função de Transferência, com o comando:

```
>> [num,den] = ss2tf(A,b,c,d);
```

```
>> G = tf(num,den);
```

Dessa forma, agora temos uma função  $G$ , como sendo a Função de Transferência do sistema. Podemos então traçar Nyquist da Função:

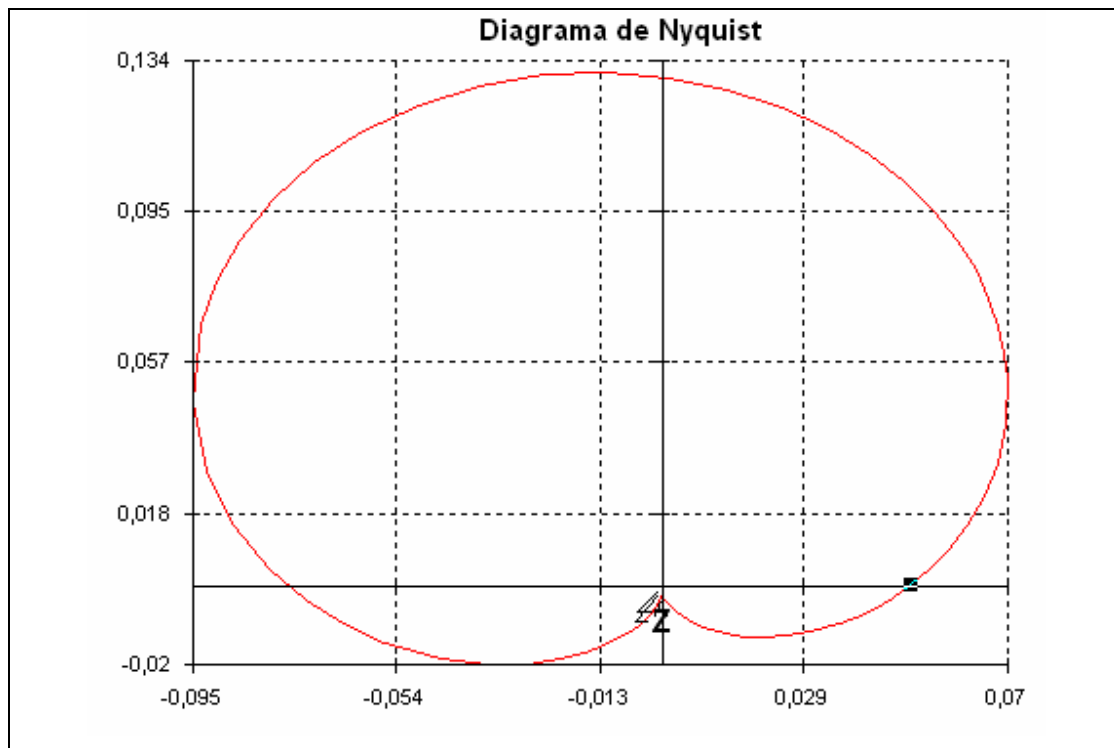
```
>> nyquist(G);
```



**Figura 6.51 – Diagrama de Nyquist MATLAB**

E compará-lo com a Resposta em Frequência do programa PacDyn:



