



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA E A PEQUENOS SINAIS
GUSTAVO FERNANDES GONÇALVES DE SOUZA**

Brasília, 11 de dezembro 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

GUSTAVO FERNANDES GONÇALVES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA E A PEQUENOS SINAIS**

Trabalho final de graduação submetido 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/UnB)
(Orientador)

Prof., Dr. Alcides Leandro da Silva (ENE/UnB)
(Examinador interno)

Eng., MSc. Ana Bárbara Fernandes Neves (ONS)
(Examinadora externa)

Eng., MSc. Aluísio César Santos Júnior (CEF)
(Examinador externo)

Brasília, 11 de dezembro 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, GUSTAVO FERNANDES GONÇALVES
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE POTÊNCIA PARA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA E A PEQUENOS SINAIS. [Distrito Federal] 2018.

xi,96., 210x297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2018). Trabalho de Graduação Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Estabilidade transitória | 2. Análise modal |
| 3. Estabilidade a pequenos sinais | 4. Sistema Interligado Nacional |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, G. F. (2018). Simulação computacional em sistemas de potência para análise de estabilidade transitória e a pequenos sinais. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Fernandes Gonçalves de Souza.

TÍTULO: Simulação computacional em sistemas de potência para análise de estabilidade transitória e a pequenos sinais

GRAU: Graduação em Engenharia Elétrica ANO: 2018.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gustavo Fernandes Gonçalves de Souza
Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 - Brasília - DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, José e Maria, por ter me dado a educação necessária para que eu pudesse ingressar nesse curso e por sempre terem me apoiado durante todo o curso mesmo diante das dificuldades.

Agradeço aos meus irmãos, Fernando e Jefferson, pelos bons momentos vividos juntos.

Agradeço aos meus padrinhos, Roberio e Neurilene, e primos, Carol, Jonathan, Renan, Higor pelo incentivo durante a graduação.

Agradeço ao Professor Francisco Damasceno Freitas que me orientou nesse trabalho, por ter me ajudado a compreender os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço também por suas contribuições e pelo tempo dedicado a minha orientação.

Agradeço aos meus grandes amigos do ‘cabus’ e ‘cooplem’ por terem sempre me apoiado nos momentos difíceis e por compreenderem minha ausência durante a realização desse trabalho.

Agradeço a todos meus colegas de ONS, Ana Bárbara, Adel, André, Ary, Carla, Carlos, Decio, Delfim, Edinoel, Guilherme, Henrique, Ivan, Josué, Karla, Lancelotti, Letícia, Luciene, Michel, Odilon, Priscila, Plínio, Raquel, Reginaldo, Roberval e Valéria pelos valiosos ensinamentos que me deram e pela paciência que tiveram comigo durante todo esse tempo.

Agradeço em especial ao meu supervisor Carlos Antônio ter me dado a oportunidade do estágio. Agradeço também por ter me apresentado ao mundo da estabilidade, área pela qual passei a ter grande interesse.

Por fim, a todos, um enorme obrigado.

Gustavo Fernandes Gonçalves de Souza

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar ferramenta para simulação computacional visando análises de estabilidade transitória e a pequenos sinais, também conhecida como estabilidade a pequenas perturbações. O foco principal está na abordagem conjunta que pode ser obtida ao se utilizar os recursos computacionais integrados pelos softwares ANAREDE, ANATEM e PacDyn. A partir da modelagem do sistema elétrico nos dois primeiros aplicativos, analisa-se a estabilidade transitória, e com base nos próprios dados do ANATEM, sem necessidade de de nova montagem de arquivo específico, realizam-se simulações para análise a pequenos sinais, agora usando o aplicativo PacDyn. Além disso, através deste último programa, gera-se arquivo para representação linear para ser utilizado no Matlab. A vantagem de se usar também este último software é a opção de recursos para análise de aplicações que envolvem conceitos de álgebra linear, como autovalores, autovetores, diagramas de Bode, cálculo de resíduos, fatores de participação etc. A demonstração da ferramenta é efetuada por meio da apresentação de um sistema máquina barra-infinita, de forma tutorial; e de aplicações em um sistema de grande porte que tem como alvo estudos sobre uma área do Sistema Interligado Nacional (SIN), o subsistema formado pela rede elétrica que integra o sistema Acre-Rondônia. Testes considerando grandes e pequenas perturbações são efetuados com a finalidade de demonstrar a efetividade da metodologia de análise. Também, aplicações considerando o modelo a pequenos sinais são realizados. Estes com a finalidade de avaliar informações obtidas de índices como fatores de participação e de análise modal.

Palavras-chave: Estabilidade dinâmica, estabilidade a pequenas perturbações, análise modal, PacDyn, modelos dinâmicos lineares

ABSTRACT

This work aims to present an integrated tool for analyzing transient and small signal stability. The main focus is on the joint approach that can be obtained by using the computational resources integrated by the software ANAREDE, ANATEM and PacDyn. Based on the power network in the first two tools, the transient stability is analyzed, and based on ANATEM's own data, without the need for a new specific file assembly, simulations are performed for small signal analysis, now using the PacDyn software. The advantage of using this latter software is also the option of resources for the analysis of applications involving linear algebra concepts, such as eigenvalues, eigenvectors, Bode diagrams, residual calculus, participation factors, etc. The demonstration of the tool efficacy is done by means of the presentation of a bus-infinite machine system, in a tutorial way; and applications for a large system that targets studies on a specific area of the National Interconnected System (NIS), the subsystem formed by the electric grid that integrates the Acre-Rondônia system. Tests considering large and small perturbations are performed with the purpose of demonstrating the effectiveness of the analysis methodology. Also, applications considering the model at small signals are carried out. From the linear analysis information such as participation factors and modal analysis are investigated.

Key words: Dynamic stability, small-signal stability, modal analysis, PacDyn, linear dynamic model.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	INTRUDUÇÃO À ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA 5	
2.2	A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	6
3.3	A ESTABILIDADE DINÂMICA.....	10
3.	CONCEPÇÃO PRÁTICA DE MODELOS LINEARES	22
3.1	INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DE ESTABILIDADE DINÂMICA	22
3.2	O SISTEMA TESTE	23
3.3	CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA GERADOR X BARRA INFINITA	24
3.4	ELABORAÇÃO DO CASO DINÂMICO NÃO LINEAR COM O ANATEM 25	
3.5	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DINÂMICA DA REDE.....	34
3.6	CONCLUSÃO	44
4.	SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE GRANDE PORTE.....	45
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	45

4.2 INTRODUÇÃO	45
4.3 METODOLOGIA	49
4.4 BASE DE DADOS	50
4.5 SIMULAÇÕES	51
4.5.1 Caso 1	52
4.5.3 Caso 2	60
4.5.3 Caso 3	68
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1 CONCLUSÃO	74
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS	78
A.1 Código no ANATEM para o sistema teste simulado no capítulo 4.	78
A.2 Código no ANATEM para o estudo em um sistema de grande porte presente no capítulo 4.	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Classificação dos modos de oscilação.....	21
Figura 3.27 – Escolha de uma variável de saída	40
Figura 3.28 Passo para simulação de resposta em frequência.....	40
Figura 3.29 Resposta em frequência da função de transferência.....	41
Figura 3.30 Histograma do Mode Shape	42
Figura 3.31 Lista das variáveis de estado de maior atividade	42
Figura 3.32 Histograma de resíduos de WW/VREF	43
Figura 3.33 Lista de resíduos de WW/VREF	43
Figura 4.1: Diagrama unifilar da rede do sistema Acre - Rondônia.....	46
Figura 4.2: Diagrama eletrogeográfico da rede do sistema Acre - Rondônia	47
Figura 4.4: Dados do sistema	51
Figura 4.5: Dados das matrices do sistema	51
Figura 4.6: Caso 1 - Frequência das UHEs	52
Figura 4.7: Caso 1 – Tensão terminal das UHEs	52
Figura 4.8: Caso 1 – Desvio de Potência Ativa das UHEs.....	53
Figura 4.9: Caso 1 – Desvio de Potência Reativa das UHEs	53
Figura 4.10: Caso 1 – Desvio de no ângulo do rotor das UHEs.....	53
Figura 4.11: Caso 1 – Modos escolhidos para análise	54
Figura 4.12: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -5+j19,821$....	55
Figura 4.13: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,84+j19,198$	55
Figura 4.14: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -2,429+j14,23$	55

Figura 4.15: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,099+j2,531$	56
.....	
Figura 4.16: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -16,038+j2,815$	56
.....	
Figura 4.17: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -5+j19,821$	57
Figura 4.18: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,099+j2,53$	57
Figura 4.19: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -2,429+j14,23$	58
Figura 4.20: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,844+j19,198$	58
Figura 4.21: Caso 2 - Frequência das UHEs	60
Figura 4.22: Caso 2 – Desvio na Potência Ativa das UHEs	60
Figura 4.23: Caso 2 – Desvio na Potência Reativa das UHEs	61
Figura 4.24: Caso 2 – Desvio no ângulo do rotor das UHEs	61
Figura 4.25: Caso 2 – Tensão terminal das UHEs	61
Figura 4.26: Caso 2 – Ganho das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs	62
Figura 4.27: Caso 2 - Fase das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs	62
Figura 4.28: Caso 2 – Modo local e Modo de controle	63
Figura 4.29: Caso 2 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = +0,145+j2,4264$	
Figura 4.30: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = +0,145+j2,42$	64
Figura 4.31: Caso 2 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = -1,234+j13,101$	65
.....	
Figura 4.32: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = -1,234+j13,101$	65
Figura 4.33: Caso 2 – Histograma do Fator de Participação do modo 2 Hz	66
Figura 4.34: Caso 2 – Lista do Fator de Participação do modo 2 Hz	66
Figura 4.35: Caso 2 – Histograma do Fator de Participação do modo 0,39 Hz	67
Figura 4.36: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo 0,39 Hz	67

Figura 4.37: Caso 3 – Tensão terminal das UHEs	68
Figura 4.38: Caso 3 – Frequência das UHEs.....	68
Figura 4.39: Caso 3 – Desvio na Potência Ativa das UHEs	69
Figura 4.40: Caso 3 – Desvio na Potência Reativa das UHEs.....	69
Figura 4.41: Caso 3 – Desvio no ângulo do rotor das UHEs.....	69
Figura 4.42: Caso 3 – Ganho das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs	70
Figura 4.43: Caso 3 – Fase das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs	70
Figura 4.44: Caso 3 – Modo dominante 0,38 Hz.....	71
Figura 4.45: Caso 3 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = 0,059+j2,3613$	72
Figura 4.46: Caso 3 - Lista com Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda =$ $0,059+j2,3613$.....	72
Figura 4.47: Caso 3 – Histograma do Fator de Participação para o modo $\lambda =$ $0,059+j2,3613$.....	73

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro caracteriza-se por grande quantidade de interconexões. Na nomenclatura técnica, é conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN). Esta interconexão permite uma série de ganhos para o sistema nos aspectos energéticos e elétricos.

Com as interligações, torna-se possível o atendimento energético a áreas elétricas em dificuldade para atender a sua carga. Isto é possível através de intercâmbios entre áreas com excedente energético. Essa alternativa permite que essas áreas com déficit energético, por exemplo, reduzam a quantidade de corte de carga e o despacho de usinas térmicas. Dessa forma, a interligação de áreas possibilita maior confiabilidade ao suprimento de carga e maior diversidade no uso dos recursos elétricos típico de cada área.

A interligação possibilita também um maior número de máquinas sincronizadas, agregando inércia ao sistema ao mesmo tempo em que torna mais robusto a perturbações. Além da inércia intrínseca, as unidades geradoras (quer seja hidráulicas, térmicas ou eólicas) com os seus reguladores contribuem substancialmente para operação estável em regime normal ou em contingência [1].

Os reguladores atuam na velocidade do rotor da máquina, caso dos reguladores de velocidade; e na tensão terminal, caso do regulador de tensão (RT). Ainda existem os sinais estabilizadores de sistemas de potência (ESP), cuja função é atuar como sinal adicional estabilizante nos reguladores de tensão. Todos esses reguladores são projetados com o objetivo de atuar em grandes perturbações e em perturbações de pequeno porte. De acordo com [2] o estudo da estabilidade de grandes perturbações é escopo da estabilidade transitória, já a de pequenas perturbações é escopo da estabilidade dinâmica (ou em regime permanente).

Embora a interligação tenha acrescido benefícios para o sistema, a operação desse passou a ser mais complexa. Manter sistema como o SIN estável em regime permanente e em regime transitório é um grande desafio para a equipe de operação do sistema. Com essa finalidade, é preciso estudar o comportamento dinâmicos dos equipamentos e seus controladores interagindo com outros equipamentos que operam no SIN. Dessa forma,

justifica-se a importância do estudo da estabilidade dinâmica e transitória para sistemas elétricos de potência.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O estudo da estabilidade do sistema elétrico a pequenas perturbações é de fundamental importância para a identificação de modos de oscilação do sistema que ao serem excitados podem levar o sistema a perda de sincronismo. A análise de pequenos sinais também permite o projeto dos controladores, sejam eles reguladores de velocidade, tensão, assim como os estabilizadores que são usados para amortecer um dado modo de oscilação.

A análise a pequenas perturbações é realizada considerando o sistema linearizado em torno de um ponto de operação específico. Portanto, todas as equações que representam a rede elétrica, a dinâmica dos equipamentos e a própria equação *swing* da máquina síncrona são linearizadas. Após essa etapa, organizam-se as equações em um formato apropriado para a formulação em espaços de estados. Os elementos chave a serem determinados na análise são os autovalores e os autovetores do sistema. Estes indicadores numéricos possibilitam identificar e caracterizar os diversos modos de oscilação. Os autovalores e autovetores são determinados com base nas propriedades de álgebra linear. Com esses parâmetros calculados, pode-se então obter o amortecimento do modo e a sua frequência. Também, identificam-se as características dessa oscilação, assim como as variáveis de estado que excitam o modo.

A formulação clássica para o estudo de estabilidade dinâmica é feita através de espaço de estados, porém não é uma alternativa viável computacionalmente. Programas de estudo como o PacDyn, pertencente ao Cepel, utiliza uma formulação em sistemas descritores. Essa formulação supera o problema de realizar operações da álgebra linear como a inversão de matrizes esparsas.

Em sistemas elétricos, um sistema é dito estável caso ele consiga se manter em sincronismo após uma perturbação. A estabilidade do sistema está relacionada com oscilações que ocorrem por conta da diferença de potência mecânica em relação à potência elétrica gerada. Durante uma perturbação, a configuração do sistema pode ser alterada, como por exemplo, saída de cargas, desligamento de linhas de transmissão, perdas de geração etc. Essas alterações podem levar a considerável desbalanço entre a potência mecânica e a elétrica transitoriamente. Em razão disso, as máquinas do sistema tenderão a sofrer oscilações que

poderá levar a um novo ponto de operação., caso o sistema seja estável. Mas, poderão perder o sincronismo com o sistema, isto é, oscilam em velocidades diferentes da velocidade síncrona, até que a proteção do sistema atue recuperando o sincronismo conforme [2].

Para perturbações de pequenas magnitudes, como nos casos de perdas ou entradas de pequenos blocos de cargas, chaveamento de reatores ou banco de capacitores, entrada ou saída de unidades geradoras podem ser estudadas sob a ótica da estabilidade a pequenas perturbações. Na estabilidade de pequenos sinais, o interesse está em identificar modos de oscilações devido aos pequenos distúrbios. Com base em indicadores como autovalores, autovetores, resíduos, é possível projetar ou fazer ajustes em controladores para que as máquinas amortecem esses modos e assim se mantenham em sincronismo após esses distúrbios.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a estabilidade dinâmica de um sistema elétrico de grande porte por meio do aplicativo PacDyn. Entre os objetivos específicos, são destacados:

- Desenvolvimento de fundamentação teórica necessária para o entendimento do problema da estabilidade dinâmica;
- Estudo de um caso dinâmico linear através de um caso didático considerando um gerador conectado a uma barra-infinita. Com isto, objetiva-se realizar análise dos resultados de simulação com base nos conceitos de estabilidade a pequenas perturbações apresentados no trabalho.
- Estudo da estabilidade de sistemas de potência a pequenas perturbações para um sistema de grande porte.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A estrutura de organização do texto para este trabalho é a seguinte:

- No capítulo 2, será feita formulação do estudo da estabilidade em sistemas de potência sob o aspecto linear. Em seguida, serão expostos os conceitos fundamentais da estabilidade a pequenas perturbações para a realização dos estudos. Por fim, serão elucidadas técnicas e ferramentas de análise com base nos conceitos anteriormente demonstrados.
- No capítulo 3, serão descritos aplicativos e procedimentos necessários para montar um caso linear para estudo da estabilidade dinâmica.
- No capítulo 4, será feita uma aplicação do estudo de estabilidade dinâmica a um sistema elétrico de potência de grande porte.
- No capítulo 5, conclui-se o trabalho discorrendo sobre os resultados obtidos através dos estudos e propondo futuros trabalhos na área de estabilidade a pequenos sinais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRUDUÇÃO À ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O objetivo na operação de um sistema elétrico interligado é o atendimento da carga com segurança elétrica, confiabilidade e otimização nos recursos de transmissão e/ou geração. Esse sistema está sujeito continuamente a grandes perturbações, como curtos-circuitos, desligamentos de linhas de transmissão, rejeições de geração e carga, entre outras. Também, ocorrem perturbações menores, como chaveamento de banco de reatores ou capacitores, rejeição de pequenos blocos de geração, incrementos de carga, entre outras perturbações de menor magnitude.

Para grandes e pequenas perturbações o sistema interligado deve se manter em operação estável após as ocorrências. De acordo com a referência [1], a estabilidade de um sistema elétrico é a capacidade desse sistema retornar às suas condições de operação originais ou passar a operar em um ponto de equilíbrio. O conceito de estabilidade em sistemas elétricos se aplica a algumas modalidades, como tensão, ângulo do rotor e frequência. O presente trabalho terá como alvo somente a estabilidade angular ou também eletromecânica.

A estabilidade angular está diretamente relacionada à capacidade do sistema ou das máquinas permanecerem em um ponto de operação que esteja em sincronismo com o restante da rede elétrica após uma perturbação. Por isso, qualquer desequilíbrio entre potência mecânica e potência elétrica, ou seja, entre carga e geração, respectivamente, causa uma oscilação no ângulo do rotor da máquina [2]. A depender do tipo de perturbação, da configuração da rede e dos reguladores da máquina, esta pode experimentar oscilações e operar em um ponto estável após a perturbação ou entrar em regime de instabilidade, no qual a máquina perde sincronismo com a rede.

O problema da estabilidade angular na literatura é estudado como estabilidade transitória (grandes perturbações) e a pequenos sinais. Este último tipo é também conhecida por estabilidade dinâmica ou estabilidade de regime permanente. O escopo da estabilidade transitória é voltado para excursões e oscilações dos ângulos dos rotores das máquinas após as grandes perturbações. O fenômeno da estabilidade no regime transitório possui uma

característica não linear, sendo sua formulação matemática baseada em equações diferenciais e algébricas não lineares. As análises nesse regime se baseiam em simulações verificadas no domínio do tempo das variáveis do modelo de interesse.

A estabilidade a pequenos sinais se restringe à análise das pequenas perturbações, depois de passados os “swings” de maiores amplitudes, onde se considera a situação de regime permanente. Nesse contexto, por se tratar de pequenas perturbações é possível linearizar as equações do regime transitório. Desse modo, um sistema dinâmico linear pode ser escrito em formulação por espaço de estados. Nas referências [1] e [2], a formulação do problema de estabilidade a pequenos sinais é apresentado em espaço de estados, assim como em outras literaturas clássicas. Porém, para uma aplicação real em um sistema de grande porte, os programas de análise a pequenos sinais não utilizam esse formato por conta do tamanho das matrizes do sistema. O PacDyn [10], por exemplo, utiliza a formatação por sistemas descritores. Em pequenos sinais, as análises se baseiam basicamente no comportamento de modos de oscilação, mode-shapes, fatores de participação. Diferentemente do regime transitório, no regime permanente se faz uso de análise por meio de resposta em frequência. No PacDyn, informações como diagrama de Nyquist, diagrama de Bode são ferramentas utilizadas, entre outras aplicações, para avaliar ou projetar sinais estabilizadores de sistemas de potência.

2.2 A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

O torque líquido, ou seja, o torque que causa aceleração ou desaceleração no eixo do rotor é dado por:

$$T_l = I \cdot \alpha \quad (2.1)$$

onde:

T_l = torque resultante no eixo do rotor (N.m)

I = momento de inércia do eixo do rotor (kg.m²)

α = aceleração angular (rad/s²)

De acordo com a referência [2], é dada uma relação entre o ângulo elétrico θ_e , o ângulo mecânico do rotor θ_m e a frequência elétrica da máquina:

$$\theta_e = \frac{60f}{rpm} \cdot \theta_m \quad (2.2)$$

Conforme [2], é conveniente adotar-se uma referência girante à velocidade ω_0 rad/s, para a medição da posição angular δ dos geradores em relação a uma referência comum a todos os geradores.

$$\delta = \theta_e - \omega_0 t \quad (2.3)$$

A velocidade angular nesse caso é dada por:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (2.4)$$

Derivando a equação (3.4) em relação ao tempo em ambos os lados:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} = \alpha \quad (2.5)$$

Das equações (3.1), (3.4) e (3.5) é possível chegar à seguinte relação:

$$T_l = I \cdot \frac{rpm}{60f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.6)$$

Sabe-se das equações do movimento mecânico das massas móveis que:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.7)$$

onde:

P = potência mecânica

T = Torque produzido

$$\omega = 2\pi \left(\frac{rpm}{60} \right) = \text{velocidade angular}$$

Segundo a referência [2] as equações de estabilidade no contexto de simulação são mais bem apresentadas na sua forma em p.u. Dessa forma, devem ser definidas bases para o torque e a potência mecânica de entrada. Usando a equação (3.6) :

$$T_{base} = \frac{P_{base}}{\omega} \quad (2.8)$$

Uma vez que Tbase foi definido, transforma-se o torque líquido Tl para Tl (p.u.):

$$T_l(pu) = \frac{Tl}{T_{base}} = \frac{I \cdot \frac{rpm}{60} \cdot f \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}}{T_{base}} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação (3.7) na (3.8):

$$T_l(pu) = \frac{I \cdot (rpm)^2 \cdot 2\pi}{P_{base}(60)^2 \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.10)$$

Na referência [1], define-se a constante de inércia H como sendo uma constante que relaciona a energia cinética da máquina armazenada em MW.s, com a potência base da máquina dada em MVA. Dessa forma, H é escrita como:

$$H = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2.11)$$

$$H = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

Substituindo a equação (3.11) na (3.10), tem-se que:

$$T_l(pu) = \frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.12)$$

Como foi definido no começo da demonstração, T_l é o torque líquido aplicado sobre o eixo do rotor. Pode-se formulá-lo como:

$$T_l(pu) = T_m(pu) - T_e(pu) \quad (2.13)$$

onde:

$T_m(pu)$ é o torque mecânico aplicado no eixo em p.u.

$T_e(pu)$ é o torque elétrico gerado na pela máquina em p.u.

Substituindo a equação (3.13) na (3.12):

$$T_m(pu) - T_e(pu) = \frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.14)$$

Ao trabalhar-se em p.u., os torques mecânico e elétrico são iguais à potencia mecânica e potencia elétrica , respectivamente. Assim sendo, a equação (3.14) pode ser reescrita como:

$$P_m(pu) - P_e(pu) = \frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.15)$$

Reescrevendo (3.15) em função da aceleração angular:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega}{2 \cdot H} \cdot (P_m(pu) - P_e(pu)) \quad (2.16)$$

A equação (3.16) é conhecida na literatura como equação swing do sistema. A partir desta equação, é possível observar que qualquer desequilíbrio entre a potência mecânica de entrada, P_m , e a potência elétrica gerada, P_e , causará oscilações no ângulo do rotor da máquina em relação a uma referência girante. Outro aspecto interessante a se notar é que essas oscilações são amortecidas pela inércia da máquina. De modo que quanto maior for a constante de inércia, menor será a amplitude das oscilações. Esse fato demonstra a importância de máquinas rotativas na operação do sistema, sobretudo máquinas hidráulicas, agregando inércia no sistema e dessa forma maior capacidade de resistência a grandes perturbações.