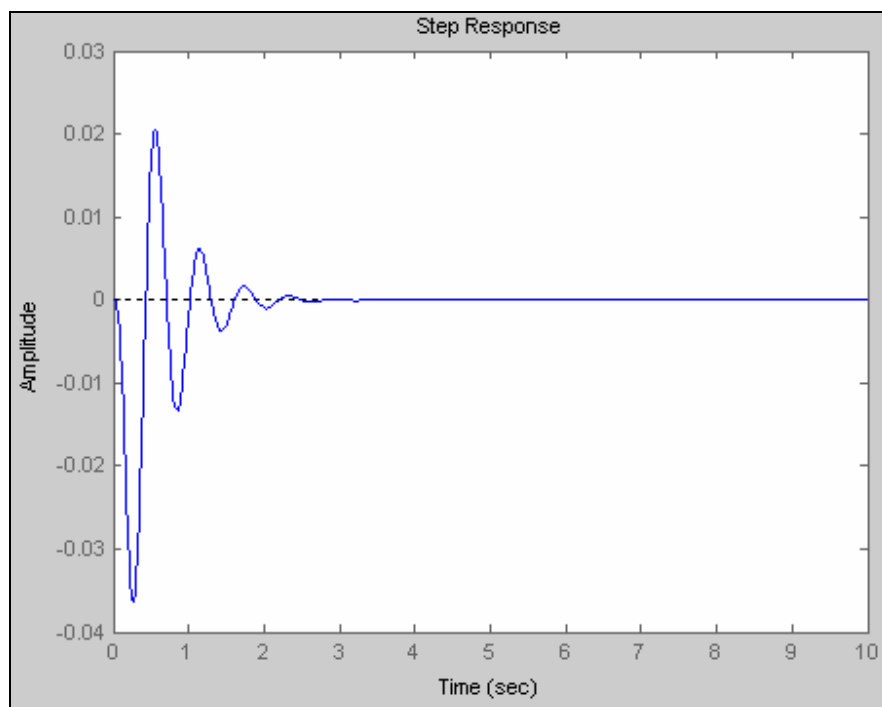


**Figura 6.52 – Diagrama de Nyquist PacDyn**

Como podemos facilmente observar, os gráficos encontrados foram os mesmos, com a diferença que o PacDyn traça apenas uma parte do Nyquist. Vamos agora traçar a resposta ao degrau no tempo (de 0 a 10 segundos) e observar o Gráfico:

```
>> t = 0:0.01:10;
```

```
>> step(num,den,t);
```



**Figura 6.53 – Resposta no Tempo MATLAB**

Podemos comparar com o gráfico obtido anteriormente no PacDyn e observar a mesma resposta:

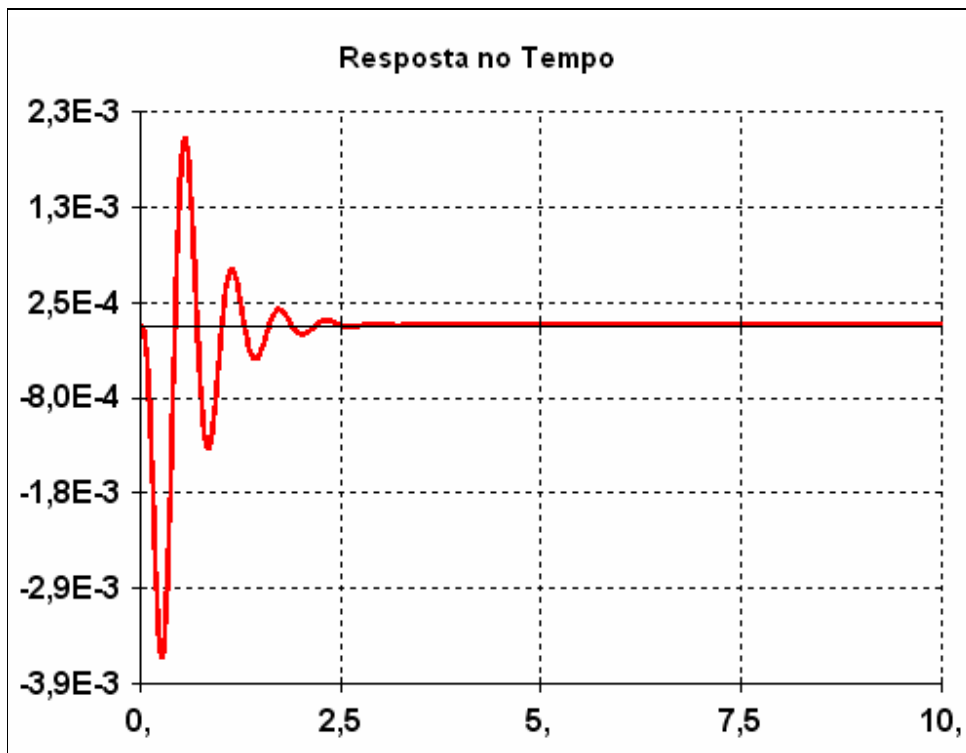


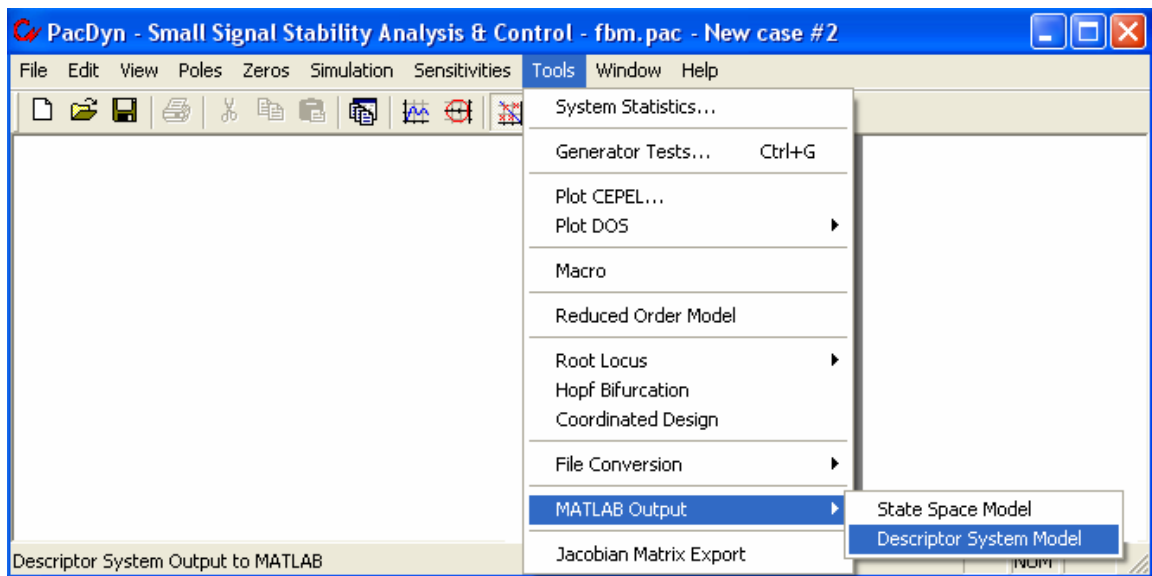
Figura 6.54 – Resposta no Tempo PacDyn

Com os dados observados acima podemos afirmar que o arquivo exportado do PacDyn pode ser analisado pelo MATLAB, fazendo com que tenhamos uma maior praticidade na hora de estudar o sistema.

#### 6.4 Exemplo 4 – Conversão PacDyn -MATLAB no Formato de Sistema Descritor

Para a conversão para um Sistema Descritor, faremos da mesma forma como na elaboração da conversão do Sistema de Espaços de Estados realizados no Exemplo 3.

Inicialmente, clicaremos na janela principal do PacDyn em “Tools” (Ferramentas), em seguida em “MATLAB Output” (Saída no MATLAB) e, finalmente, em “Descriptor System Model” (Modelo de Sistema Descritor), como mostrado abaixo:



**Figura 6.55 – Janela Principal**

Em seguida, o programa perguntará quais serão as variáveis de entrada e de saída. Como utilizadas anteriormente, usaremos para variável de entrada a tensão de referência (VREF) da barra 1, e a de saída, a velocidade (WW) da mesma barra.

Podemos ver que, na Figura acima, o caso aberto (Case) é o de número 2, logo o arquivo “matlab.out” será criado na pasta do Case #2.

Da mesma forma como no exemplo anterior, devemos copiar o arquivo “matlab.out” e “pacdesc.m” para uma mesma pasta.

Agora faremos a conversão dos dados do arquivo “matlab.out” em variáveis de estado. Dentro do MATLAB, devemos escolher a pasta onde se encontram os arquivos copiados. Com o comando “help pacdesc” temos acesso ao comando o qual transfere os dados do arquivo “matlab.out” para variáveis de estado.

O comando é:

```
>> [ A, b, c, d, iv, name ] = pacdesc ('matlab.out');
```

O MATLAB vai então nos informar o tamanho do sistema e os elementos não-nulos respectivamente:

Jacobian Dimension = 37

Non nulls Elements = 107

Vamos agora converter os dados do arquivo para a forma Jacobiana utilizada normalmente, para isso utilizaremos a rotina “monta\_jac.m” (o algoritmo desse programa encontra-se no ANEXO). Primeiramente, devemos salvar as variáveis (A, b, c, d, iv, name) num arquivo “.mat” chamado jacobiano\_original:

```
>> save jacobiano_original A b c d iv name
```

Em seguida, podemos rodar a rotina:

```
>> monta_jac
```

Serão então criadas as matrizes J1, J2, J3, J4, entre outras, onde só nos interessam nessa primeira análise, essas quatro primeiras. Acharemos as matrizes originais:

```
>> A = J1 - J2*inv(J4)*J3;
```

```
>> B = B1 - J2*inv(J4)*B2;
```

```
>> C = C1 - C2*inv(J4)*J3;
```

Com essas variáveis podemos então calcular os Autovalores, resposta no tempo, resposta na frequência, como anteriormente.