3.3 A ESTABILIDADE DINÂMICA

3.3.1 O ESPAÇO DE ESTADOS

Da teoria de controle moderno, um sistema dinâmico pode ser modelado no espaço de estados. A referência [3] define conceitualmente elementos pertencentes a essa representação de sistemas dinâmicos:

Estado: O menor conjunto de variáveis tais que o conhecimento do seu valor em um instante t_0 e juntamente de uma entrada associada a esse instante determina a dinâmica do sistema.

Variáveis de estado: É o conjunto de variáveis que no instante t_0 determina o estado desse sistema. A escolha das variáveis de estado independe de ter algum significado físico ao sistema ou se precisa ser mensurável. Devida a essa liberdade de escolha das variáveis de estado, um sistema pode ter infinitas representações no espaço de estado.

Vetor de estado: Seja um sistema dinâmico linear descrito por n variáveis de estado. O conjunto dessas variáveis $(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t))$ pode ser representado por um vetor de estados \mathbf{X} .

$$\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Seja um sistema dinâmico de dimensão n , o qual possa ser representado por n equações diferenciais que são funções de um conjunto de n entradas $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t))$, das n variáveis de estados $\mathbf{X} = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t))$ e função do tempo t . A saída $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t), \dots, y_n(t))$ desse sistema também pode ser descrita em função dos mesmos parâmetros das n equações diferenciais. Dessa forma, representa-se matematicamente:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, u_1, t) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x_2, u_2, t) \\ \dot{x}_3(t) &= f_3(x_3, u_3, t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_n, u_n, t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} y_1(t) &= g_1(x_1, u_1, t) \\ y_2(t) &= g_2(x_2, u_2, t) \\ y_3(t) &= g_3(x_3, u_3, t) \\ &\vdots \\ y_n(t) &= g_n(x_n, u_n, t) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Rearranjando as equações (3.18) e (3.19) :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (2.20)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (2.21)$$

em que:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$$

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$$

As equações (3.20) e (3.21) são comumente chamadas por equações de estado e equações de saída de um sistema dinâmico, respectivamente. Essas equações admitem sistemas dinâmicos não lineares. Como o escopo da estabilidade a pequenos sinais é voltado para sistemas lineares, então (3.20) e (3.21) devem ser linearizadas em torno de um ponto de operação, tal que

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_0 + \Delta \mathbf{y} \quad (2.24)$$

Substituindo as variáveis \mathbf{x} , \mathbf{u} e \mathbf{y} nas equações (3.19) e (3.20):

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}, t) \quad (2.25)$$

$$\mathbf{y}_0 + \Delta \mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}, t) \quad (2.26)$$

Como \mathbf{x}_0 é constante em relação ao tempo, então:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}, t) \quad (2.28)$$

Linearizando as equações (3.27) e (3.28) em torno do ponto de operação em equilíbrio, tem-se que:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} \quad (2.29)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} \quad (2.30)$$

O sistema linear composto pelas equações (3.29) e (3.30) pode ser reescrito para seguinte forma:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.31)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \quad (2.32)$$

em que:

\mathbf{A} é a matriz de estado

\mathbf{B} é a matriz de entrada

\mathbf{C} é a matriz de saída

\mathbf{D} é a matriz de transferência direta

O sistema linear aqui estudado é considerado como invariante no tempo, dessa forma as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} não variam com o tempo.

3.3.2 ANÁLISE MODAL

Por definição, o autovalor de uma matriz é um escalar que satisfaz a equação (2.33), cuja solução considerada é a não trivial. Desta forma:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\phi}\lambda \quad (2.33)$$

Onde:

\mathbf{A} é a matriz $n \times n$

$\boldsymbol{\phi}$ é um autovetor à direita de \mathbf{A}

Para determinar os autovalores da matriz \mathbf{A} , utiliza-se a seguinte relação:

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\boldsymbol{\phi} = 0 \quad (2.34)$$

No estudo da estabilidade a pequenos sinais, a determinação dos autovalores do sistema e seus respectivos autovetores permite avaliar a amplitude e a frequência das oscilações devido às perturbações. A seguir, mostra-se a relação entre a função de transferência de um sistema dinâmico linear e os autovalores.

Transformando as equações (3.31) e (3.32) do domínio do tempo para o domínio de da transformada de *Laplace* (variável complexa s) tem-se que:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}}(s) = \mathbf{A} \Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.35)$$

$$\Delta\mathbf{y}(s) = \mathbf{C} \Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{D} \Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.36)$$

Definindo a função de transferência desse sistema como:

$$G(s) = \frac{\Delta \mathbf{y}(s)}{\Delta \mathbf{u}(s)} \quad (2.37)$$

Por manipulação algébrica é possível chegar à relação:

$$G(s) = \frac{\Delta \mathbf{y}(s)}{\Delta \mathbf{u}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{C} \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} \mathbf{B} \quad (2.38)$$

Da equação (3.38) é possível verificar que os polos de $G(s)$, ou seja, valores de s que satisfazem $\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$, são os autovalores da matriz de estados \mathbf{A} .

O vetores $\boldsymbol{\phi}$ da equação (3.33) é chamado de autovetor à direita e para cada λ_i se tem um ϕ_i associado. Quando se usa em (3.33) a matriz transposta de \mathbf{A} , determina-se o autovetor à esquerda $\boldsymbol{\Psi}$, de modo que $\mathbf{A}^T \boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\lambda}$. Como será mostrado mais adiante, esses autovetores terão importância dentro da análise em estabilidade a pequenos sinais.

De acordo com [1] pelo fato das variáveis de estado dadas por \mathbf{x} estarem em combinação linear de outras, então se torna difícil identificar a influência do comportamento de cada variável de estado agindo isoladamente. A decomposição modal é empregada nesse contexto para se trabalhar com variáveis de estado desacopladas. Para a decomposição se faz necessário definir as matrizes modais. Sejam então as matrizes $\boldsymbol{\Phi}$, $\boldsymbol{\Psi}$ e $\boldsymbol{\Lambda}$ de autovetores à direita, à esquerda e matriz diagonal de autovalores simples da matriz de estados:

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \cdots & \phi_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \cdots & \psi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{n1} & \cdots & \psi_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

A decomposição modal consiste em transformar os estados acoplados dados por $\Delta \mathbf{x}$ por estados desacoplados dados por \mathbf{z} por meio das matrizes modais. Dessa forma, transformando $\Delta \mathbf{x}$ em estados desacoplados, tem-se que:

$$\Phi \mathbf{z} = \Delta \mathbf{x} \quad (2.42)$$

$$\mathbf{z} = \Phi^{-1} \Delta \mathbf{x} = \Psi \Delta \mathbf{x} \quad (2.43)$$

Substituindo a equação (2.41) na equação de estados (2.31) tem-se que:

$$\Phi \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \Phi \mathbf{z} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \leftrightarrow \dot{\mathbf{z}} = \Psi \mathbf{A} \Phi \mathbf{z} + \Psi \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.44)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Phi \mathbf{z} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \quad (2.45)$$

Como foi definido que a matriz diagonal Λ é a matriz de autovalores da matriz de estados \mathbf{A} , então vale a seguinte relação:

$$\mathbf{A} \Phi = \Lambda \Phi \quad (2.46)$$

Resolvendo a (3.45) para a matriz Λ :

$$\Phi^{-1} \mathbf{A} \Phi = \Lambda \leftrightarrow \Lambda = \Psi \mathbf{A} \Phi \quad (2.47)$$

Substituindo a equação (2.45) na (2.43):

$$\dot{\mathbf{z}} = \Lambda \mathbf{z} + \Psi \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.48)$$

Definindo as matrizes \mathbf{B}' e \mathbf{C}' como sendo:

$$\mathbf{B}' = \Psi \mathbf{B} \quad (2.49)$$

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C} \Phi \quad (2.50)$$

Então substituindo \mathbf{B}' e \mathbf{C}' nas equações (2.46) e na (2.44), respectivamente, chega-se enfim à representação de um sistema dinâmico linear desacoplado:

$$\dot{\mathbf{z}} = \Lambda \mathbf{z} + \mathbf{B}' \Delta \mathbf{u} \quad (2.51)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}' \mathbf{z} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \quad (2.52)$$

A seguir, será analisado o sistema linear desacoplado no domínio s , a fim de se apresentar conceitos relacionados à estabilidade a pequenos sinais.

Aplicando a transformada de Laplace às equações (2.49) e (2.50):

$$s\mathbf{z}(s) - \mathbf{z}(0) = \Lambda \mathbf{z}(s) + \mathbf{B}' \Delta \mathbf{u}(s) \quad (3.51)$$

$$\Delta \mathbf{y}(s) = \mathbf{C}' \mathbf{z}(s) + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u}(s) \quad (3.52)$$

Isolando $\mathbf{z}(s)$ na equação (2.51) e admitindo condições iniciais nulas:

$$\mathbf{z}(s) = (s\mathbf{I} - \Lambda)^{-1} \mathbf{B}' \Delta \mathbf{u}(s) \quad (2.53)$$

em que \mathbf{I} em (2.53) corresponde á matriz identidade.

Substituindo na equação de saída (2.52), considerando uma entrada e uma saída, obtém-se:

$$\frac{\Delta \mathbf{y}(s)}{\Delta \mathbf{u}(s)} = \mathbf{C}'(s\mathbf{I} - \mathbf{\Lambda})^{-1}\mathbf{B}' + \mathbf{D} \quad (2.54)$$

A equação (2.54) é a função de transferência do sistema linear desacoplado. Reescrevendo essa equação em termos dos elementos de \mathbf{C}' e de \mathbf{B}' chega-se ao resultado:

$$\frac{\Delta \mathbf{y}(s)}{\Delta \mathbf{u}(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{c}'_i \mathbf{b}'_i}{(s - \lambda_i)} + \mathbf{D} \quad (2.55)$$

Analisando a equação (2.56), nota-se que o produto $\mathbf{c}'_i \mathbf{b}'_i$ é o resíduo da função de transferência do sistema. Como foi mostrado anteriormente, os autovalores λ_i são os polos do sistema. Sem perda de generalidade, para um sistema com n saídas, ao avaliar-se a resposta da equação ao impulso (2.55) no domínio do tempo, tem-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= c'_{11} b'_{11} e^{-\lambda_1 t} + d_{11} + c'_{12} b'_{12} e^{-\lambda_2 t} + d_{12} + \dots + c'_{1k} b'_{1k} e^{-\lambda_k t} + d_{1k} \\ y_2(t) &= c'_{21} b'_{21} e^{-\lambda_1 t} + d_{21} + c'_{22} b'_{22} e^{-\lambda_2 t} + d_{22} + \dots + c'_{2k} b'_{2k} e^{-\lambda_k t} + d_{2k} \\ &\vdots \\ y_n(t) &= c'_{n1} b'_{n1} e^{-\lambda_1 t} + d_{n1} + c'_{n2} b'_{n2} e^{-\lambda_2 t} + d_{n2} + \dots + c'_{nk} b'_{nk} e^{-\lambda_k t} + d_{nk} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Do resultado em (2.56) pode-se dizer que a saída $y_n(t)$ é dada pela combinação linear de seus modos dinâmicos, $[1]$, $e^{-\lambda_k t}$, ponderados pelo seu resíduo $c'_{nk} b'_{nk}$. Dessa forma, a dinâmica da saída do sistema é determinada ao se avaliar os modos. As variáveis de estado originais do sistema também seguem esse comportamento, porém elas são ponderadas por ϕ_{nk} e uma constante $\psi_{nk} \Delta x_n(0)$. Na referência [1] a relação é dada como:

$$\begin{aligned} \Delta x_1(t) &= \phi_{11} \psi_{11} \Delta x_1(0) e^{-\lambda_1 t} + \phi_{11} \psi_{11} \Delta x_1(0) e^{-\lambda_2 t} + \dots + \phi_{1k} \psi_{1k} \Delta x_1(0) e^{-\lambda_k t} \\ \Delta x_2(t) &= \phi_{21} \psi_{21} \Delta x_2(0) e^{-\lambda_1 t} + \phi_{22} \psi_{22} \Delta x_2(0) e^{-\lambda_2 t} + \dots + \phi_{2k} \psi_{2k} \Delta x_2(0) e^{-\lambda_k t} \\ &\vdots \\ \Delta x_n(t) &= \phi_{n1} \psi_{n1} \Delta x_n(0) e^{-\lambda_1 t} + \phi_{n2} \psi_{n2} \Delta x_n(0) e^{-\lambda_2 t} + \dots + \phi_{nk} \psi_{nk} \Delta x_n(0) e^{-\lambda_k t} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Nos resultados anteriores pode-se ver que os autovalores definem o comportamento dinâmico de todo o sistema linear, constituindo assim um elemento importante para a análise

da estabilidade do sistema. Os autovalores, num caso geral, constituem-se de uma parcela real e outra imaginária. A parcela real diz respeito ao decaimento com o tempo e a imaginária com a oscilação. Os autovalores podem ser puramente reais, complexos conjugados ou puramente imaginários. A seguir será feita uma análise de cada condição do autovalor e sua relação à estabilidade do sistema.

Componentes do autovalor:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.58)$$

Autovalores puramente reais:

Para $\sigma < 0$, o sistema é estável, sendo que quanto maior a parte real, nesse caso menor será a contribuição desse modo em uma variável de estado ou na saída.

Para $\sigma > 0$, o sistema é instável, ou seja, a contribuição do modo em uma variável de estado cresce indefinidamente, condição que é prejudicial ao sistema.

Autovalores complexos conjugados:

Esses autovalores têm uma parcela imaginária oscilatória e uma parcela real de decaimento, esses modos produzirão uma contribuição oscilatória amortecida. Em sistemas de potência deseja-se que a parcela oscilatória seja amortecida o quanto antes, para isso se projeta malhas estabilizadoras (ESP) que amortecem um modo mais oscilatório. Esse comportamento oscilatório amortecido pode ser mostrado matematicamente:

$$e^{\lambda t} = e^{(\sigma \pm j\omega)t} = e^{\sigma t} \cos(\omega t) \quad (2.59)$$

Autovalores puramente imaginários:

Com a parcela real nula, esses autovalores são puramente oscilatórios, conforme pode ser visto na equação (2.59) ao se fazer $\sigma = 0$. Autovalores desse tipo não são desejáveis, essas oscilações podem evoluir de tal forma a levar outros elementos do sistema à instabilidade.

Amortecimento

Um aspecto importante ao se avaliar um autovalor é a magnitude de seu amortecimento. Autovalores mesmo que sejam demasiadamente oscilatórios, ou seja, que tenha uma parcela imaginária grande podem estar presentes no sistema desde que sejam amortecidos. O amortecimento ξ pode ser calculado da seguinte forma, segundo a referência [1]:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.60)$$

De acordo com o submódulo 21.33 dos Procedimentos de Rede do ONS [8], um amortecimento desejável para um modo deve ser maior ou igual a 5%.

Após analisar a influência dos autovalores e como eles se dão através das variáveis de estado e da saída, os autovetores também influem nas variáveis do sistema.

Autovetores

Da equação (2.61) tem-se que as variáveis de estado desacopladas z são ponderadas pelos autovetores à direita da matriz de estados.

$$\Phi z = \Delta x \quad (2.61)$$

As variáveis transformadas estão relacionadas a um único modo, dessa forma as variáveis de estado em z estão diretamente relacionadas aos modos. Os autovetores à direita são chamados por *mode shapes*, eles indicam a magnitude da atividade de uma variável de estado quando um modo é excitado [1].

As variáveis de estados originais do sistema por sua vez são ponderadas pelos autovetores à esquerda da matriz do sistema.

$$z = \Phi^{-1} \Delta x = \Psi \Delta x \quad (2.62)$$

Os autovetores à esquerda indicam o peso que a atividade de uma dada variável de estado tem sobre determinado modo. Dessa forma, pode-se definir o conceito de fator de participação. De acordo com [1] os fatores de participação relaciona a atividade de uma variável de estado com o peso dela em um modo. Matematicamente, pode-se escrever como:

$$p_{ji} = \phi_{ji}\psi_{ij} \quad (2.63)$$

O fator de participação p_{ij} é uma grandeza adimensional e segundo a referência [4] também pode ser interpretado como a participação da j -ésima variável de estado no i -ésimo modo ou a participação do i -ésimo modo na j -ésima variável de estado.

Classificação dos modos

Os modos podem ser classificados em função de sua frequência tendo determinado significado físico. De acordo com a referência [5], os modos se classificam da seguinte forma:

Modos Locais: típico de oscilações da unidade geradora com o sistema.

Modos Intra-planta: ocorrem quando máquinas da mesma usina oscilam entre si.

Modos de controle: ocorrem devido a ajustes inadequados nas constantes dos controladores.

Modos inter-área: ocorrem quando uma área oscila contra o sistema interligado.

A referência [5] também sugere uma tabela típica da classificação dos modos em função da frequência. A Figura 3.1 ilustra faixas típicas de frequências de oscilação detectadas para o SIN.

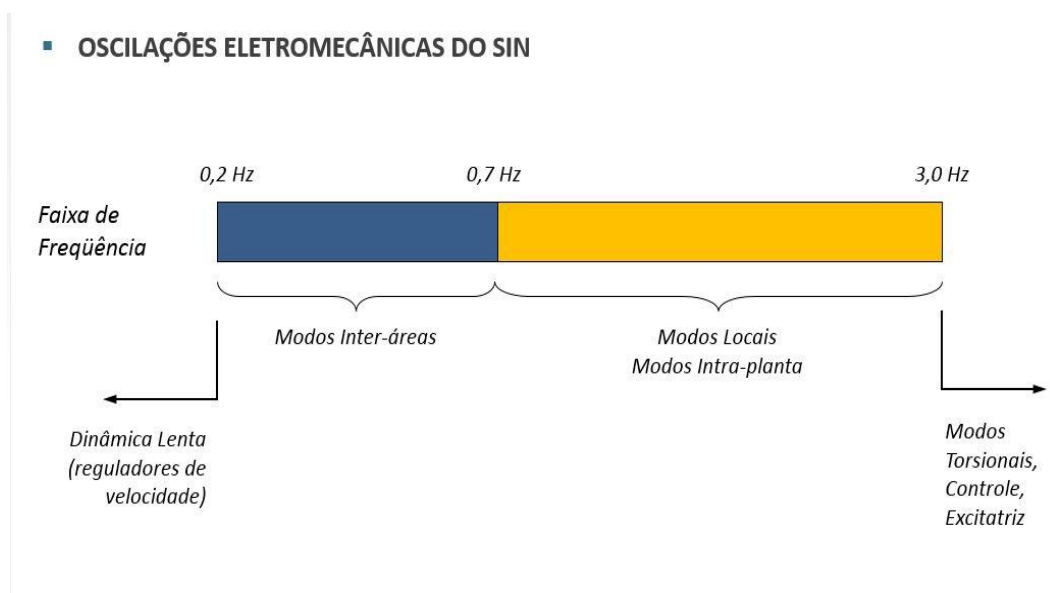


Figura 3.1 – Classificação dos modos de oscilação

3. CONCEPÇÃO PRÁTICA DE MODELOS LINEARES

3.1 INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DE ESTABILIDADE DINÂMICA

Ao se fazer um estudo de estabilidade dinâmica é necessário que se conheça aspectos da rede ou do elemento, os quais se deseja avaliar o comportamento dinâmico devido a pequenas perturbações. Dessa forma, como um primeiro passo, realiza-se um estudo de fluxo de potência de modo a obter as distribuições das potências ativa e reativa, os valores de tensões e ângulos nas barras. Esses parâmetros servirão como ponto de operação em que se linearizará o sistema.

Um programa de cálculo de fluxo de carga muito utilizado no setor elétrico é o ANAREDE – Análise de Rede Elétrica, concebido pelo CEPEL. Nele se carrega um arquivo com a base de dados de uma rede elétrica, podendo esse arquivo ser do tipo .SAV ou PWF. Os parâmetros de linhas de transmissão, transformadores, geradores, compensadores estáticos, elos CC etc são contidos nesse arquivo de entrada.

Com o ponto de operação obtido, a próxima etapa é incorporar a modelagem dos modelos dinâmicos dos elementos da rede estudada para simulação de transitórios eletromecânicos. Como foi visto, a natureza da estabilidade eletromecânica transitória é do tipo não linear. Na estabilidade dinâmica, o que se faz é então linearizar essas equações, dessa forma gerando modelos dinâmicos lineares da rede. Então, monta-se um caso não-linear em que se contenha os modelos dinâmicos não-lineares dos elementos da rede assim como seus controladores, reguladores e sinais estabilizadores, caso existam.

Um programa que é utilizado para estudo de estabilidade transitória em sistemas de potência é o ANATEM – Análise de transitórios eletromecânicos, pertencente ao CEPEL. Nele é possível criar modelos dinâmicos dos componentes da rede por meio de diagrama de blocos definidos pelo usuário (CDU) ou podem-se utilizar modelos já pré-definidos (built in). O ANATEM dispõe de diversos modelos pré-definidos para reguladores de velocidade, reguladores de tensão, representação de máquinas, excitatriz, equipamentos FACTS, entre

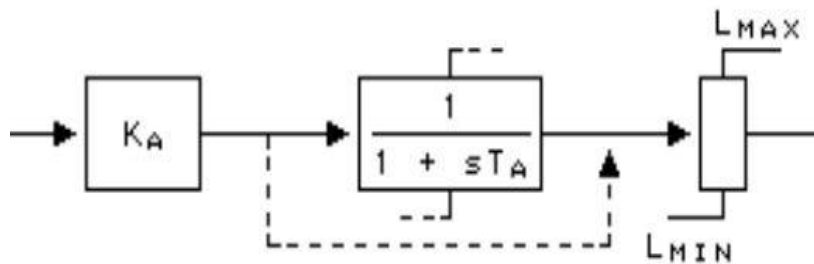


Figura 3.2 – Modelo de regulador de tensão

3.2.1 PERTURBAÇÕES

Os testes a serem feitos consistem em analisar o sistema do ponto de vista da estabilidade transitória e a dinâmica para os casos em que há uma grande perturbação e uma pequena perturbação. A grande perturbação se dará pela aplicação de um curto circuito, considerando-se que tensão cai a 70%. Para a pequena perturbação, será feito uma rejeição de um bloco de carga correspondente a 10 MW.

3.3 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA GERADOR X BARRA INFINITA

O sistema estudado possui uma barra PV e uma barra de referência, fazendo o papel da barra infinita conceitual. A linha de transmissão entre as barras é representada somente por sua reatância com valor de 5%. Os parâmetros da rede são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 3.1 – Dada do sistema Gerador x Barra Infinita

	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (MVar)
Linha de Transmissão 1	0.00	5.0	0.00

Com os dados acima, após o cálculo do fluxo de potência pelo ANAREDE, a distribuição dos fluxos é mostrada na figura 3.3 e na tabela 3.2.

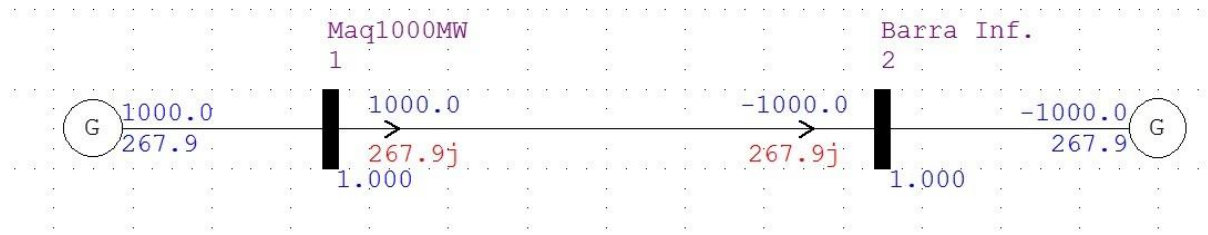


Figura 3.3 – Distribuição do fluxo de potência na rede

Tabela 3.2 – Resultado do fluxo de potência

	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
Barra 1	1.000	30.0	1000	267.9
Barra Infinita	1.000	0.00	-1000	-267.9

3.4 ELABORAÇÃO DO CASO DINÂMICO NÃO LINEAR COM O ANATEM

Para montar o caso dinâmico no ANATEM, é necessário que se conheça o modelo do gerador (polos lisos ou salientes), a curva de saturação da máquina, seus reguladores (tensão ou velocidade) e os sinais estabilizadores (ESP), caso possua. No caso em questão, será admitido que a máquina da barra 1 possui uma curva de saturação do tipo 2 (exponencial) com parâmetros típicos. A curva é mostrada na figura 3.4 e os parâmetros são apresentados na tabela 3.3.

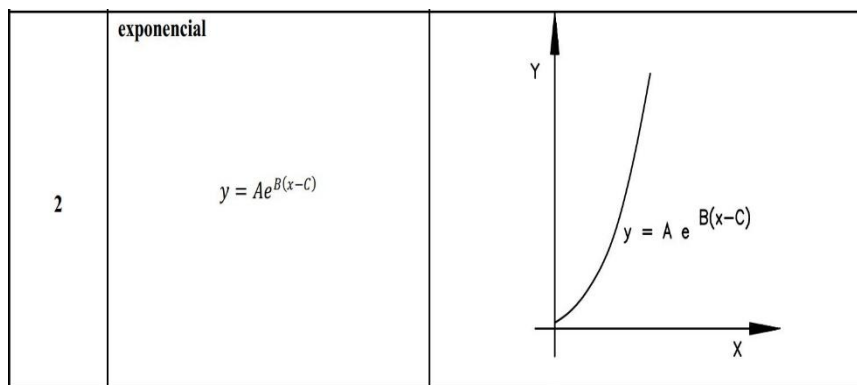


Figura 3.4 – Curva de saturação da máquina do sistema teste

Tabela 3.3 – dados da curva de saturação

Curva de Saturação	A	B	C
Gerador 1	0.013	7.920	0.8

O regulador de tensão para o gerador 1, figura 3.2, tem o seguinte diagrama de blocos no ANATEM:

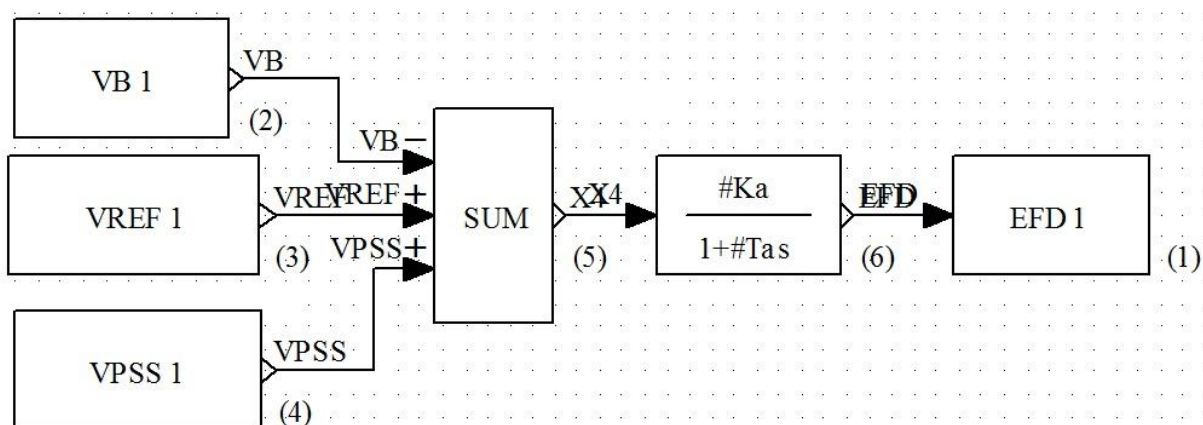


Figura 3.5 – Diagrama de blocos para o Regulador de tensão do gerador 1

Da figura 3.5, VB é a tensão medida no terminal da máquina, VREF é a tensão de referência do controlador. O VESP é uma entrada para o sinal de tensão gerado por um ESP (no caso em estudo não há ESP, o que leva a $VESP = 0$ para simulação). Os três sinais são somados e passam pelo regulador de primeira ordem com parâmetros Ka e Ta. O resultado na saída do controlador é igual à tensão de campo da máquina E_{FD} . Os parâmetros do regulador são mostrados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros regulador de 1ª ordem do gerador 1

Regulador de tensão de 1ª ordem	Ka	Ta
	0.05	100

Para a simulação além da curva de saturação é preciso informar ao programa ANATEM o modelo considerado de máquina. O modelo utilizado no teste é do tipo polo saliente, típico de máquinas hidráulicas. Para a máquina 1, utilizou-se o modelo tipo 2 do ANATEM, que possui um enrolamento de campo e dois amortecedores. Esse modelo é utilizado em simulações de grande porte para representar máquinas de polos salientes. As figuras 3.6 e 3.7 mostram diagramas de blocos que representam essa modelagem nos eixos diretos e em quadratura.

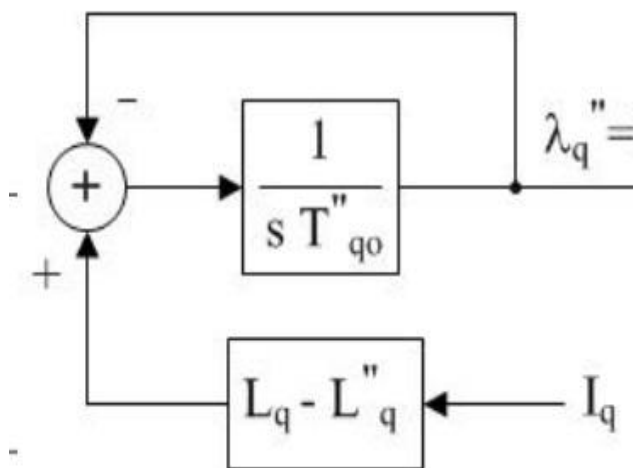


Figura 3.6 – Diagrama de blocos para o Eixo em Quadratura

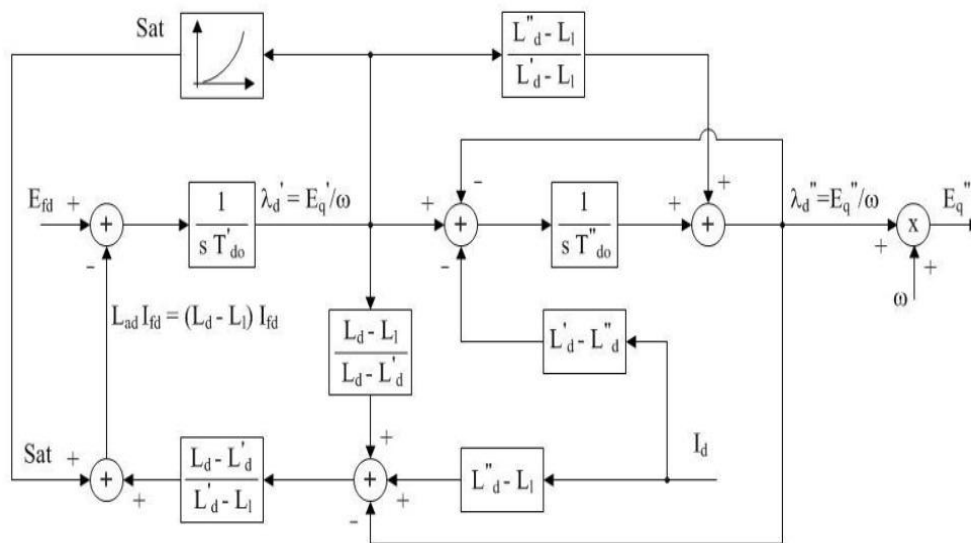


Figura 3.7 – Diagrama de blocos para o Eixo Direto

Os parâmetros utilizados para a máquina 1 nessa modelagem são mostrados na tabela 3.7

Tabela 3.7 – Parâmetros da máquina 1

Ld	Lq	L'd	L''d	L1	T'd	T''d	T'''q	H
113.8	68.1	35	28.8	15.8	5.6	0.08	0.15	4.938

Para efetuar a simulação no ANATEM, é preciso associar ao arquivo principal, com terminação .STB, os arquivos de modelos das unidades geradoras e seus respectivos reguladores. Os modelos de máquina são contidos no arquivo com terminação .BLT (biult-in); os reguladores (blocos CDU) ficam em arquivo com terminação .CDU; por fim, associam-se os modelos de reguladores às suas respectivas máquinas no arquivo de nome DMAQ.DAT. Em relação ao arquivo DMAQ.DAT, é preciso informar o número de máquinas de uma usina que estarão em operação no sistema. Nesse ponto, destaca-se a diferença em relação ao ANAREDE, programa de análise de fluxo de carga, que efetua a modelagem considerando geração equivalente. Desta forma, não é necessário informar para o ANAREDE o número de máquinas para o cálculo de fluxo de potência.

Após inserir os arquivos auxiliares do tipo .BLT, .CDU e o DMAQ.DAT no arquivo principal (.STB), é também preciso informar o evento a ser simulado e as variáveis de saída que deverão ser observadas (plotadas). Na sequência, são mostradas as resposta transitórias a

perturbações para cada caso. Neste caso, o usuário deverá selecionar variáveis de interesse, como tensão terminal, potência ativa, potência reativa, ângulo elétrico e tensão de campo. Alguns casos ilustrativos são destacados a seguir, considerando estudos no sistema máquina barra-infinita.

Caso 1 – Curto circuito na barra 1 com duração de 100 ms

Foi simulado na barra 1 um curto circuito com duração de 100 ms de modo a reduzir a tensão nesta barra a 0,7 pu. A resposta das variáveis no domínio do tempo é mostrada a seguir para algumas variáveis (ver Figuras 3.8 a 3.12).

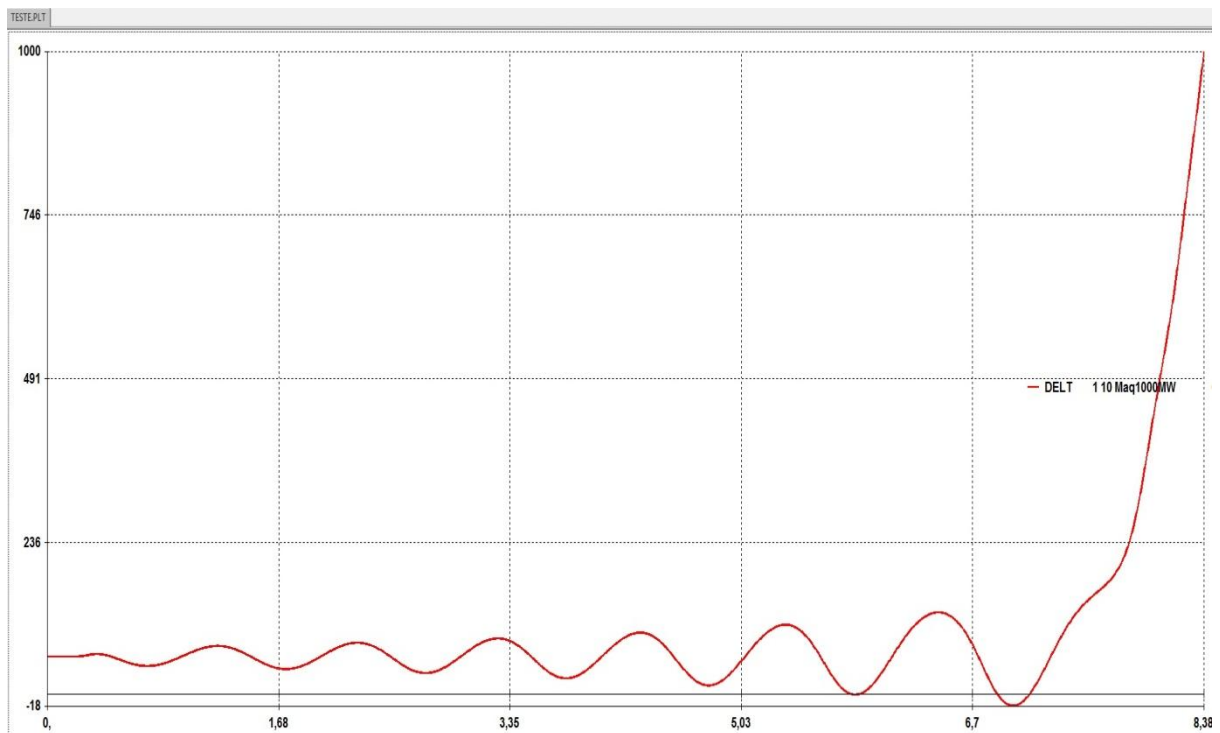


Figura 3.8 – Ângulo do rotor do gerador 1

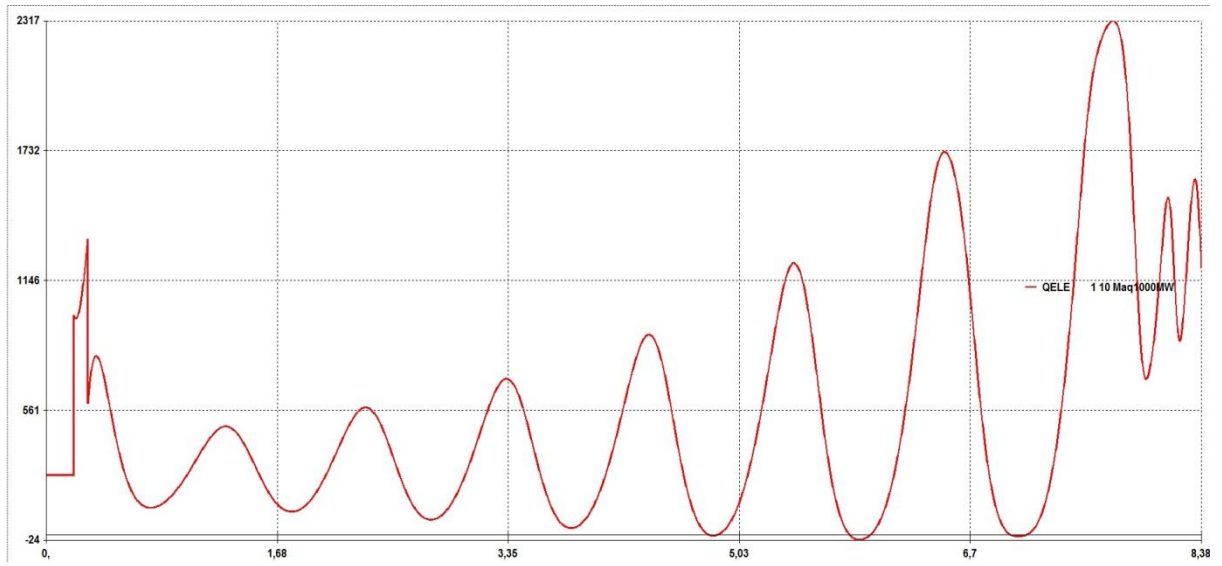


Figura 3.9 – Potência reativa do gerador 1

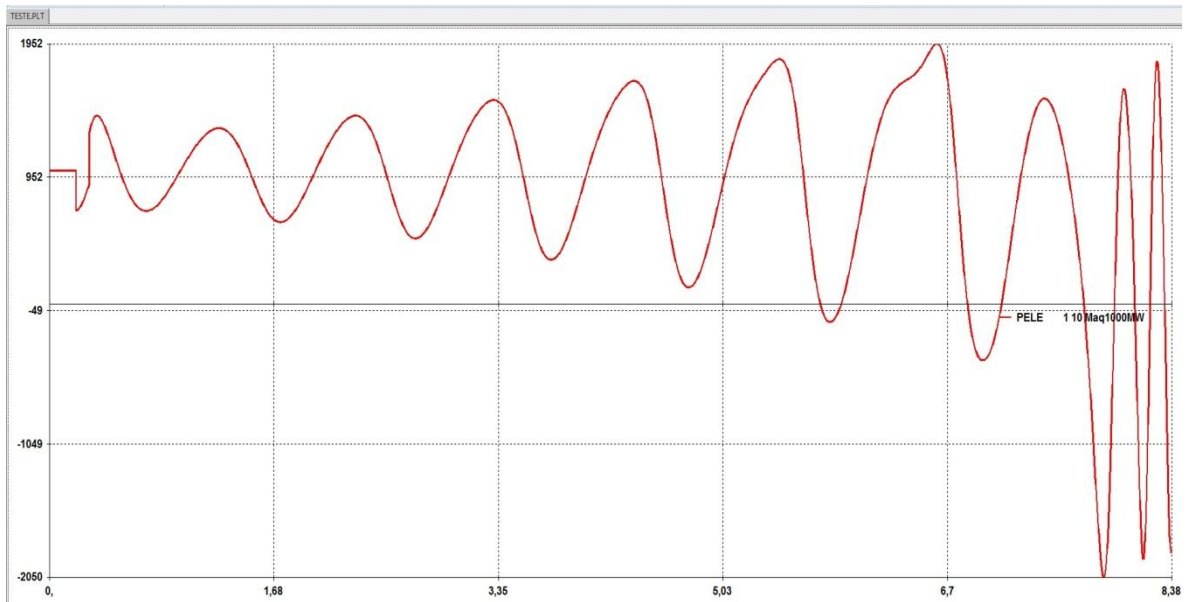


Figura 3.10 – Potência Ativa do gerador 1

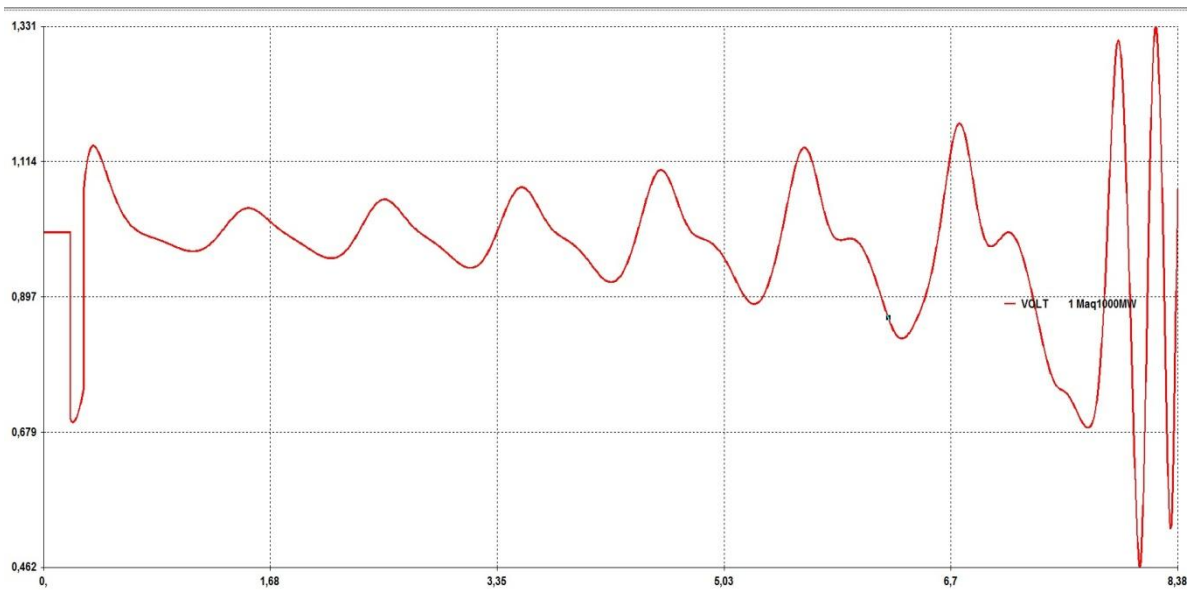


Figura 3.11 – Tensão terminal do gerador 1

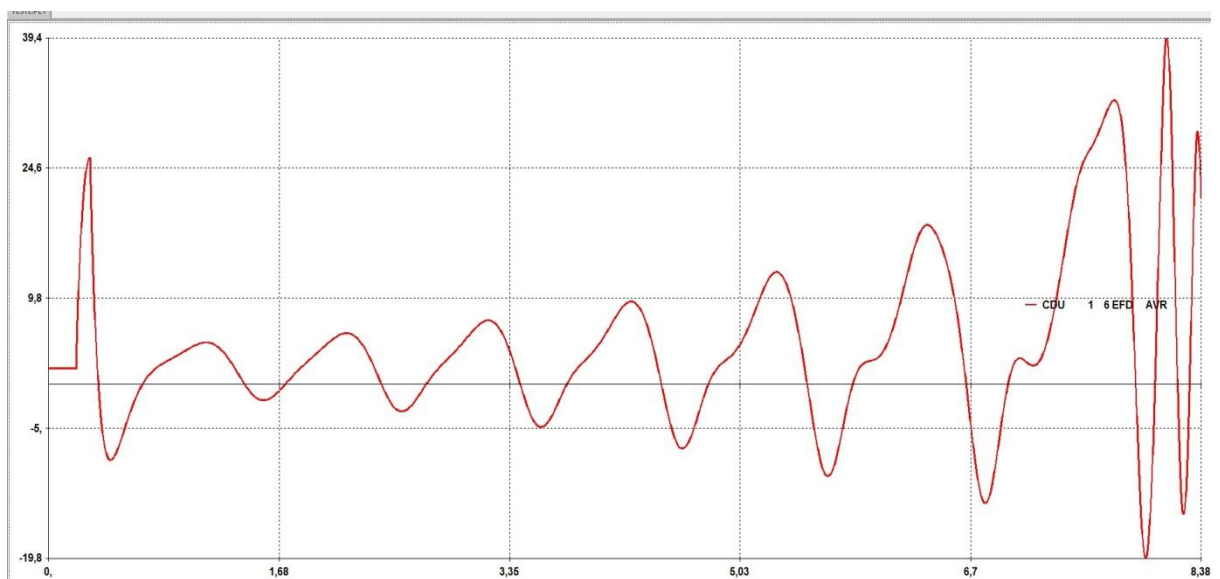


Figura 3.12 – Tensão de campo Efd na saída do regulador de tensão

Caso 2 – Rejeição de 10 MW de carga na barra 1

No instante 0,2 s, simulou-se uma rejeição de carga de 10 MW na barra 1. A resposta das variáveis para a esta perturbação é mostrado a seguir, nas Figuras 3.13 a 3.17.