Para isso, utilizaremos o comando “full”, pois as matrizes geradas pelo sistema descritor são esparsas, o comando “full” converte a matriz esparsa em uma matriz cheia.

Calculando então os Autovalores:

```
>> eig(full(A))
```

```
>> eig(full(A))

ans =

    -101.69006679747 +    10.0570279101856i
    -101.69006679747 -    10.0570279101856i
    -42.3615647851424
    -6.66859638462476 +    12.696754806685i
    -6.66859638462476 -    12.696754806685i
    -2.15733701390169 +    10.5687500199458i
    -2.15733701390169 -    10.5687500199458i
    -25.4244675464663
    -2.17945755554966
    -0.3366789581014
```

**Figura 6.56 – Autovalores Encontrados no MATLAB**

Comparando com os Autovalores calculados anteriormente (Tabela 6.3), podemos verificar que são os mesmos valores encontrados.

Da mesma forma com a Resposta no Tempo:

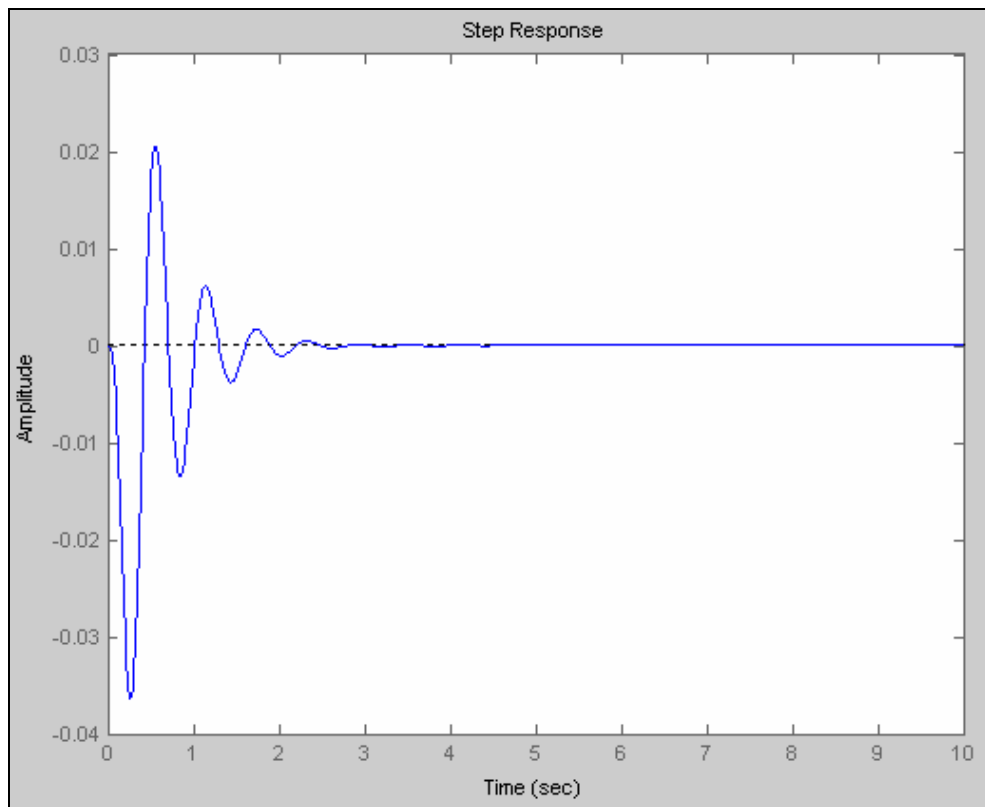
```
>> d = 0;
```

```
>> [num,den] = ss2tf(full(A),full(B),full(C),d);
```

```
>> G = tf(num,den);
```

```
>> t = 0:0.01:10;
```