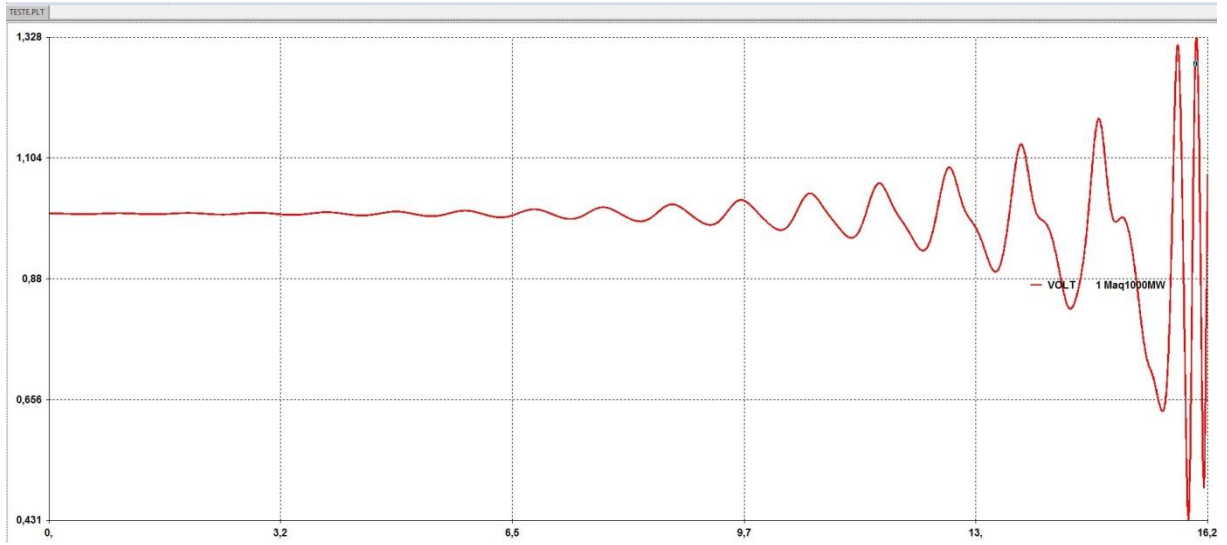


Figura 3.13 – Tensão terminal do gerador 1

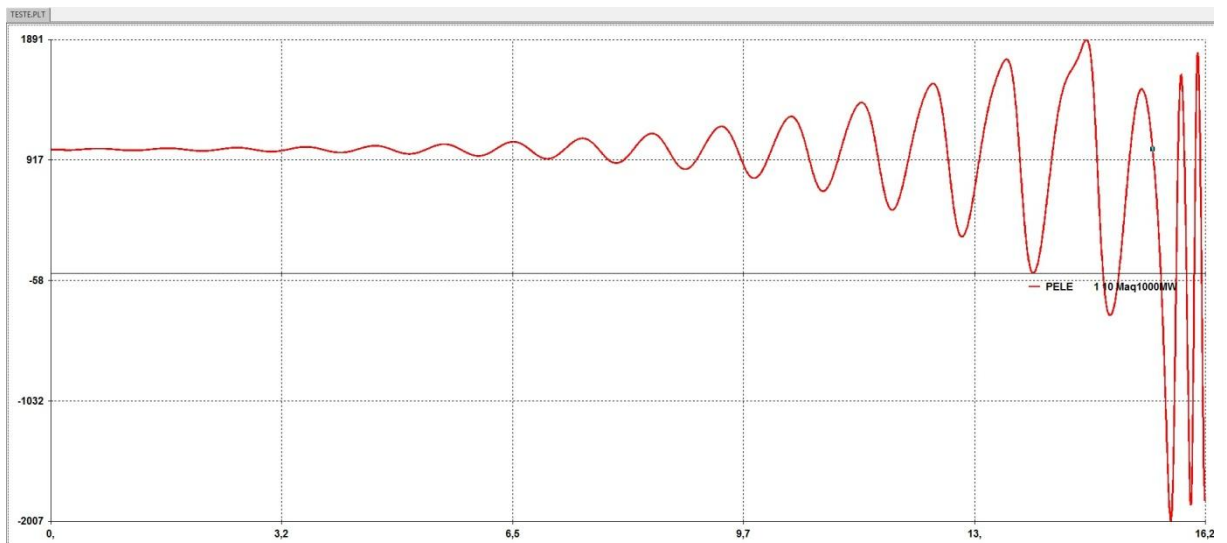


Figura 3.14 – Potência Ativa do gerador 1

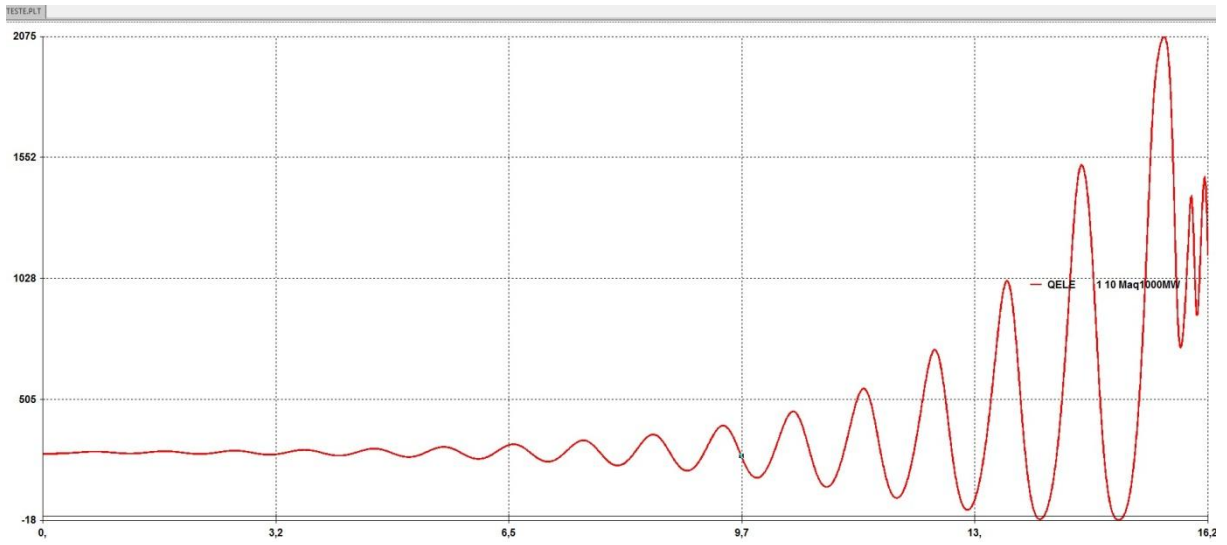


Figura 3.15– Potência reativa do gerador 1

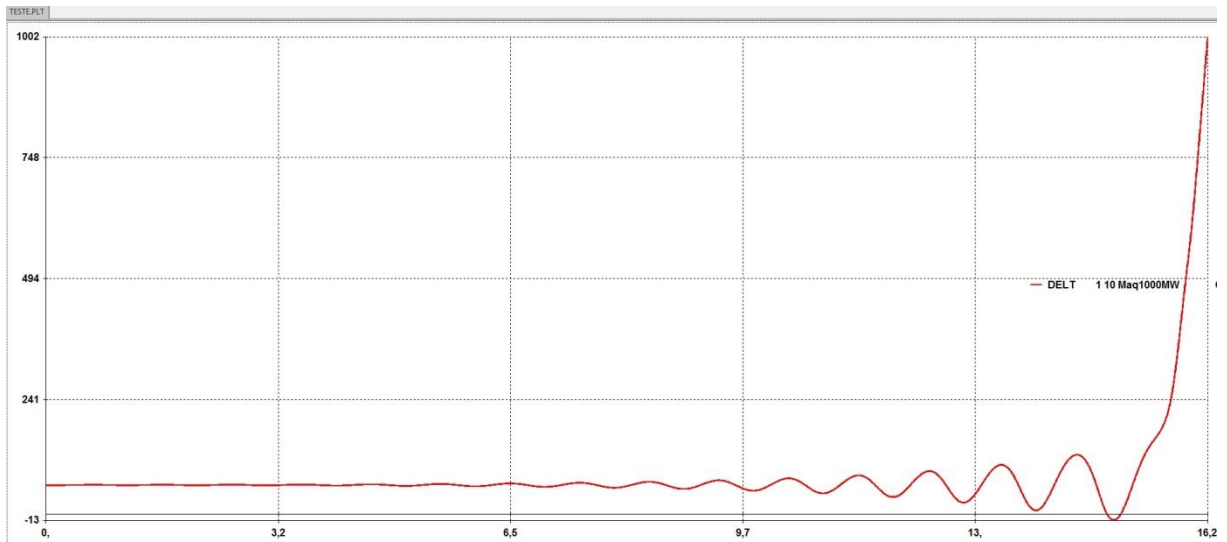


Figura 3.16 – Ângulo do rotor do gerador

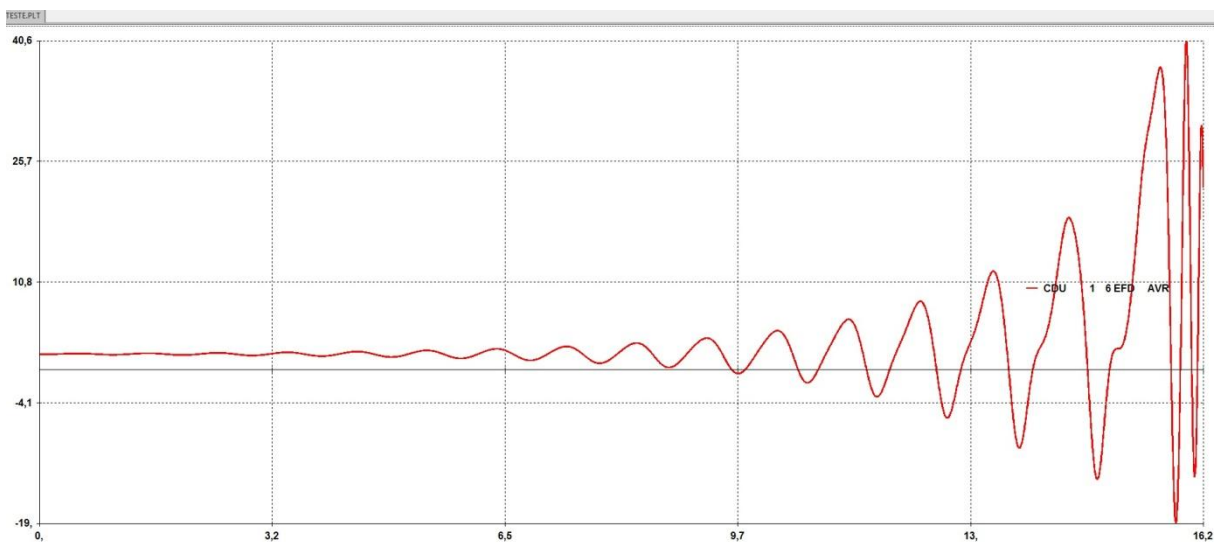


Figura 3.17 – Tensão de campo Efd na saída do regulador de tensão

3.5 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DINÂMICA DA REDE

O PacDyn é um programa desenvolvido pelo Cepel para estudo da estabilidade dinâmica do sistema elétrico. Ele possui uma série de funcionalidades nas quais se destacam: cálculo de autovalores, resposta em frequência, resposta no tempo, mode-shapes, resíduos, diagrama de Nyquist, lugar geométrico das raízes, avaliar resposta no tempo de funções de transferência de interesse, interface com o aplicativo Matlab, entre outras. Essas funções permitem avaliar o comportamento de um sistema ou de um controlador a perturbações de pequena magnitude.

O comportamento do sistema em questão é ditado por seus autovalores que se traduzem por modos de oscilação. O objetivo aqui é apresentar um procedimento que permita gerar o modelo linear aproveitando os dados do programa não linear ANATEM. Em seguida, com o modelo linear gerado, efetuar análise modal usando o programa PacDyn.

O procedimento para geração do modelo linear inicia-se com a inserção do ponto de operação do sistema, que é determinado pelo programa ANAREDE. Este programa utiliza um arquivo com terminação .SAV, que armazena os dados do fluxo de carga de interesse. São inseridos também os arquivos de modelos dinâmicos do ANATEM, arquivo tipo .STB. Este procedimento é ilustrado esquematicamente na figura 3.18.

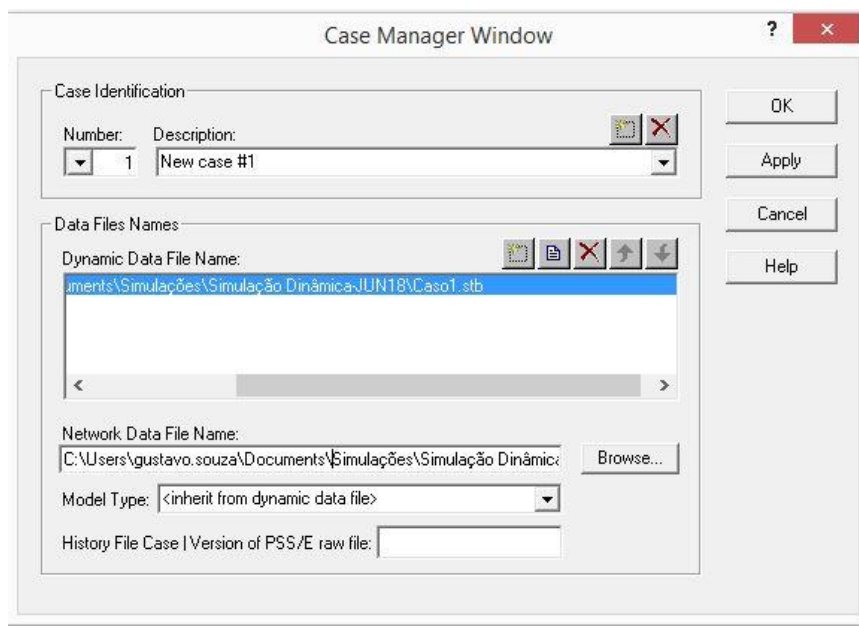


Figura 3.18 – Inserção de dados do sistema no PacDyn

Depois de carregados os arquivos, o PacDyn abre uma janela chamada de “transfer function list” onde o usuário pode criar uma função de transferência para verificar a resposta de uma função de transferência, no qual o usuário deve definir variáveis de entrada e de saída. Com essas informações, podem ser avaliadas a resposta em frequência, modelos reduzidos e verificação dos resíduos da função de transferência. Para cada uma dessas funcionalidades, o usuário tem de criar uma função de transferência específica. A função de transferência tem suas variáveis de entrada e saída à escolha do usuário. A janela é mostrada na figura 3.19.

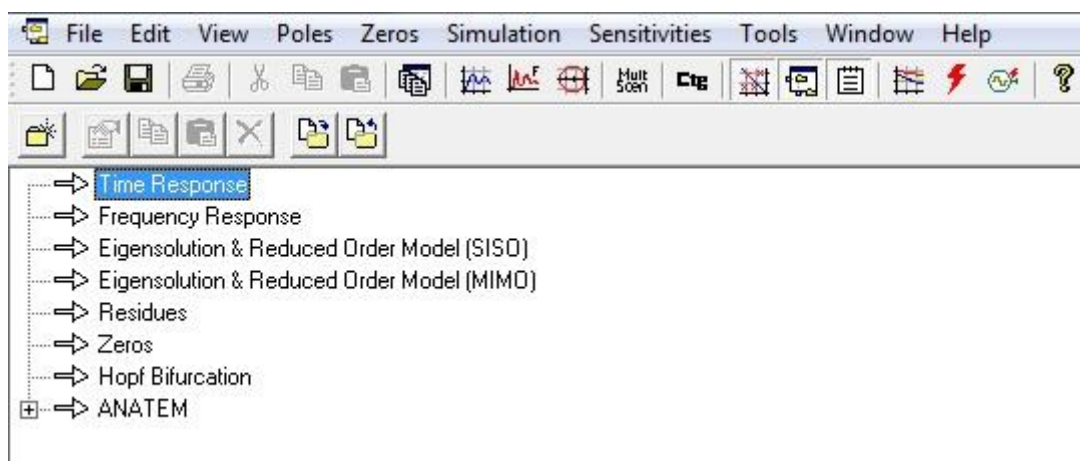


Figura 3.19 – Janela “function transfer list”

3.5.1 Cálculo dos autovalores do sistema

Para o cálculo dos autovalores do sistema, seleciona-se a opção “Poles”. Utilizando o método QR disponibilizado no aplicativo, é possível calcular todos os polos do sistema ou apenas polos dentro de uma faixa estabelecida pelo usuário. O passo é mostrado na figura 3.20.

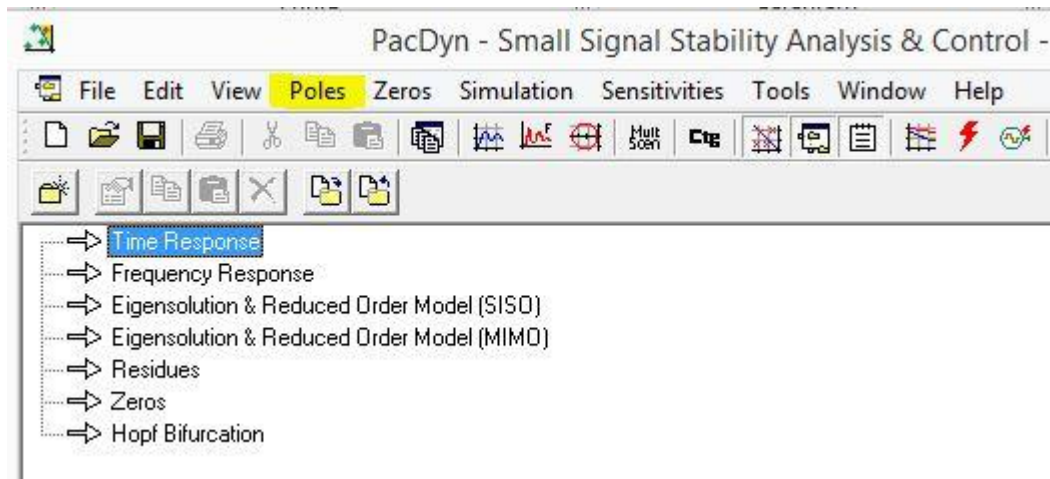


Figura 3.20 – Opção para cálculo de polos do sistema

No cálculo dos polos, pode-se optar por calcular somente os dominantes do sistema ou todos os modos. Para o sistema em estudo, utilizando o método numérico QR para o cálculo dos polos, calcularam-se todos os modos do sistema. Ao fim do cálculo, abre-se uma janela com a lista dos modos com informações da parte real, imaginária amplitude, amortecimentos e o fator de participação mais dominante associado ao modo. Um exemplo é ilustrado na figura 3.21.

Plot	List	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
		0,3776	6,4707	6,4817	1,0298	-5,8255	WW Maq1000MW # 1
		0,3776	-6,...	6,4817	-1,0298	-5,8255	
		-8,2646	8,9855	12,208	1,4301	67,697	EQ' Maq1000MW # 1
		-8,2646	-8,...	12,208	-1,4301	67,697	
		-19,117	0.	19,117	0.	100,00	EQ' Maq1000MW # 1
		-9,3178	0.	9,3178	0.	100,00	ED'' Maq1000MW # 1

Figura 3.21 – Lista de polos dos sistema

Na figura 3.21, em vermelho, são marcados os modos cujos amortecimentos são negativos, indicando baixo amortecimento. Considerando a frequência de oscilação

eletromecânica 1,0298 Hz, conclui-se que os modos são classificados como modos locais. O modo local indica que há uma oscilação entre o gerador e o sistema interligado local. Como esse modo é instável, mesmo simulações no tempo de pequenas perturbações causarão excursões crescentes com o tempo. Como se mostrou nas simulações no domínio do tempo a partir do ANATEM, para grande e pequena perturbação, a máquina conectada à barra 1 foi levada a perda de estabilidade. Para que esse gerador possa operar em segurança elétrica ao se interligar ao sistema interligado, é necessário que o modo instável seja amortecido com uma ação de controle que pode ser obtida com a adição de um sinal estabilizador.

Ao fim do cálculo dos polos, o aplicativo gera um relatório que fica em um arquivo denominado “printout.out”, o qual contém informações do sistema simulado. São informações como dados resumido do ponto de operação, número de controladores, barras, cargas lineares e não lineares, máquinas síncronas e elos HVDC. Ao fim do arquivo é apresentado um sumário contendo detalhes das matrizes do sistema como, por exemplo, quantidade de elementos nulos e não nulos, número de variáveis de estado e algébricas. Essas informações dos relatórios são mostradas nas figuras 3.22 a 3.24.


```

                                INITIAL CONDITIONS
                                -----
(----- bus -----) s/m  rotor  mechanic ( terminal power ) ( terminal voltage) terminal  field
      name      no. no.  angle  power  ( active  reactive ) ( modulus  angle) terminal  current  field
                               degree  MW      MW      Mvar      pu      degree  pu      pu
Maq1000MW      1  0    59.938 1000.00 1000.00 267.95 1.0000 30.000 10.353 1.8659

INITIALIZATION THROUGH BLOCKS
USER DEFINED CONTROLLER VARIABLES
UDC  Var.  Init. Value  Mismatch
-----
1  VREF  0.10187E+01  0.0000
   VT    0.10000E+01  0.0000
   VSAD  0.00000E+00  0.0000
   X3    0.18659E-01  0.0000
   EFD   0.18659E+01  0.0000

```

Successfull initialization through blocks.

```

-----
System Summary
-----+-----+-----+-----+-----+
On  Off  Tot.  Max.
-----+-----+-----+-----+
AC buses                2 16000
AC branches             1 25000
Non-linear loads        0 16000
Dynamic loads           0 16000
Infinite buses          1 16000
Induction motors        0   500
HVDC converters         0   100
-----+-----+-----+-----+
Synchronous machines   1   3000
Excitation systems     0   3000 (built-in)
Excitation systems     1   4000 (UDC)
Rotor speed control systems 0   3000 (built-in)
Rotor speed control systems 0   4000 (UDC)
Power system stabilizers 0   1000 (built-in)
Power system stabilizers 0   4000 (UDC)
FACTS devices          0    80
User defined controllers 1   4000
-----+-----+-----+-----+
System Summary
-----+-----+-----+-----+
Reference generator bus number 0
Reference generator number     0

```

Figura 3.22 – Sumário dos elementos do sistema

```

-----
Matrix Summary: Jacobian & State Matrices
-----+-----+-----+-----+
Description
-----+-----+-----+-----+
Jacobian matrix dimension 27 150000
Number of non-zero elements 65 900000
Number of state variables 6
Number of algebraic variables 18
Number of null variables 3
State matrix dimension (for full system eigensolution) 6
-----+-----+-----+-----+

```

Figura 3.23 – Dados das matrizes do sistema

EIGENVALUES						
No.	Real		Imaginary	Damp (%)	Freq (Hz)	Maximum Participation Factor
1	-19.11676					
2	-8.264625	+j	8.985508	<<<		
3						
4	-9.317780					
5	0.3775927	+j	6.470690	***		
6						

Figura 3.24 – Autovalores do sistema

3.5.2 Resposta em frequência

Análises em resposta em frequência também podem ser feitas no PacDyn. Para tanto, escolhe-se uma função de transferência de interesse, com entradas e saídas desejadas pelo usuário, e o programa fará o diagrama de Bode. Essa análise é bastante útil, pois com ela é possível identificar modos que são excitados para uma variável de estado de interesse. O procedimento é mostrado nas figuras 3.25, 3.26 e 3.27.

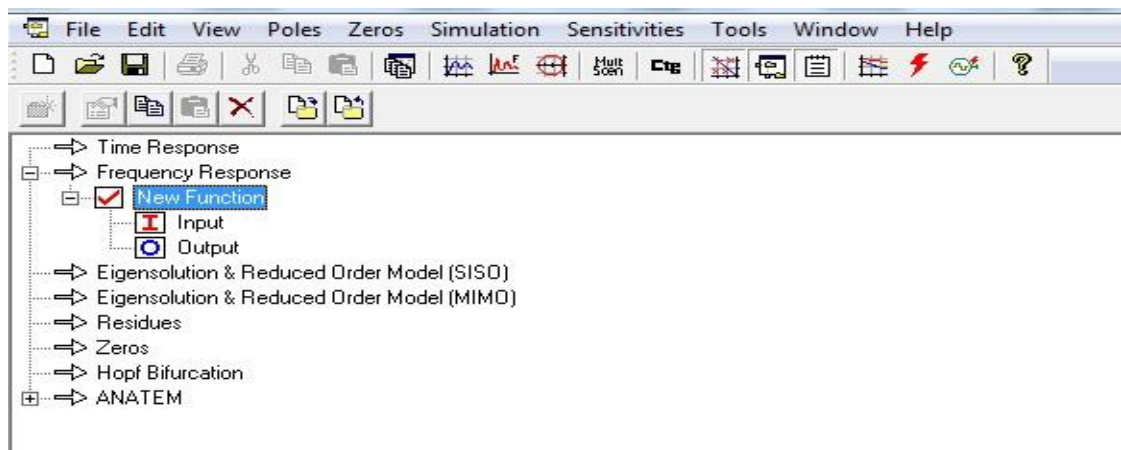


Figura 3.25 – Cálculo de uma função de transferência

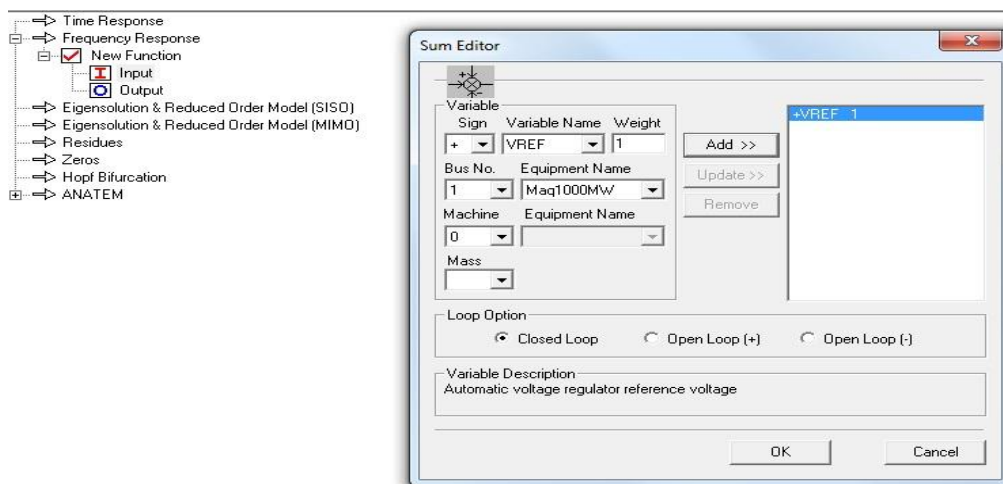


Figura 3.26 – Escolha de uma variável de entrada

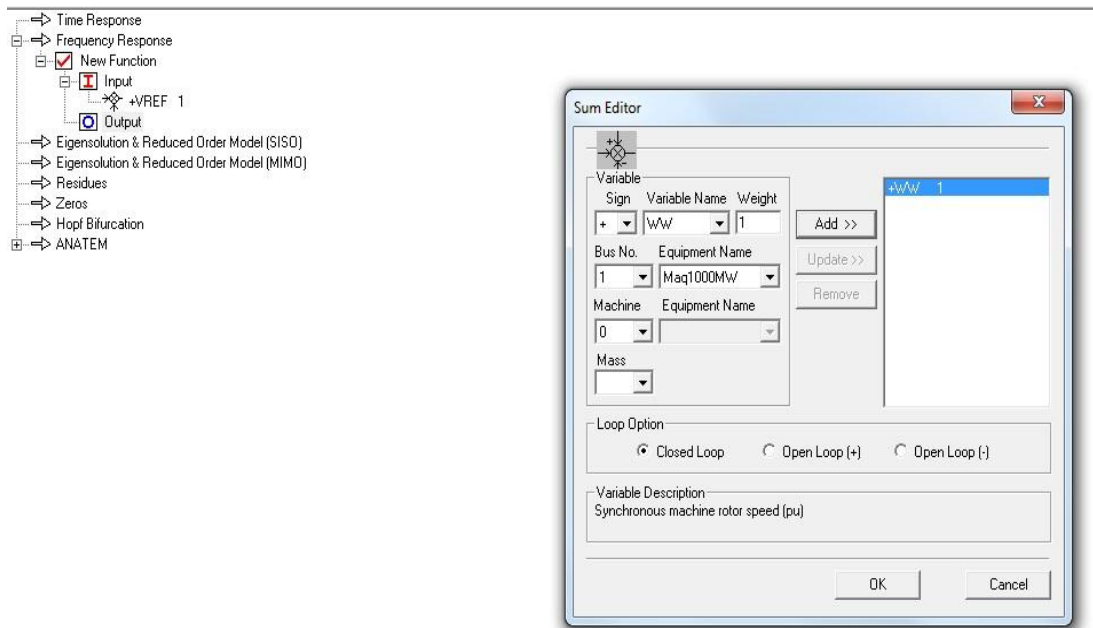


Figura 3.27 – Escolha de uma variável de saída

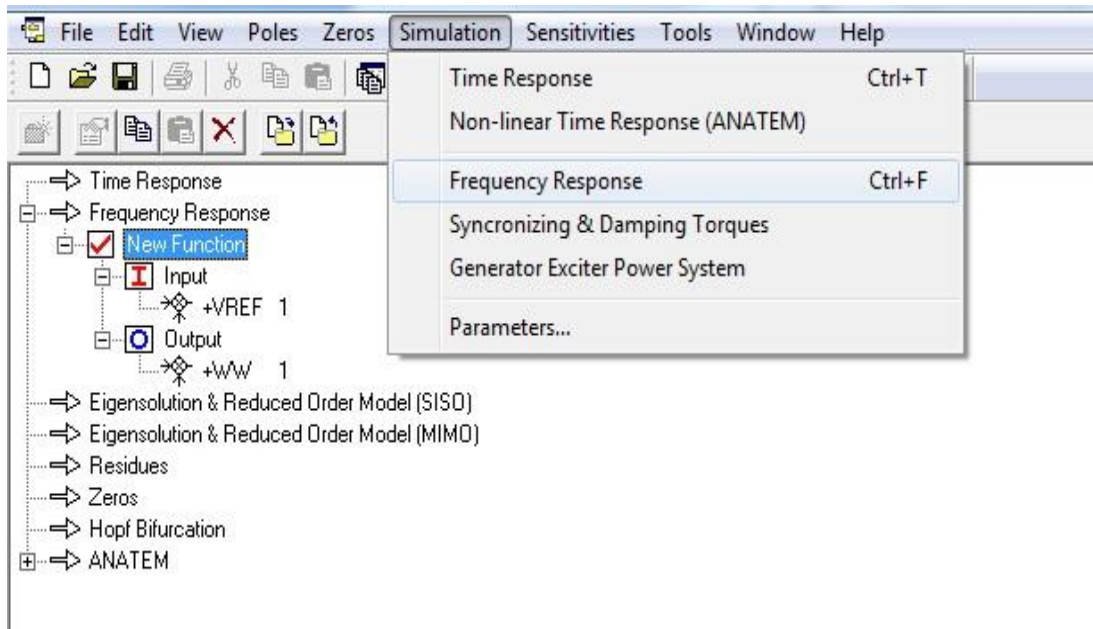


Figura 3.28 Passo para simulação de resposta em frequência

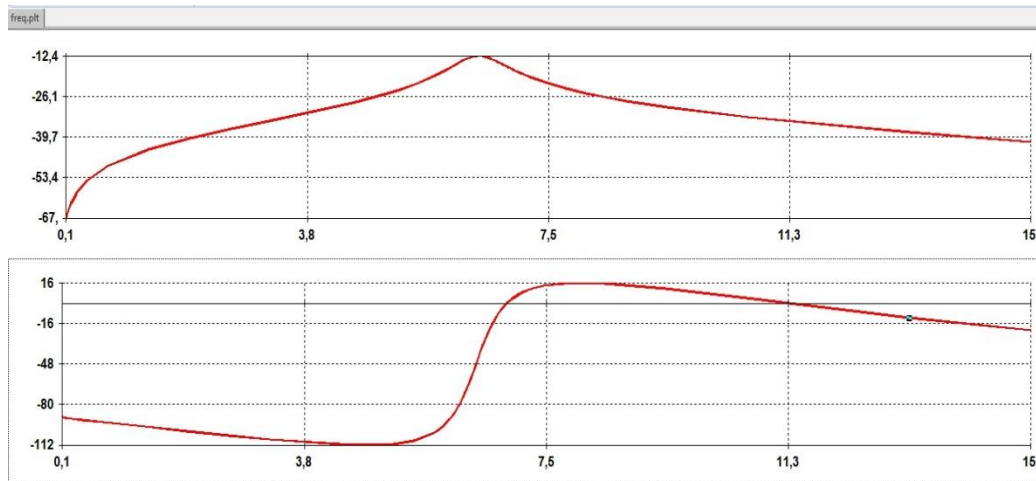


Figura 3.29 Resposta em frequência da função de transferência

A função de transferência escolhida tem como entrada a tensão de referência VREF e como saída velocidade angular WW. Essa função de transferência é comumente avaliada na resposta em frequência para se conhecer a influência da tensão de entrada nos desvios de velocidade do gerador.

A partir da resposta obtida, é possível identificar uma ressonância em 6,45 rad/s, indicando uma atividade de um modo de oscilação para os desvios de velocidade angular. Fazendo a conversão para Hz, observa-se que o modo é justamente o de 1,02 Hz como determinado a partir da análise por autovalores. Dessa forma, pode-se confirmar que o modo influencia o comportamento da velocidade angular da máquina.

3.5.3 Fatores de sensibilidade: *Mode Shapes* e Resíduos

Na análise de pequenos sinais é importante que se conheça a atividade de uma variável de estado quando um modo é excitado, as variáveis de estado que mais participam de um dado modo etc. Essas informações são obtidas ao se analisar os *Mode Shapes* e os Resíduos de uma função de transferência.

O Mode-Shape deve ser avaliado para o modo em específico, dessa forma são obtidas as variáveis de estado que mais são excitadas na presença desse modo. Para exemplificar essa análise, escolheu-se avaliar o modo instável $0,377 + j6,47$. No aplicativo, basta selecionar um

autovalor de interesse, calculado conforme mostrado anteriormente, e clicar em “mode shapes”. O PacDyn apresenta os resultados em um formato de histograma e também na forma de uma lista. Os resultados são mostrados nas figuras 3.29 e 3.30.



Figura 3.30 Histograma do Mode Shape

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0:	Maq1000MW # 1	

Figura 3.31 Lista das variáveis de estado de maior atividade

Como é possível ver a partir dos resultados, a variável de estado referente à velocidade angular da máquina 1 é quem mais tem atividade quando o modo instável é excitado. As demais variáveis de estado não apareceram, pois tem atividade nula para esse modo.

Os resíduos são obtidos a partir de uma função de transferência criada pelo usuário. Para esse item, será utilizada a mesma função de transferência da resposta em frequência, WW/VREF. Após selecionar a função de transferência, basta clicar em “sensitivities” e, em

seguida, em “transfer function residues”. Seguindo esse procedimento, chega-se ao resultado da figura 3.32.

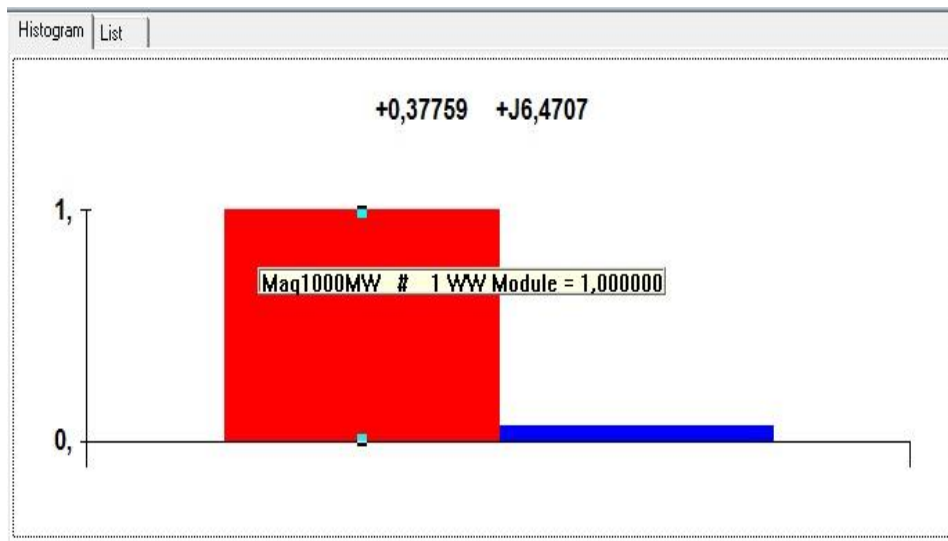


Figura 3.32 Histograma de resíduos de WW/VREF

Module	Phase	Bus Name	Var
1.0000	0.	Maq1000MW # 1	WW
1.0000	6,36111e...	Maq1000MW # 1	DELTA
0.1690	10,980	Maq1000MW # 1	EQ'
0.07304	-171,74	Maq1000MW # 1	EQ''
0.06812	77,355	Maq1000MW # 1	EQ'''
0.06263	90,822	AVR # 1	x0005

Figura 3.33 Lista de resíduos de WW/VREF

Como os resíduos de uma função de transferência indicam a participação de uma variável de estado em um dado modo, a partir do módulo dos vetores é possível concluir que os desvios de velocidade angular da máquina 1 é a variável de estado que mais participa do modo instável, $0,377 + j6,47$. A fase nula desse resíduo indica que este oscila sem defasagem angular com esse modo.

3.6 CONCLUSÃO

A partir do sistema teste estudado apresentou-se de forma ilustrativa e resumida o potencial da ferramenta computacional PacDyn para análise de estabilidade a pequenos sinais em sistemas elétricos de potência. Foi mostrado como são preparados os dados do modelo de interesse, para uma dada rede elétrica, para fins de estudo de estabilidade a pequenas perturbações, desde o cálculo do fluxo de carga, com o ANAREDE, a integração com os modelos não-lineares do ANATEM.

Por meio dos resultados obtidos da análise linear e com as respostas no domínio do tempo, a rede teste do sistema mostrou-se instável. Essa instabilidade se deve à presença de um modo local não amortecido, o que indica a necessidade de reforços nessa rede e a implementação de sinais estabilizadores de sistemas de potência na máquina 1.

Como ficou observado, através dos resultados, a análise linear do sistema dinâmico é uma ferramenta útil para estratificar as oscilações do sistema, identificar quais variáveis mais influenciam um modo de oscilação, os tipos de modos que a rede possui e se há necessidade de amortecimento desses por meio de ajustes na rede.

4. SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE GRANDE PORTE

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para demonstrar o comportamento dinâmico de um sistema de grande porte e a realização de uma análise sob o ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações será utilizada a área elétrica relativa ao sistema Acre-Rondônia para um estudo aplicado.

4.2 INTRODUÇÃO

O sistema Acre-Rondônia faz parte da rede do SIN que se inicia na subestação de Vilhena 230 kV, geograficamente no estado de Rondônia, atingindo até a SE Rio Branco 230 kV no estado do Acre. Essa rede tem uma característica marcante, pois possui um elevado potencial de geração na primeira metade do ano, tendo o Rio Madeira como principal contribuição nesse potencial para as usinas da região.

Dentre as UHEs, UTEs e PCHs da área, destacam-se pelo montante de geração fornecido ao SIN as UHEs Jirau 500 kV (Margem Direita e Margem Esquerda), Santo Antônio 500 kV (Margem Direita, Margem Esquerda e Leito do Rio), Santo Antônio 230 kV (Margem Esquerda) e Samuel 230 kV. Essas hidroelétricas possuem capacidade máxima de geração correspondente a 3750 MW, 3153 MW, 432 MW e 218 MW, respectivamente, totalizando aproximadamente capacidade de 7554 MW de geração ao SIN.

A rede opera com as máquinas da SE Jirau 500 kV e SE Santo Antônio 500 kV de forma assíncrona com o SIN. Elas se conectam ao sistema Acre-Rondônia por meio de um sistema de conversão *Back-to-Back*, que interliga a SE Coletora Porto Velho 500 kV a SE Coletora Porto Velho 230 kV; e por dois bipolos HVDC que se conectam a SE Araraquara 500 kV na região Sudeste. As UHEs Santo Antônio 230 kV e Samuel 230 kV se conectam ao sistema Acre-Rondônia de forma síncrona, por meio de linhas de transmissão em corrente alternada. Os diagramas unifilar e o eletro-geográfico da área podem ser visto nas figura 4.1 e 4.2.

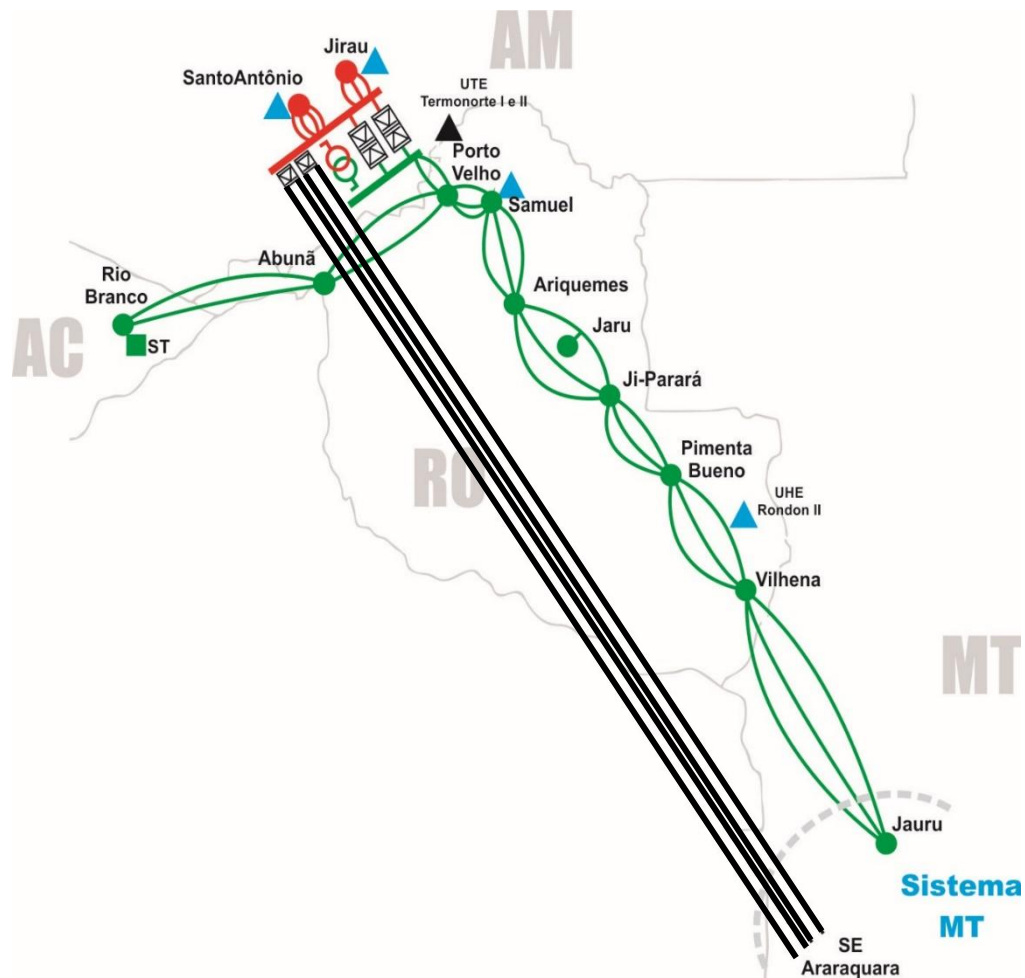


Figura 4.2: Diagrama eletrogeográfico da rede do sistema Acre - Rondônia

A opção por uma conexão assíncrona das máquinas do sistema 500 kV se deve à susceptibilidade das máquinas estarem sujeitas a oscilações em razão da existência de modos inter-área na frequência entre 0,35 e 0,45 Hz. Esses modos ao interagirem com as máquinas podem levá-las a perda de estabilidade, caso não sejam amortecidos, provocando assim interrupção na geração.

Entretanto, há a necessidade de conectar um transformador (TF13) que interliga de forma síncrona as máquinas de Jirau e Santo Antônio 500 kV para que seja possível energizar um dos transformadores conversores do Bipolo 2 do sistema Madeira. A solução foi tomada uma vez que esses transformadores não eram possíveis de serem energizados em vazio, dessa forma a conexão síncrona permitia que o transformador fosse energizado com a carga presente no sistema Acre-Rondônia, amortecendo as correntes transitórias.

Como foi descrito, a conexão síncrona da SE Coletora Porto Velho 500 kV com o sistema Acre-Rondônia poderia levar as máquinas deste barramento à perda de estabilidade devido à presença de um modo de oscilação não amortecido. Dessa forma, durante o período que o TF 13 estivesse conectado para a energização do transformador conversor do bipolo 2, as máquinas estariam sujeitas a oscilações. Se fez necessário então a adição de malhas estabilizadoras nas máquinas (ESP) de 500 e 230 kV com o propósito de amortecer o modo.

O Bipolo também contribui para o controle de frequência do sistema Acre-Rondônia por meio de uma malha de controle denominada *STAB500*. Essa malha tem como objetivo regular a frequência do barramento de 500 kV da Coletora Porto Velho de forma mais rápida que o controle a partir das UHEs desse barramento. A referência [7] faz um estudo de estabilidade a pequenas perturbações na rede Acre-Rondônia e avalia o amortecimento dos modos interáreas com a utilização do controle de frequência, *STAB500*, dos elos HVDC do Madeira. Em [7] concluiu-se que a presença desse controlador em operação também auxiliava no amortecimento de modos de oscilação associados às UHEs Jirau e Santo Antônio. A figura 4.3 mostra em vermelho o barramento de 500 kV da SE Coletora Porto Velho por onde se conectam as UHE Jirau e Santo Antônio assim como os bipolos 1 e 2 do Madeira.

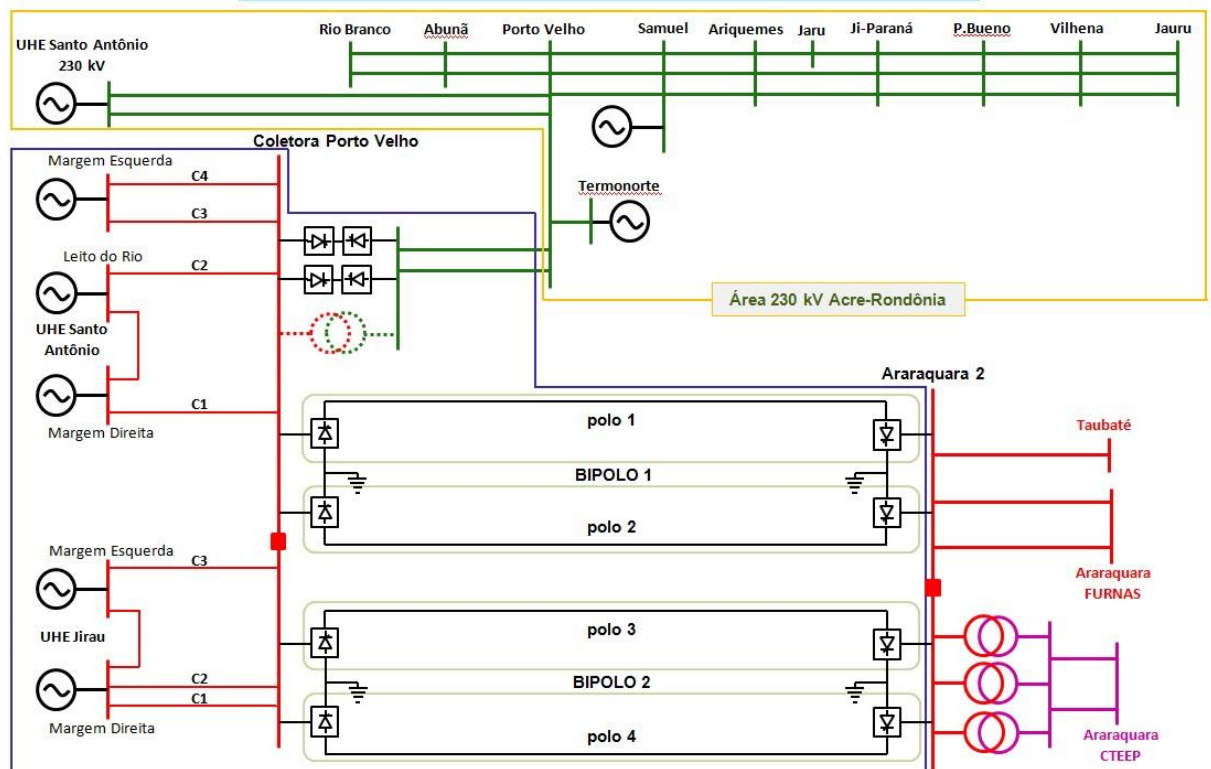


Figura 4.3: Barramento de 500 kV da SE Coletora Porto Velho

4.3 METODOLOGIA

Com o intuito de apresentar o estudo de estabilidade a pequenas perturbações no sistema de grande porte com ferramentas computacionais, será simulada a resposta do sistema para pequenas perturbações para três casos dentro do contexto de oscilações no sistema Acre-Rondônia.

Serão avaliados com o PacDyn alguns dos parâmetros da análise linear como: Modos de oscilação, *Mode Shapes*, fatores de participação e resposta em frequência. No domínio não linear serão feitas simulações no ANATEM a fim de se verificar a resposta no tempo para as pequenas perturbações. No contexto do problema da conexão síncrona da SE Coletora Porto Velho 500 kV com o SIN, serão realizados os seguintes casos:

Caso 1 (Operação Assíncrona) - Rejeição de 10 MW, no instante 0,20 s, de geração na UHE Jirau Margem Esquerda com o transformador 13 **desconectado**, ESPs das UHEs Jirau 500 kV (Margem Direita e Margem Esquerda), Santo Antônio 500 kV (Margem Direita, Margem Esquerda e Leito do Rio), Santo Antônio 230 kV (Margem Esquerda) e Samuel 230 kV **ligados**.