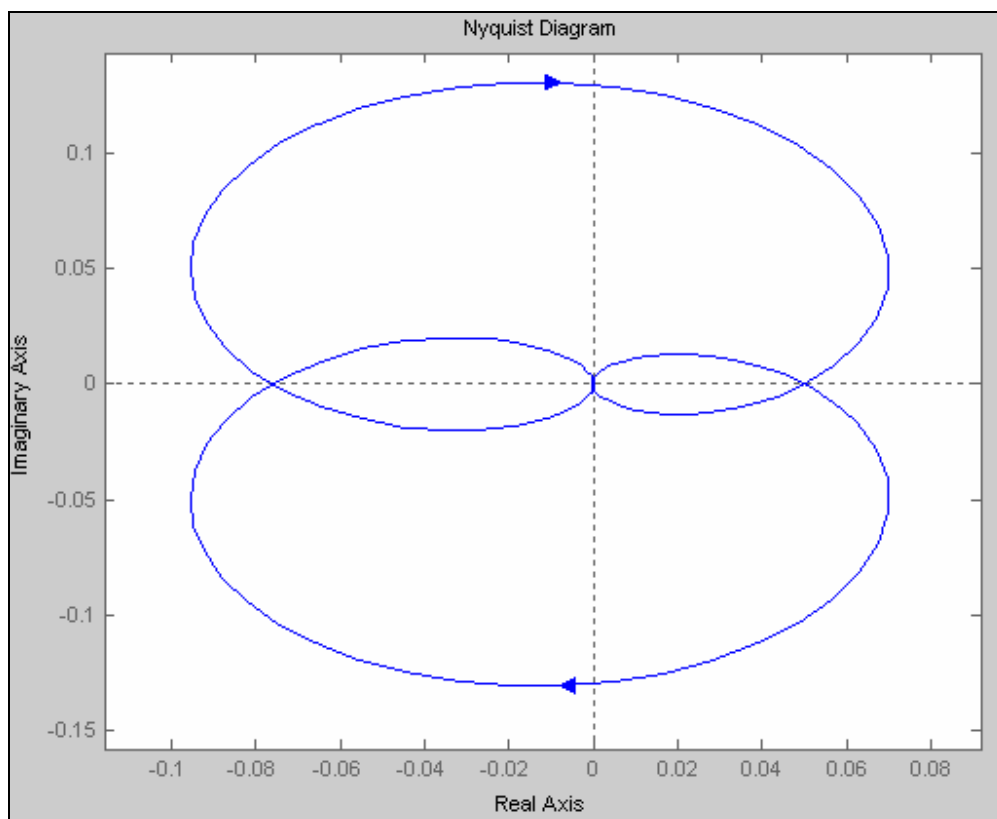
```
>> step(G,t);
```



**Figura 6.57 – Resposta no Tempo MATLAB**

E o Diagrama de Nyquist:

```
>> nyquist(G);
```



**Figura 6.58 – Diagrama de Nyquist MATLAB**

Como esperávamos, o Diagrama de Nyquist também foi o mesmo obtido nas Figuras 6.51 e 6.52.



## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os principais aspectos dos programas PacDyn e PLOT CEPEL, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Foi dada ênfase especial às aplicações práticas dos programas, com a utilização de suas principais técnicas de análise. O PacDyn utilizado nesse trabalho foi o PacDyn 6.3, desenvolvido pelo CEPEL em 2005.

A necessidade da utilização de programas como o PacDyn e o PLOT CEPEL, decorre da complexidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), onde há cada vez mais a introdução de novos elementos, como novas cargas e novos agentes interessados em comercializar energia elétrica. Sob a supervisão do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), os agentes são obrigados a cumprir um conjunto de normas de segurança. Assim, em conjunto com o CEPEL, foram criadas ferramentas computacionais para simulação de situações reais pelas quais passa o sistema.

Como já foi mencionado, o PacDyn é um programa desenvolvido para diversos fins, entre os quais: a análise e controle de oscilações de sistemas elétricos, análise de sensibilidade a pequenos sinais, e projeto de controladores. O PacDyn também é utilizado na escolha da melhor instalação de Estabilizadores de Sistema de Potência (*“Power System Stabilizer”* – PSS) em usinas geradoras e outros dispositivos FACTS em barras e circuitos, usados no amortecimento de modos de oscilações locais e inter-áreas. Utilizando o programa, podemos fazer análises de respostas no tempo e na frequência, além de análise da estabilidade de tensão a pequenas perturbações.

O PacDyn é utilizado juntamente com o PLOT CEPEL, que manipulando os dados mandados pelo PacDyn pode traçar diversas características, sendo capaz de projetar alguns tipos de compensadores.