Caso 2 - (Operação Síncrona) Rejeição de 10 MW, no instante 0,20 s, de geração na UHE Jirau Margem Esquerda com o transformador 13 **conectado**, ESPs das UHEs Jirau 500 kV (Margem Direita e Margem Esquerda), Santo Antônio 500 kV (Margem Direita, Margem Esquerda e Leito do Rio), Santo Antônio 230 kV (Margem Esquerda) e Samuel 230 kV **desligados**. Bipolo 1 operando bipolar e Bipolo 2 apenas com 1 polo.

Caso 3 - (Operação Síncrona) Rejeição de 10 MW, no instante 0,20 s, de geração na UHE Jirau Margem Esquerda com o transformador 13 **conectado**, ESPs das UHEs Jirau 500 kV (Margem Direita e Margem Esquerda), Santo Antônio 500 kV (Margem Direita, Margem Esquerda e Leito do Rio), Santo Antônio 230 kV (Margem Esquerda) e Samuel 230 kV **ligados**. Bipolo 1 operando bipolar e Bipolo 2 apenas com 1 pólo.

As simulações no domínio do tempo, que serão apresentadas no próximo tópico, tratam a respeito das seguintes variáveis: FMAQ, VOLT, PELE*, QELE*, DELT*.

Onde:

FMAQ é a grandeza absoluta referente à frequência elétrica de um gerador;

VOLT é a grandeza em pu referente à tensão terminal do gerador;

PELE* é a grandeza em referente à variação da potência ativa fornecida pelo gerador;

QELE* é a grandeza em referente à variação da potência reativa de um gerador,

DELT* é a grandeza em referente à variação do ângulo do rotor do gerador em relação a uma referência síncrona.

Na análise de pequenos sinais serão apresentados alguns modos de oscilação pertinentes, os *Mode-Shapes* de velocidade angular, os fatores de participação para um modo e a reposta em frequência da função de transferência WW/VREF.

As máquinas de interesse nas simulações serão: UHEs Jirau 500 kV (Margem Direita e Margem Esquerda), Santo Antônio 500 kV (Margem Direita, Margem Esquerda e Leito do Rio), Santo Antônio 230 kV (Margem Esquerda) e Samuel 230 kV.

4.4 BASE DE DADOS

Para o estudo, será utilizado o caso base de fluxo de potência referente a junho de 2018 no período de carga pesada, os modelos dinâmicos serão também os referentes ao mesmo período. O cenário energético em questão considera a região Norte exportadora, período em que as usinas hidráulicas da região norte possuem maior potencial de geração.

4.4.1 Dados do sistema

A relação do número de barras CA, barras CC, cargas não-lineares, elos HVDC, controladores de máquinas, sinais estabilizadores e equipamentos FACTS é mostrado na figura 4.4. A dimensão da matriz jacobiana e de estados para os casos estudados é mostrado na figura 4.5.

System Summary	On	Off	Tot.	Max.
AC buses			6453	16000
AC branches			9385	25000
Non-linear loads			6149	16000
Dynamic loads			0	16000
Infinite buses			2	16000
Induction motors	0		0	500
HVDC converters	24		24	100
Synchronous machines	265	0	265	3000
Excitation systems (built-in)	0	0	0	3000
Excitation systems (UDC)	265	0	265	4000
Rotor speed control systems (built-in)	0	0	0	3000
Rotor speed control systems (UDC)	235	0	235	4000
Power system stabilizers (built-in)	0	0	0	1000
Power system stabilizers (UDC)	165	0	165	4000
FACTS devices	31	0	31	80
User defined controllers	732	401	1133	4000

Figura 4.4: Dados do sistema

Matrix Summary: Jacobian & State Matrices			
Description	Num.	Max.	
Jacobian matrix dimension	61693	150000	
Number of non-zero elements	177642	900000	
Number of state variables	7129		
Number of algebraic variables	53822		
Number of null variables	742		
state matrix dimension (for full system eigensolution)	7129		

Figura 4.5: Dados das matrices do sistema

4.5 SIMULAÇÕES

Nesse item serão mostradas as respostas das UHEs no domínio do tempo para as variáveis de interesse. Em seguida serão apresentados os resultados dos cálculos de modos de oscilação considerados pertinentes, *mode-shapes* de velocidade, fatores de participação e resposta em frequência para a função transferência $WW/VREF$.

4.5.1 Caso 1

Nesse caso a operação é feita de forma assíncrona, com o TF 13 desligado, e os controladores das máquinas ligados. É aplicada uma rejeição de carga de 10 MW no instante 0,2 s na UHE Jirau.

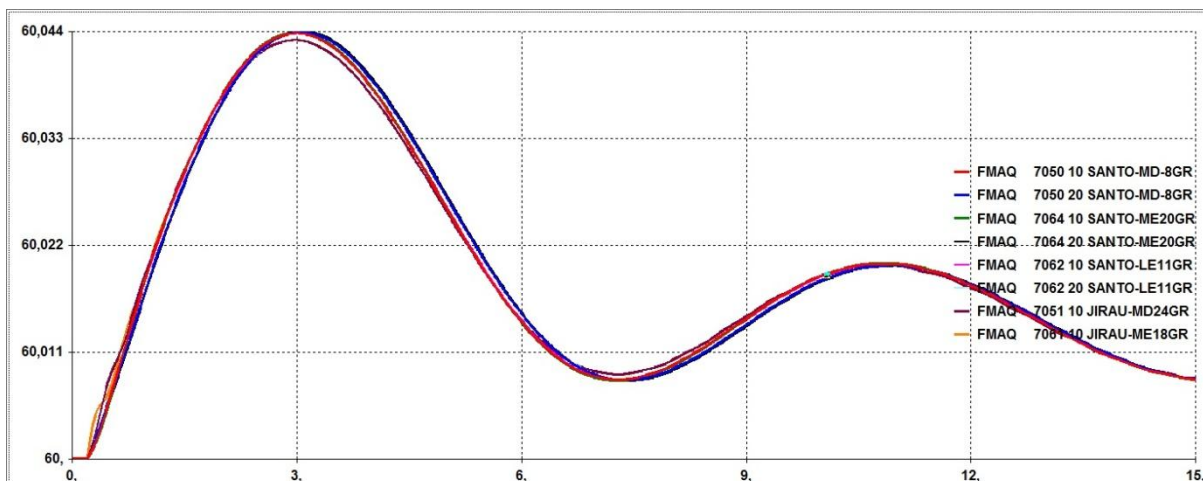


Figura 4.6: Caso 1 - Frequência das UHEs

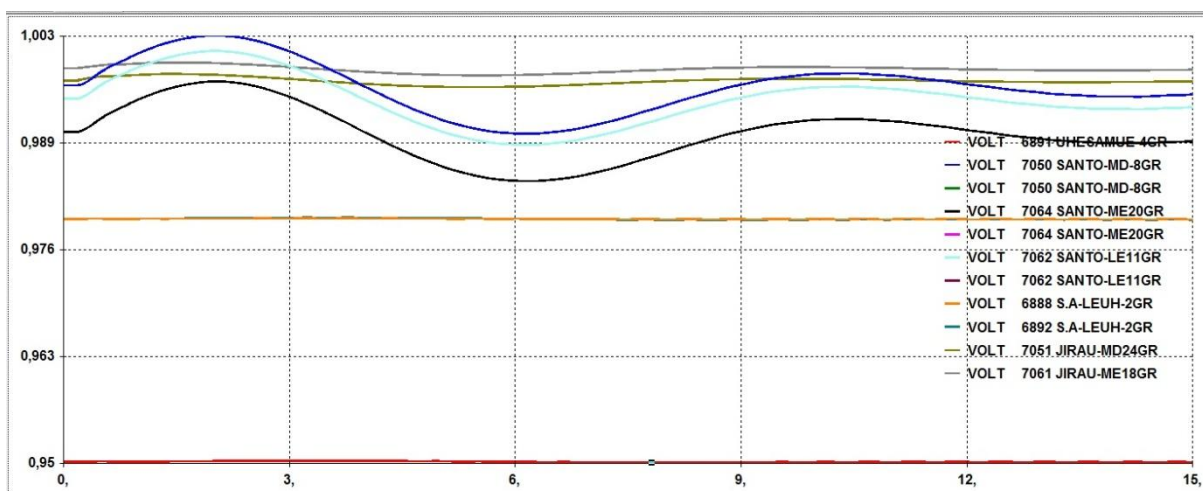


Figura 4.7: Caso 1 – Tensão terminal das UHEs

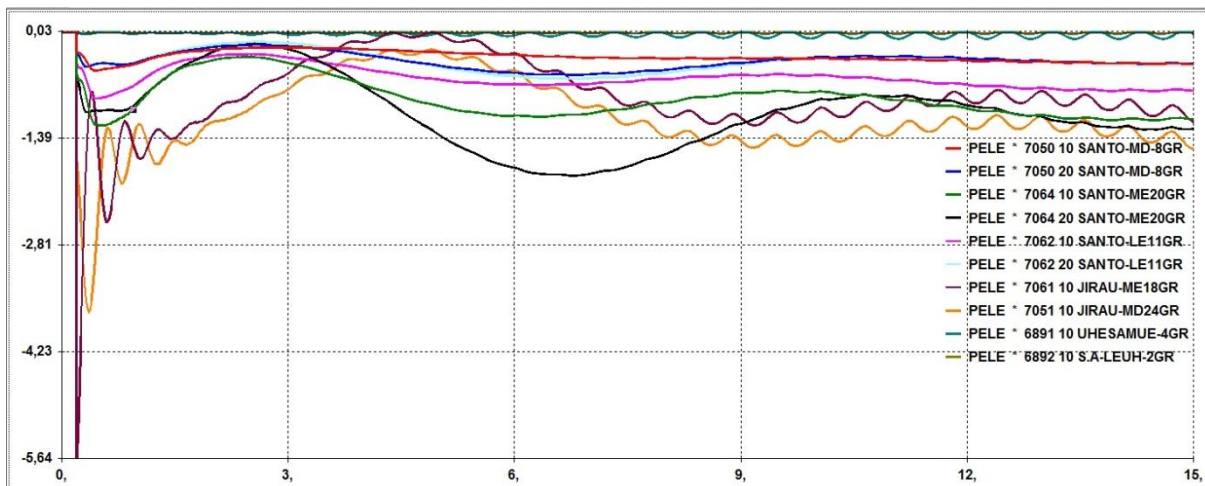


Figura 4.8: Caso 1 – Desvio de Potência Ativa das UHEs

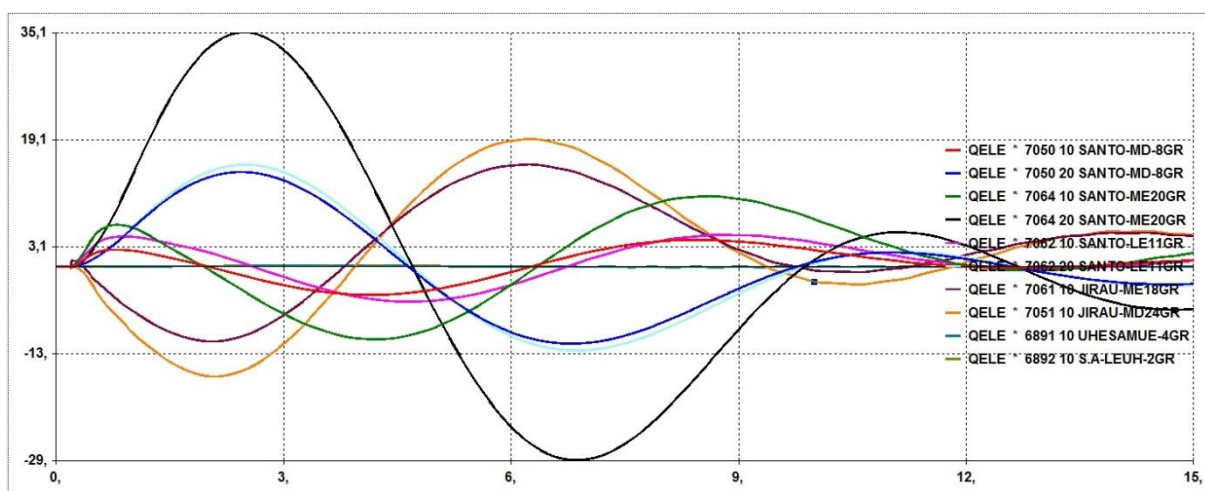


Figura 4.9: Caso 1 – Desvio de Potência Reativa das UHEs

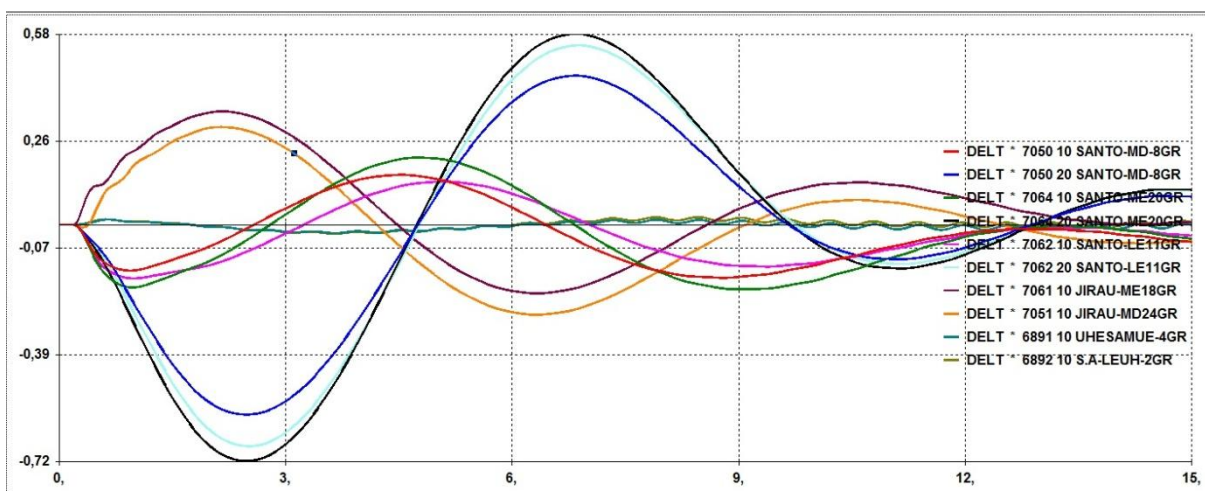


Figura 4.10: Caso 1 – Desvio de no ângulo do rotor das UHEs

Das respostas no regime não linear das UHEs, percebe-se que as suas grandezas de forma geral se comportam de forma estável após a perturbação. É possível notar que as oscilações preponderantes são lentas em todos os casos, a exceção do desvio de potência reativa nas UHEs Jirau ME, Jirau MD e Santo Antônio ME. Essas possuem um modo mais rápido do que as demais, possivelmente um modo proveniente de ajustes de controladores. Mas ainda sim, nesse caso, a oscilação é amortecida.

	Real	Imaginary	Conv.	Damp	Freq.	Module
1	-16,0581	2,810	c..	98,50%	0,45	16,30
2	-4,1039	2,5342	c..	85,09%	0,40	4,82
3	-2,4329	14,2307	c..	16,85%	2,26	14,44
4	-4,8487	19,2021	c..	24,48%	3,06	19,80
5	-5,0082	19,8219	c..	24,50%	3,15	20,44

Figura 4.11: Caso 1 – Modos escolhidos para análise

A partir do cálculo dos autovalores do sistema escolheram-se os que são mostrados na figura 4.9, esses modos tem grande influência na rede estudada. Os modos de menor frequência já são típicos da rede sistema Acre-Rondônia como foi estudado na referência [7], pela frequência de oscilação é classificado de acordo com a referência [6] como modo inter-área. Os modos mais oscilatórios, entre 2 e 3 Hz, são classificados pela referência [6] como modos de controle, são oscilações causadas por ajustes dos diversos controladores da área. Entretanto, embora esses modos estejam presentes como se vê na figura 4.9, o amortecimento é positivo dessa forma não se configura um risco a estabilidade da rede.

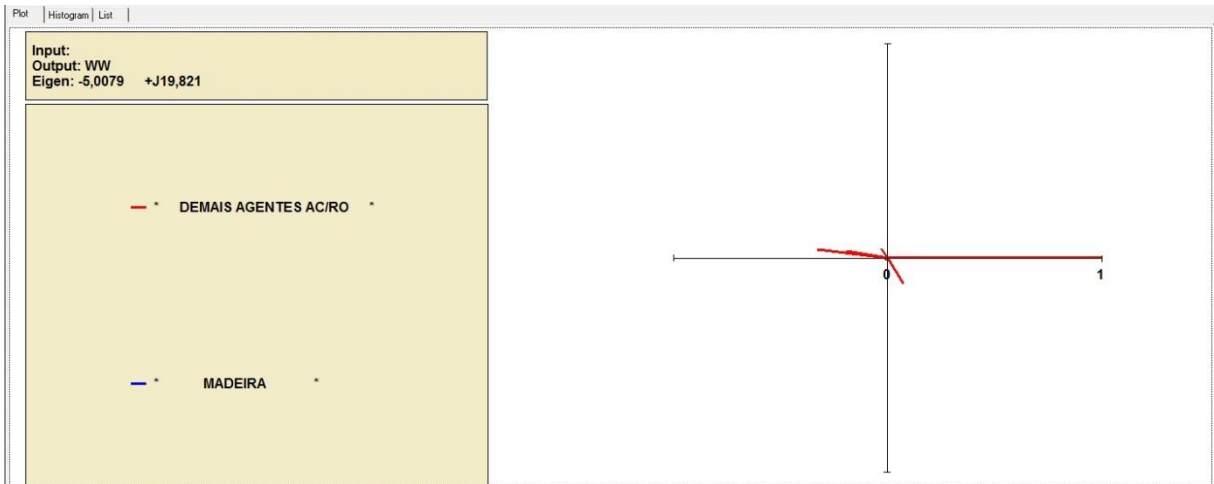


Figura 4.12: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -5+j19,821$

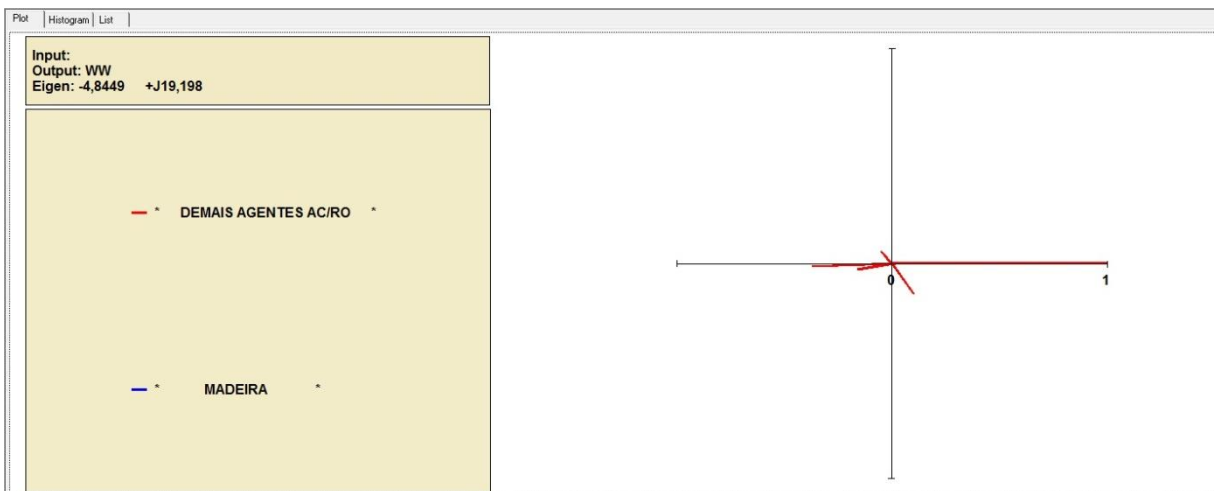


Figura 4.13: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,84+j19,198$

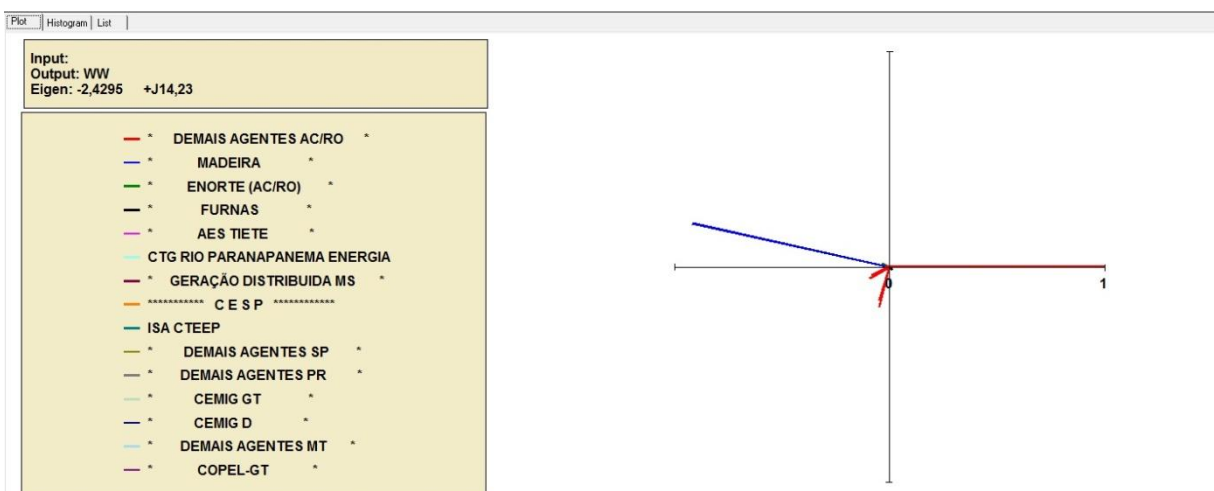


Figura 4.14: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -2,429+j14,23$

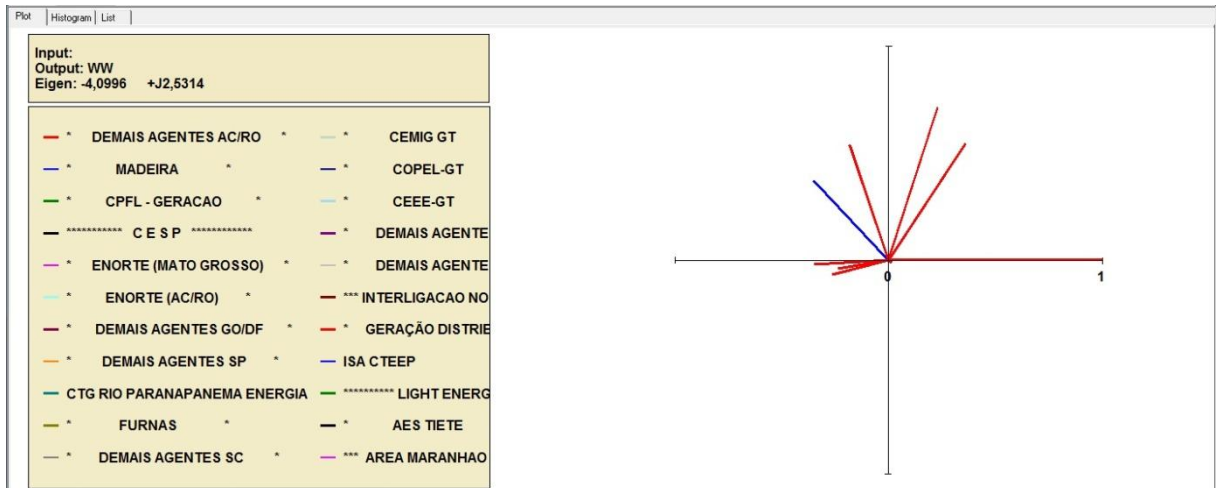


Figura 4.15: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,099+j2,531$

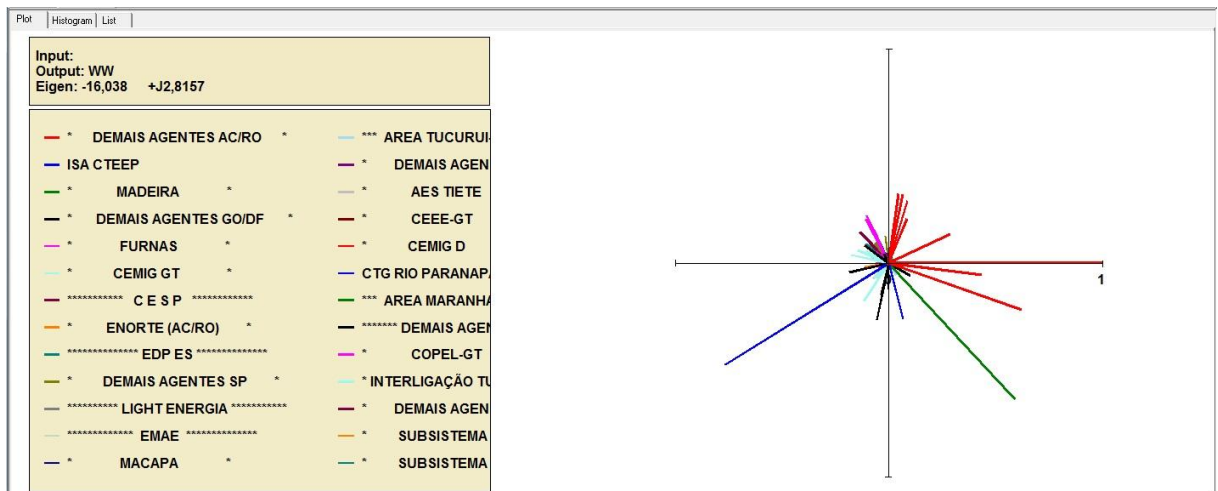


Figura 4.16: Caso 1 – Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -16,038+j2,815$

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0	JIRAU-MD24GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9010	-148,20	EMBU-GUA-1CS# 532	ISA CTEEP
0,8646	-47,178	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,6592	-19,331	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,4410	-7,0141	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,3283	78,295	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,3267	81,769	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,3188	25,133	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,3044	73,374	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,2715	-102,02	CACU-----2GR# 9448	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,2640	-75,628	S.ANGELO-1CS# 533	ISA CTEEP
0,2454	115,04	IBIUNA--4CS# 48	* FURNAS *
0,2298	117,46	T.PRETO--1CS# 50	* FURNAS *
0,2249	67,826	S.A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,2100	-123,15	NEVES-1--1CS# 354	* CEMIG GT *
0,1972	132,44	JUPIA----9GR# 502 2	***** C E S P *****
0,1971	132,97	JUPIA----9GR# 502 1	***** C E S P *****
0,1948	-0,03161	UHEROND2-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,1890	-167,14	C.DOUR11-2GR# 750	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,1791	167,75	S.SIMAO--4GR# 303	* CEMIG GT *
0,1718	113,88	GRAJAU-1-1CS# 44	* FURNAS *
0,1715	113,90	GRAJAU-2-1CS# 38	* FURNAS *
0,1589	131,40	JUPIA138-2GR# 503	***** C E S P *****
0,1568	157,05	PESTRELA-1GR# 1594	* CEMIG GT *
0,1492	-103,03	B.COQUEI-2GR# 9449	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,1413	139,70	SUICA----1GR# 2601	***** EDP ES *****
0,1380	143,39	FRCLARO--2GR# 9447	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,1281	97,210	EROCHA-G-1GR# 9100	* DEMAIS AGENTES SP *
0,1242	-90,629	SALTO---1GR# 9442	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,1240	135,82	I.POMBOS-4GR# 257 4	***** LIGHT ENERGIA *****
0,1232	136,23	I.POMBOS-4GR# 257 3	***** LIGHT ENERGIA *****

Figura 4.17: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -5+j19,821$

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7515	72,122	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,6550	56,620	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,5677	108,61	JIRAU-MD24GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,5054	133,23	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,3460	183,02	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,2701	194,51	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,2379	189,47	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,03369	58,864	CNOVOS--2GR# 1157	* CPFL - GERACAO *
0,02034	-14,820	T.IRMAOS-3GR# 520	***** C E S P *****
0,01800	4,1881	S.A-LEUH-2GR# 6888	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01439	317,09	S.A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01333	29,847	DARDANE1-4GR# 4890	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,01255	32,818	DARDANE2-1GR# 4891	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,01199	162,29	UHEROND2-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,01127	-29,182	ESPDRA--3GR# 3744	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,01049	322,39	CBRAVA--1GR# 3964	* DEMAIS AGENTES GO/DF *
0,00989	15,520	14JULHO-2GR# 1168	* CPFL - GERACAO *
0,00988	35,068	EROCHA-V-1GR# 9101	* DEMAIS AGENTES SP *
0,00951	18,422	CALVES--3GR# 1166	* CPFL - GERACAO *
0,00873	53,908	TAQUARUC-5GR# 513	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA
0,00795	46,643	FURNAS--2GR# 16	* FURNAS *
0,00782	290,75	SPilao--2GR# 2863	* DEMAIS AGENTES SC *
0,00782	294,97	JAGUARA--3GR# 301	* CEMIG GT *
0,00745	-13,986	MARIMBON-6GR# 20	* FURNAS *
0,00719	-32,198	CANDAS-2-2GR# 509	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA
0,00700	-26,530	CANDAS-1-2GR# 508	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA
0,00683	-23,327	PCHMaua-2GR# 984	* COPEL-GT *
0,00682	280,05	Itauba--4GR# 1155	* CEEE-GT *
0,00598	22,482	JUPIA----9GR# 502 1	***** C E S P *****
0,00597	22,479	JUPIA----9GR# 502 2	***** C E S P *****
0,00596	0,2120	JUPIA----9GR# 502 3	* DEMAIS AGENTES AC/RO *

Figura 4.18: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,099+j2,53$

Module	Phase	Bus Name	Área
1,0000	0	JIRAU-MD24GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9331	167,48	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,1932	-104,16	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,1610	-106,47	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,1492	-105,50	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,1061	-149,87	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,09047	-155,42	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,08234	-155,31	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,03843	149,04	UHESAMUE-4GR# 6891	* ENORTE (AC/RO) *
0,02000	-138,31	S.A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01914	-37,683	T.PRETO-1CS# 50	* FURNAS *
0,01855	-54,537	IBIUNA--4CS# 48	* FURNAS *
0,01384	145,98	LIMOEIRO-1GR# 523	* AES TIETE *
0,01384	155,41	S.A-LEUH-2GR# 6888	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01190	-174,37	E.CUNHA-2GR# 522	* AES TIETE *
0,01115	-52,276	CANDAS-1-2GR# 508	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA
0,01023	24,933	ELDORUTE-4GR# 9561 3	* GERAÇÃO DISTRIBUIDA MS *
0,01021	-169,24	JAGUARI-1GR# 525	***** C E S P *****
0,00930	-62,028	CANDAS-2-2GR# 509	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA
0,00925	-45,270	LDCBRILH-2GR# 1888 1	* GERAÇÃO DISTRIBUIDA MS *
0,00894	18,338	ELDORUTE-4GR# 9561 2	* GERAÇÃO DISTRIBUIDA MS *
0,00873	18,415	ELDORUTE-4GR# 9561 1	* GERAÇÃO DISTRIBUIDA MS *
0,00852	-43,755	LDCBRILH-2GR# 1888 2	* GERAÇÃO DISTRIBUIDA MS *
0,00836	-134,72	EMBU-GUA-1CS# 532	ISA CTEEP
0,00815	-4,9074	OURINHOS-2GR# 2031	* DEMAIS AGENTES SP *
0,00701	-104,11	Maua----3GR# 983	* DEMAIS AGENTES PR *
0,00676	158,31	B.BONITA-4GR# 516	* AES TIETE *
0,00667	-159,10	MESQUITA-1CS# 346	* CEMIG GT *
0,00662	146,29	UHEROND2-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,00657	156,05	ITUMBIAI-3GR# 18	* FURNAS *
0,00632	87,043	VITORIA2-1CS# 41	* FURNAS *
0,00622	155,31	C.GRANDE-4GR# 512	CTG RIO PARANAPANEMA ENERGIA

◀ ▶ | WWW | -2,4295 | +j14,23 /

Figura 4.19: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -2,429+j14,23$

Module	Phase	Bus Name	Área
1,0000	0	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,3696	-178,01	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,1752	-54,483	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,1600	-170,00	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,07365	129,60	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,02992	136,88	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01525	-8,1687	JIRAU-MD24GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,01394	4,6542	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *

◀ ▶ | WWW | -4,8449 | +j19,198 /

Figura 4.20: Caso 1 – Lista decrescente da amplitude do Mode-Shape de velocidade para o modo $\lambda = -4,844+j19,198$

Analisando os *mode-shapes* de velocidade nota-se que para os modos inter-áreas as máquinas da UHE Santo Antônio ME e MD tem uma maior atividade quando esse modo é excitado. Nota-se um defasamento angular entre as UHEs mais ativas, o que indica que as máquinas oscilam com uma defasagem uma das outras na presença desse modo. Esse comportamento influencia a oscilação do desvio do ângulo do rotor. A UHE Santo Antônio ME e MD oscilam com fases diferentes a UHE Jirau no domínio do tempo. Para o modo de 2,26 Hz as máquinas de Santo Antônio ME e MD oscilam em conjunto em oposição às máquinas de Jirau. Já para o modo de 3 Hz as máquinas de Santo Antônio ME e MD oscilam entre si e também contra a UHE Jirau. A influência desse modo de controle pode ser visto ao se analisar a resposta do desvio de potência ativa da UHE Jirau MD e ME e Santo Antônio ME.

4.5.3 Caso 2

Nesse caso a operação é feita de forma síncrona, com o TF 13 ligado, e os controladores das máquinas desligados. É aplicada uma rejeição de carga de 10 MW no instante 0,2 s na UHE Jirau.

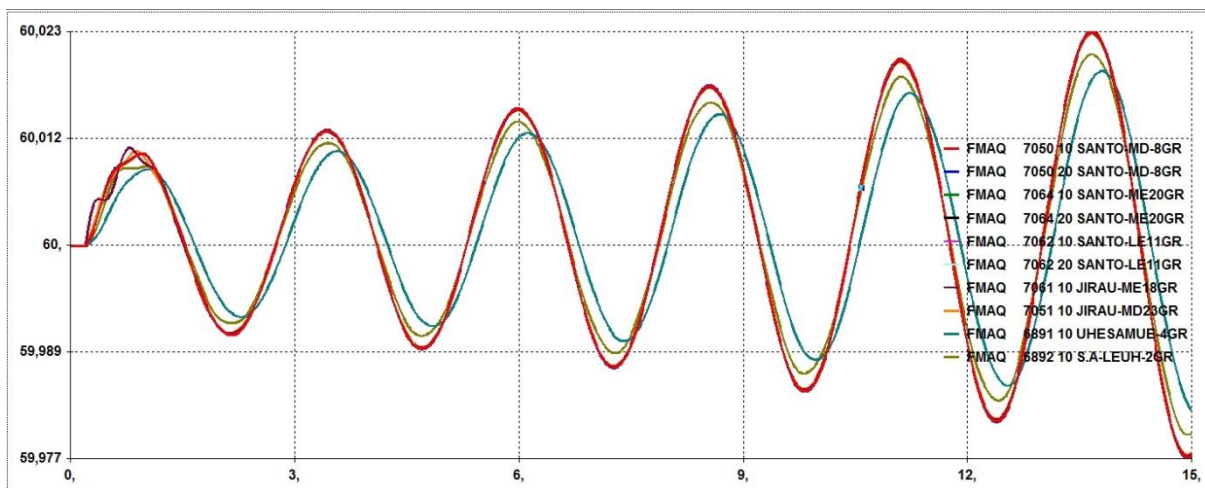


Figura 4.21: Caso 2 - Frequência das UHEs

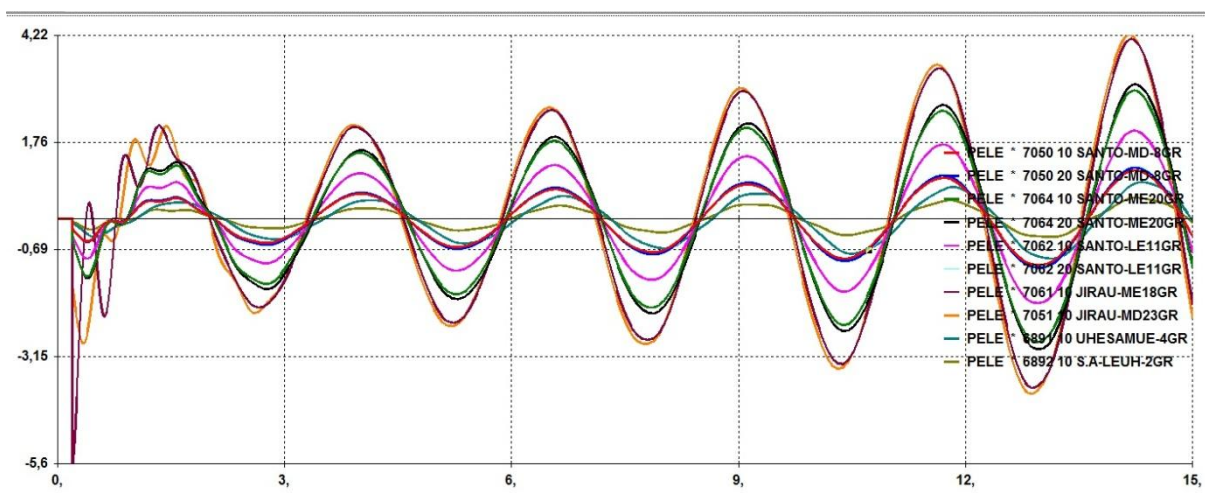


Figura 4.22: Caso 2 – Desvio na Potência Ativa das UHEs

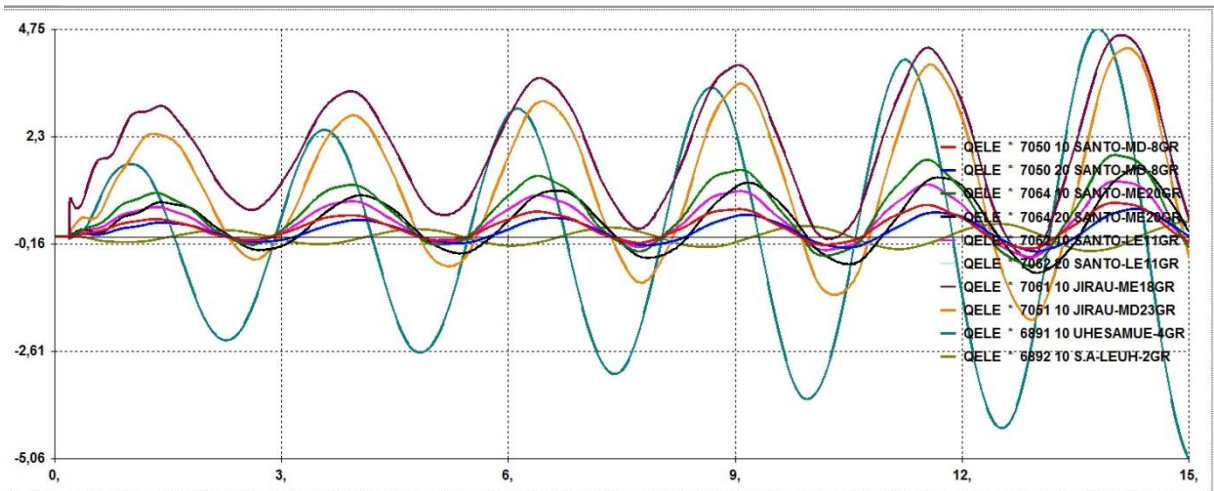


Figura 4.23: Caso 2 – Desvio na Potência Reativa das UHEs

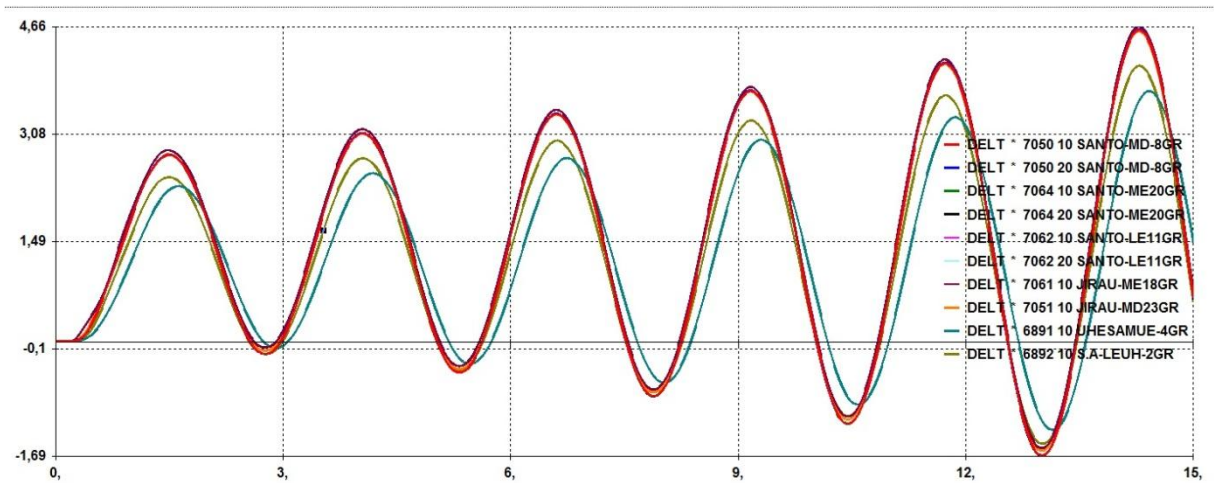


Figura 4.24: Caso 2 – Desvio no ângulo do rotor das UHEs

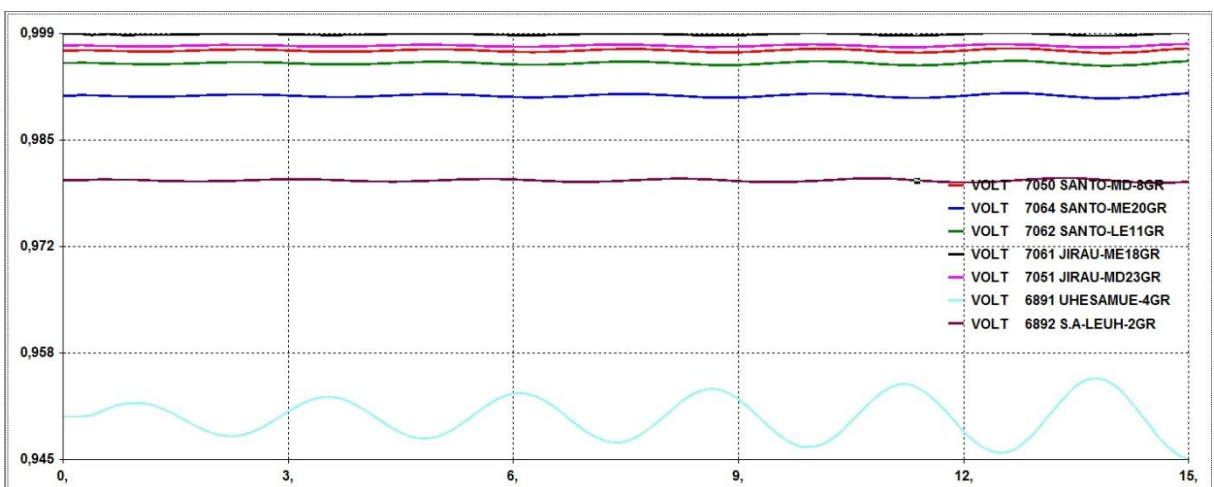


Figura 4.25: Caso 2 – Tensão terminal das UHEs

A conexão do barramento 500 kV da Coletora Porto Velho de forma síncrona com o SIN fez com que as máquinas que se conectam a esse barramento interagissem com o modo inter-área e dessa forma elas experimentaram oscilações. Uma vez que para esse caso foram desativados os ESPs das UHEs de interesse, essas oscilações não puderam ser amortecidas. Avaliando-se as figuras 4.19 a 4.23 observa-se que as variáveis plotadas tiveram comportamento oscilatório não amortecido. Das oscilações, nota-se que a frequência dessas oscilações é lenta e ocorrem com pouca defasagem angular. As oscilações também têm caráter evolutivo, começam com baixa amplitude e ao longo do tempo aumentam. Oscilações com esse comportamento indicam falta de torque de amortecimento [6].

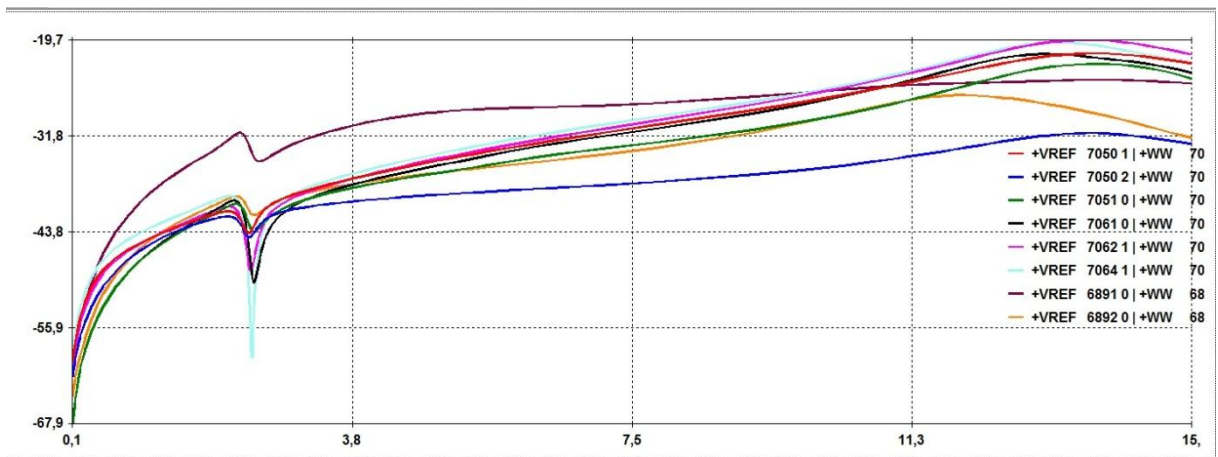


Figura 4.26: Caso 2 – Ganho das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs

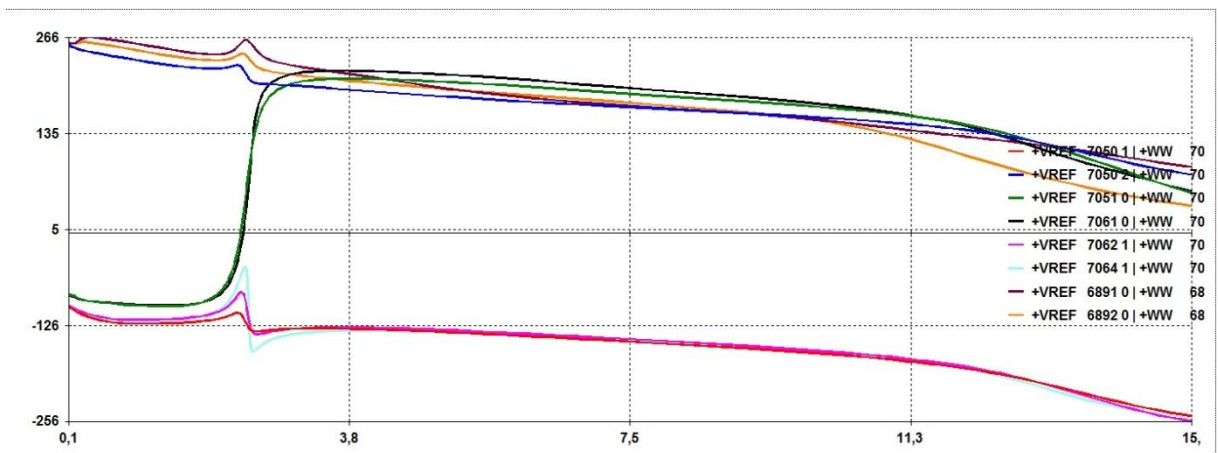


Figura 4.27: Caso 2 - Fase das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs

A partir da resposta em frequência plotadas verifica-se que na frequência em torno de 2,35 rad/s existe um ponto de ressonância para as funções de transferência, esse comportamento é visto para todas as UHEs e, em especial, na UHE Samuel o ganho é maior do que para as outras máquinas. Esse fato indica que existe um modo próximo à frequência 2,35 rad/s (0,38 Hz aproximadamente). Dessa forma, a variação de velocidade angular dessas máquinas serão afetadas por esse modo. O modo em questão ainda provoca uma variação significativa na fase das UHEs Jirau MD e Jirau ME. Na resposta em frequência não se identifica outro modo não amortecido além do inter-área, uma vez que não se vê outro ponto de ressonância no gráfico.