No trabalho foram indicados os passos básicos para a utilização do programa, juntamente com as teorias aplicadas a cada ferramenta. Em seguida, foram apresentados exemplos da utilização do programa para diversas finalidades, com a uso de todas as técnicas de análise possíveis, expondo sempre o relacionamento destas com a teoria.

Entre os exemplos estudados cabe menção especial à Usina de Itaipu, onde se evidenciou que o programa dispõe de técnicas capazes de avaliar situações complexas. Naturalmente, tendo em vista os limites do trabalho, não foram apresentadas todas as técnicas do programa, mas apenas as mais importantes, no sentido de que o usuário que tenha o conhecimento teórico, possa estudar cada caso e entender a finalidade dos estudos elaborados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Dados Relevantes 2003. Operação do Sistema Interligado Nacional. ONS.
- [2] Kundur, Pabra. “Power System Stability and Control”. 1ª Edição, 1994, Editora MCGRAW-HILL.
- [3] Martins, Nelson, P.E.M. Quintão, H.J.C.P. Pinto, A. de Castro, S. Gomes Jr. “An Integrated Plotting Tool For The Visualization of Results Produced by Multiple Power System Analysis Software”. Proceedings of the IX SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, May, 2004.
- [4] Martins, Nelson. “Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies”. IEEE Transactions on Power Systems, USA, v. PWRs-1, n. 1, p. 217-226, 1986.
- [5] Martins, Nelson, LIMA, L T G. “Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems”. In: IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance, 1989, .p. 17-33.
- [6] <http://www.PacDyn.cepel.br/potuguese/descricao.htm>
- [7] <http://www.PacDyn.cepel.br/potuguese/aplicacoes.htm>
- [8] Del Toro, Vicent. “Fundamentos de Máquinas Elétricas”. Editora LTC, Rio de Janeiro, 1999.
- [9] Manual do Usuário PacDyn – CEPEL.
- [10] <http://math.fullerton.edu/mathews/n2003/QRMethodMod.html>
- [11] Tutorial do Programa PacDyn – “Single-Machine-Infinite-Bus Tutorial Example for Electromechanical and SSR Analysis Using PacDyn”.

[12] Ogata, Katsuhiko. “Engenharia de Controle Moderno”. 4ª Edição. Editora Prentice Hall do Brasil, São Paulo, 2003.

[13] Freitas, Francisco Damasceno. “Técnicas de Análise e Projeto de Sistemas de Controle Linear”. 1998.

## ANEXO A

### ALGORÍTMO DO PROGRAMA MONTA\_JAC

```
clear all;
load jacobiano_original.mat;
[nt,n1]=size(A);

b=b(:,1);

c=c(1,:);

d=d(1,1);

% linha em que aparece variável que pode ser descartada, pois só há um elemento
% não nulo na linha (onde aparece a palavra null em name
% xnull='Null'; linha=sparse(nt,1);
%for k=1:nt
%  xname=name(k,1:4);
%  if xname == xnull | xname=='NULL' | xname=='null'
%    linha(k)=k;
%  end
%end

E=sparse(nt,nt);
for k=1:nt
    if iv(k)~=0
        E(k,k)=1;
    end
end

% matriz Td
inz=0; iz=0; Te=sparse(nt,nt);
for k=1:nt
    if iv(k)~=0
        Te(inz+1,k)=1;
        inz=inz+1;
    end
end
nonzero=inz;
for k=1:nt
    if iv(k)==0
        Te(nonzero+iz+1,k)=1;
        iz=iz+1;
    end
end
```

```

    end
end
Td=Te';
EE=Te*E*Td;
% separação dos estados
AA=Te*A*Td;
BB=Te*b;
CC=c*Td;
% numero de estados
est=0;
while EE(est+1,est+1)~= 0
    est=est+1;
end

n=est;    % numero de estados
na=nt-n; % variaveis algébricas

J1=AA(1:n,1:n);

J2=AA(1:n,(n+1):nt);

J3=AA((n+1):nt,1:n);

J4=AA((n+1):nt,(n+1):nt);

B1=BB(1:n,:); B2=BB((n+1):nt);

C1=CC(:,1:n); C2=CC(:,(n+1):nt);

A=[]; B=[]; C=[]; AA=[]; BB=[]; CC=[];

na=nt-n;    % numero de variaveis algébricas sem eliminacao
            % eliminação da linha e coluna k devido, conforme linha(k);
            % as eliminações não são necessárias em J1.
Te=[]; Td=[]; % matriz Td

```