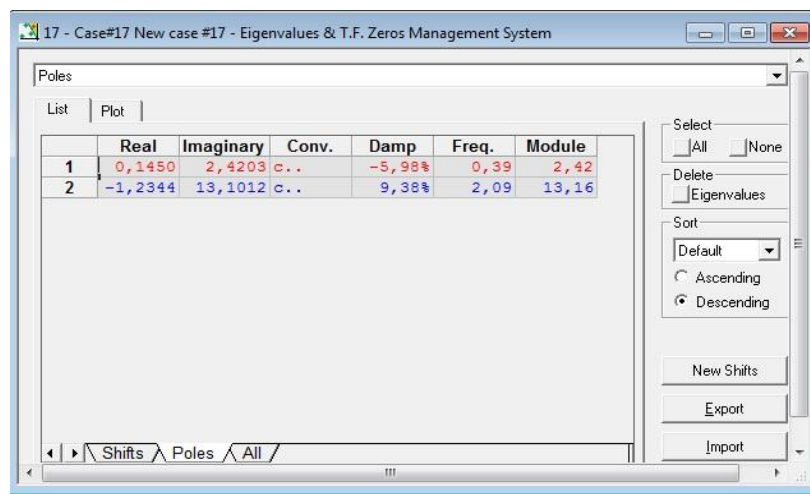


Figura 4.28: Caso 2 – Modo local e Modo de controle

Dos autovalores do sistema calculados, destacam-se os modos menos amortecidos relacionados ao sistema Acre-Rondônia que são: um modo inter-área não amortecido e um modo de controle amortecido. Os outros modos calculados tinham amortecimento superior a 30% não sendo considerados para a análise. Observa-se que o amortecimento de -5,98% faz com que ele seja o modo dominante do sistema. Assim sendo, a dinâmica do sistema Acre-Rondônia é ditada por esse modo. Para o modo de 2,09 Hz, destaca-se que ele perdeu amortecimento em relação ao caso 1, a partir de quando se fez a operação síncrona com os ESPs desligados.

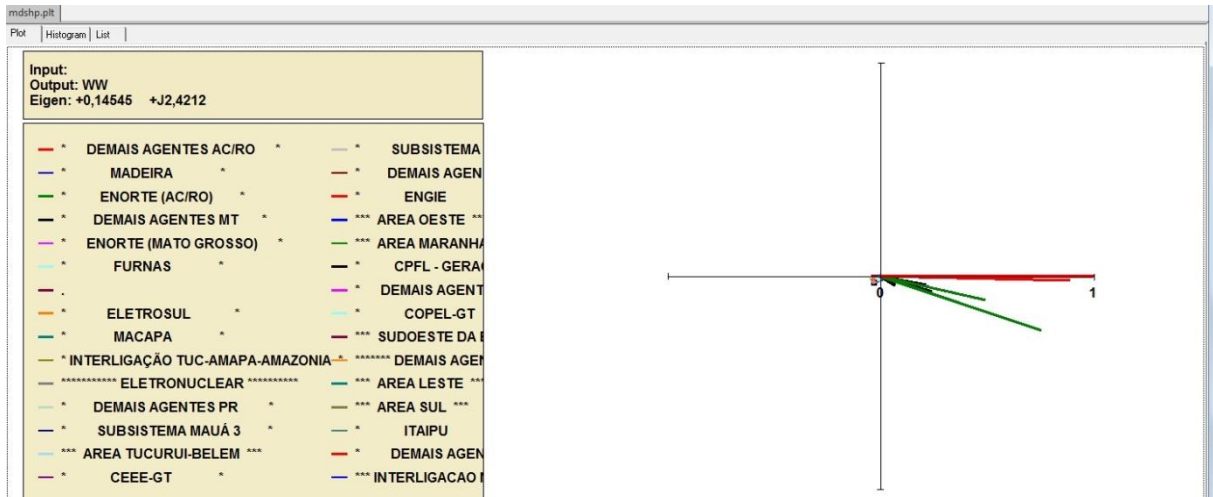


Figura 4.29: Caso 2 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = +0,145+j2,42$

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0,	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9991	-0,08340	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9990	-0,1488	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9980	-0,09727	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9976	-0,1442	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9970	-0,2482	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9902	0,07491	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,9850	0,2106	JIRAU-MD23GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8914	-1,2739	S.A-LEUH-2GR# 6888	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8868	-1,3311	S.A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7943	-18,685	UHEROND-4GR# 6891	* ENORTE (AC/RO) *
0,4984	-12,684	UHEROND2-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,2505	-16,183	JAURU---2GR# 4809	* DEMAIS AGENTES MT *
0,2299	-12,010	DARDANE1-4GR# 4890	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,2271	-13,149	DARDANE2-1GR# 4891	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,2183	-10,086	JUBA-2---3GR# 4831	* DEMAIS AGENTES MT *
0,2059	-15,841	GUAPORE--2GR# 4804	* DEMAIS AGENTES MT *
0,1801	-11,679	JUBA-1---3GR# 4846	* DEMAIS AGENTES MT *
0,1328	-12,182	MANSO---2GR# 21	* FURNAS *
0,08764	-11,919	P.PEDRA--3GR# 4520	* DEMAIS AGENTES MT *
0,08089	-32,738	ITIQ-M2--2GR# 4525	* DEMAIS AGENTES MT *
0,07861	-28,541	ITIQ-M1--2GR# 4523	* DEMAIS AGENTES MT *
0,05554	-33,501	SMANOEL--3GR# 4489	* DEMAIS AGENTES MT *
0,05227	-36,198	TELESPIR-5GR# 4492	* DEMAIS AGENTES MT *
0,04743	-163,78	PSJoao--2GR# 9218	* ELETROSUL *
0,04695	-141,83	C.NUNES2-1GR# 8225	* MACAPA *
0,04676	-145,84	F.GOMES -2GR# 8279	* INTERLIGAÇÃO TUC-AMAPA-AMA...
0,04674	-142,77	SANTJARI-2GR# 8269	* INTERLIGAÇÃO TUC-AMAPA-AMA...
0,04661	-143,08	C.NUNES1-2GR# 8224	* MACAPA *
0,04638	-141,57	BMONTECS-1CS# 6728	* INTERLIGAÇÃO TUC-AMAPA-AMA...
0,04629	-147,78	ANGRA-2-1GR# 11	***** ELETRONUCLEAR *****
0,04628	-147,88	ANGRA-2-2GR# 11	* INTERLIGAÇÃO TUC-AMAPA-AMA...

Figura 4.30: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = +0,145+j2,42$

Pelo *Mode Shape* de velocidade para o modo instável de 0,39 Hz nota-se que as maiores atividades são para as usinas do sistema Acre-Rondônia. Destaca-se a pouca defasagem angular entre os mode shapes dessas usinas o que indica oscilações com pequena defasagem, como se mostrou nas simulações no domínio do tempo.

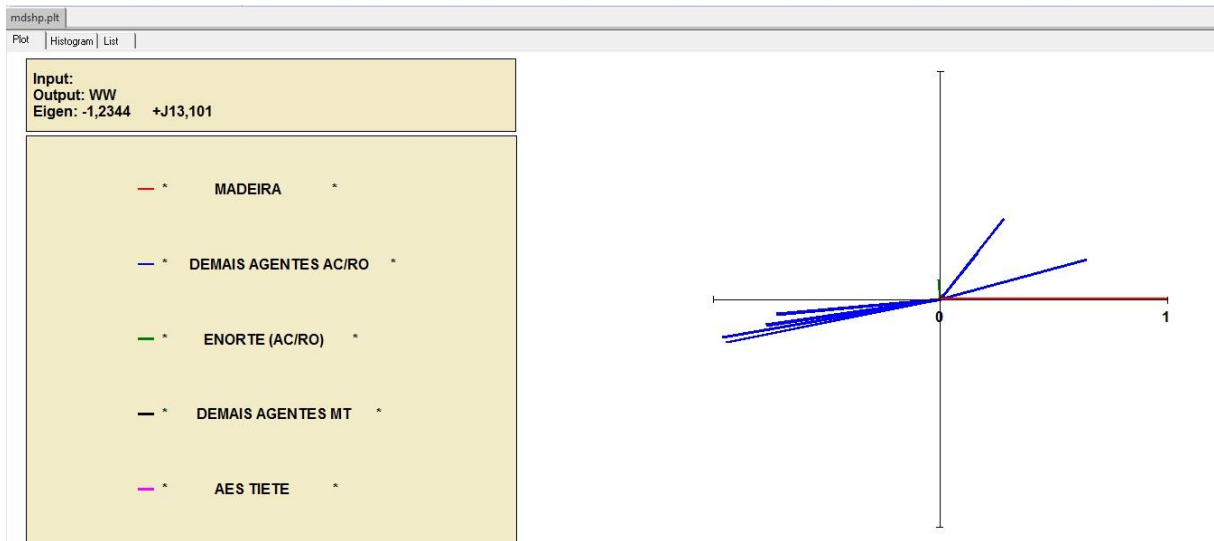


Figura 4.31: Caso 2 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = -1,234+j13,101$

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,9720	189,82	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9601	191,32	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7751	188,05	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7720	188,70	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7221	185,40	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7216	185,11	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,6713	15,084	JIRAU-MD23GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,4541	51,794	S-A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,2612	50,753	S-A-LEUH-2GR# 6898	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,08558	94,128	UHESAMUE-4GR# 6891	* ENORTE (AC/RO) *
0,02051	62,671	UHEROND2-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,01365	40,587	GUAFOPRE-2GR# 4804	* DEMAIS AGENTES MT *
0,01007	89,548	LIMOEIRO-1GR# 523	* AES TIETE *
0,00558	141,58	E.CUNHA-2GR# 522	* AES TIETE *

Figura 4.32: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = -1,234+j13,101$

Para o modo de 2 Hz, verifica através do *mode-shape* de velocidade que na presença desse modo as usinas de Santo Antônio 500 kV oscilam todas praticamente juntas em fase oposta as máquinas de Jirau ME e MD.

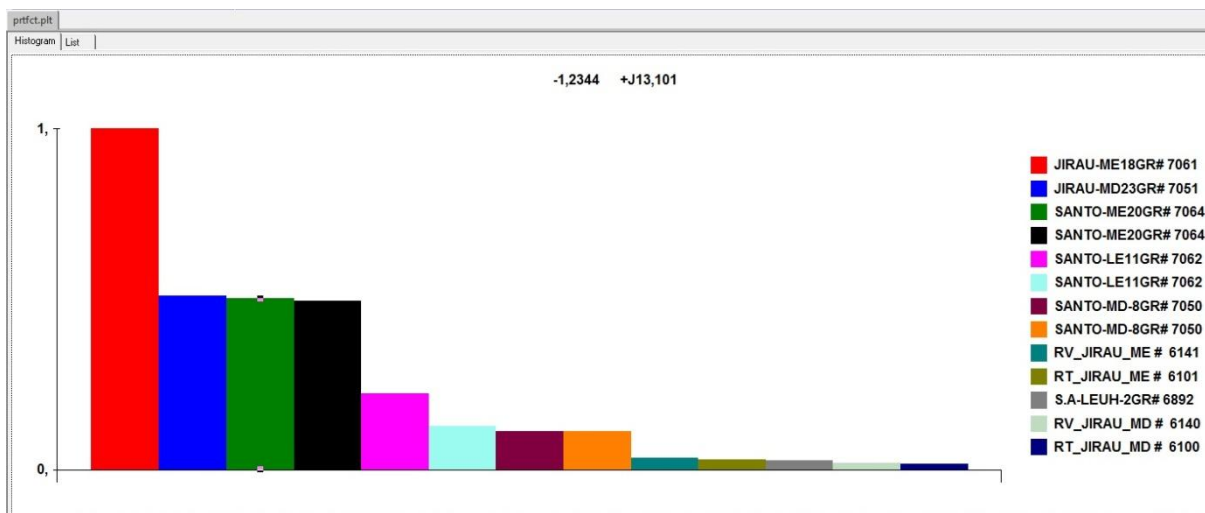


Figura 4.33: Caso 2 – Histograma do Fator de Participação do modo 2 Hz

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	0,	JIRAU-ME18GR# 7061	WW
0,9855	-2,1388	JIRAU-ME18GR# 7061	DELT
0,5086	33,016	JIRAU-MD23GR# 7051	WW
0,5012	20,998	SANTO-ME20GR# 7064 2	DELT
0,5002	30,536	JIRAU-MD23GR# 7051	DELT
0,4945	19,352	SANTO-ME20GR# 7064 1	DELT
0,4928	22,046	SANTO-ME20GR# 7064 2	WW
0,4854	20,156	SANTO-ME20GR# 7064 1	WW
0,2226	13,925	SANTO-LE11GR# 7062 1	DELT
0,2188	14,667	SANTO-LE11GR# 7062 1	WW
0,1789	165,65	JIRAU-ME18GR# 7061	ED"
0,1273	15,418	SANTO-LE11GR# 7062 2	DELT
0,1254	16,345	SANTO-LE11GR# 7062 2	WW
0,1127	5,2904	SANTO-MD-8GR# 7050 1	DELT
0,1125	6,5951	SANTO-MD-8GR# 7050 2	DELT
0,1111	5,9229	SANTO-MD-8GR# 7050 1	WW
0,1110	7,4456	SANTO-MD-8GR# 7050 2	WW
0,09732	-174,10	SANTO-ME20GR# 7064 1	ED"
0,09660	-169,64	SANTO-ME20GR# 7064 2	ED"
0,09175	-73,083	JIRAU-ME18GR# 7061	EQ'
0,06580	-162,39	JIRAU-MD23GR# 7051	ED"
0,05028	-70,529	JIRAU-MD23GR# 7051	EQ'
0,04640	-179,53	SANTO-LE11GR# 7062 1	ED"
0,03729	-47,176	JIRAU-ME18GR# 7061	EQ"
0,03323	106,70	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0003
0,02916	-17,485	JIRAU-MD23GR# 7051	EQ"
0,02825	17,179	RT_JIRAU_ME # 6101	x 1060
0,02777	50,628	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0033
0,02729	67,931	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0031
0,02616	-175,72	SANTO-LE11GR# 7062 2	ED"
0,02552	93,819	S.A-LEUH-2GR# 6892	DELT
0,02552	93,819	S.A-LEUH-2GR# 6892	DELT

Figura 4.34: Caso 2 – Lista do Fator de Participação do modo 2 Hz

Como foi abordado nos fundamentos teóricos, o fator de participação de um modo pondera fatores de controlabilidade com observabilidade, isto é, combinação da atividade de uma variável de estado com o peso que essa tem em um dado modo. Para o modo de 2 Hz, as variáveis de estado que mais participam são WW e DELT das UHEs Jirau ME e MD, assim como Santo Antônio ME.

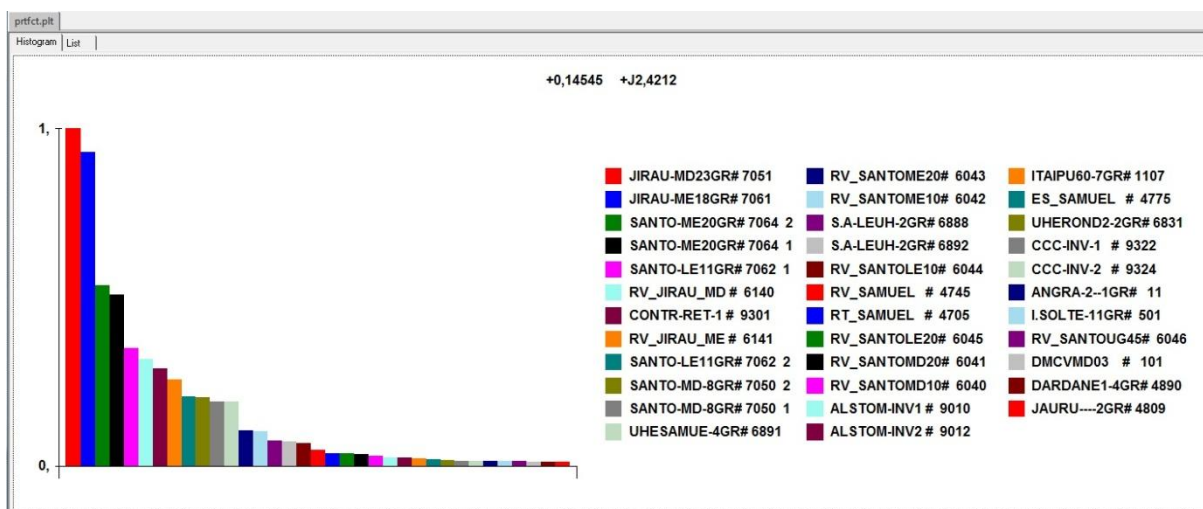


Figura 4.35: Caso 2 – Histograma do Fator de Participação do modo 0,39 Hz

prtfct.plt

Histogram List

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	0	JIRAU-MD23GR# 7051	WW
0,9301	-0,2658	JIRAU-ME18GR# 7061	WW
0,7106	19,272	JIRAU-MD23GR# 7051	DELT
0,6943	15,858	JIRAU-ME18GR# 7061	DELT
0,5355	9,1198	SANTO-ME20GR# 7064 2	DELT
0,5061	10,749	SANTO-ME20GR# 7064 1	DELT
0,4813	-4,7296	SANTO-ME20GR# 7064 2	WW
0,4598	-6,7850	SANTO-ME20GR# 7064 1	WW
0,3475	10,215	SANTO-LE11GR# 7062 1	DELT
0,3227	-6,4235	SANTO-LE11GR# 7062 1	WW
0,3159	153,00	RV_JIRAU_MD # 6140	x 0004
0,2886	-105,32	CONTR-RET-1 # 9301	x 0000
0,2549	151,96	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0004
0,2152	60,462	RV_JIRAU_MD # 6140	x 0157
0,2060	8,2040	SANTO-LE11GR# 7062 2	DELT
0,2019	7,9923	SANTO-MD-8GR# 7050 2	DELT
0,1914	-4,0862	SANTO-LE11GR# 7062 2	WW
0,1912	-3,7843	SANTO-MD-8GR# 7050 2	WW
0,1906	8,3548	SANTO-MD-8GR# 7050 1	DELT
0,1900	-12,021	UHESAMUE-4GR# 6891	WW
0,1837	-4,7466	SANTO-MD-8GR# 7050 1	WW
0,1667	58,115	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0157
0,1494	-43,885	UHESAMUE-4GR# 6891	DELT
0,1036	102,69	RV_SANTOME20# 6043	x 0007
0,1010	-81,845	RV_SANTOME10# 6042	x 0325
0,09400	37,679	RV_JIRAU_MD # 6140	x 0003
0,09107	-98,411	RV_SANTOME20# 6043	x 0026
0,07586	36,643	RV_JIRAU_ME # 6141	x 0003
0,07533	-28,920	RV_SANTOME20# 6043	x 0050
0,07499	60,377	RV_JIRAU_MD # 6140	x 0033
0,07372	9,0620	S.A-LEUH-2GR# 6888	DELT
0,07291	-3,2222	S.A-LEUH-2GR# 6892	DELT

◀ | ▶ | +0,14545 +J2,4212 /

Figura 4.36: Caso 2 – Lista de mode shapes de velocidade para o modo 0,39 Hz

Para o modo instável 0,39 Hz as variáveis de estado que mais participam desse modo também são WW e DELT das UHes Jirau ME e MD e Santo Antônio ME. Destaca-se na lista a presença da participação dos reguladores de velocidade de Jirau oscilando em oposição de fase a WW da mesma usina. Nota-se que o bipolo na conexão síncrona também participa do modo instável por meio do controlador do retificador do polo 1, conforme mostra a lista.

4.5.3 Caso 3

Nesse caso a operação é feita de forma síncrona, com o TF 13 ligado, e os controladores das máquinas ligados. É aplicada uma rejeição de carga de 10 MW no instante 0,2 s na UHE Jirau.

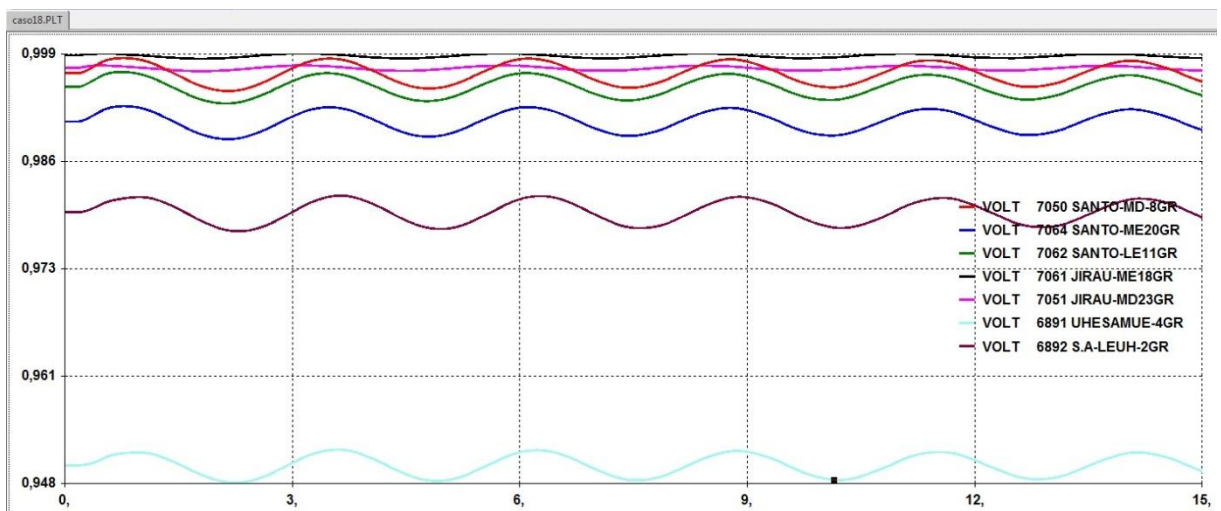


Figura 4.37: Caso 3 – Tensão terminal das UHEs

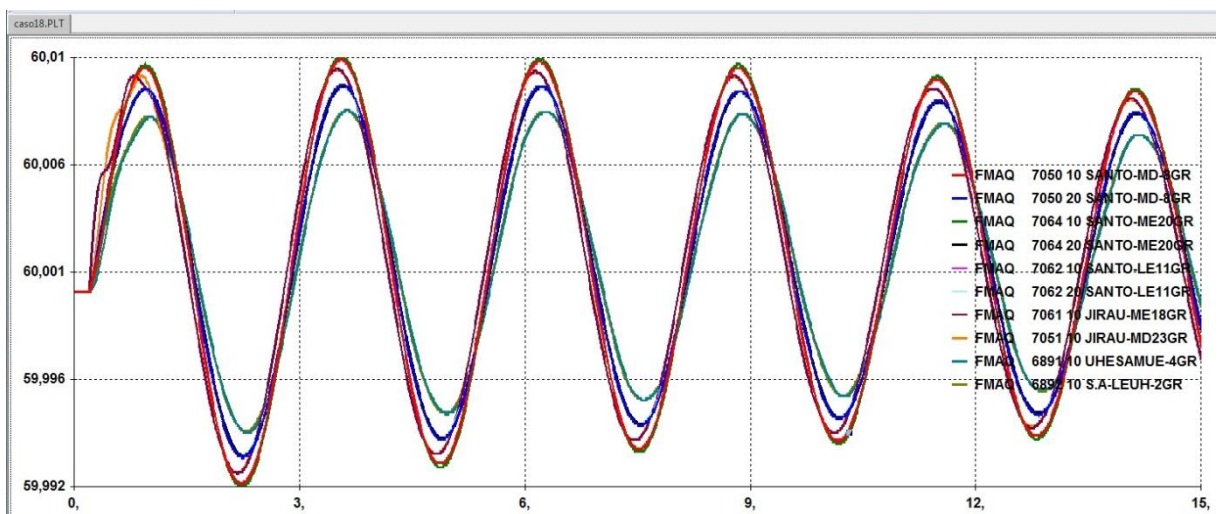


Figura 4.38: Caso 3 – Frequência das UHEs

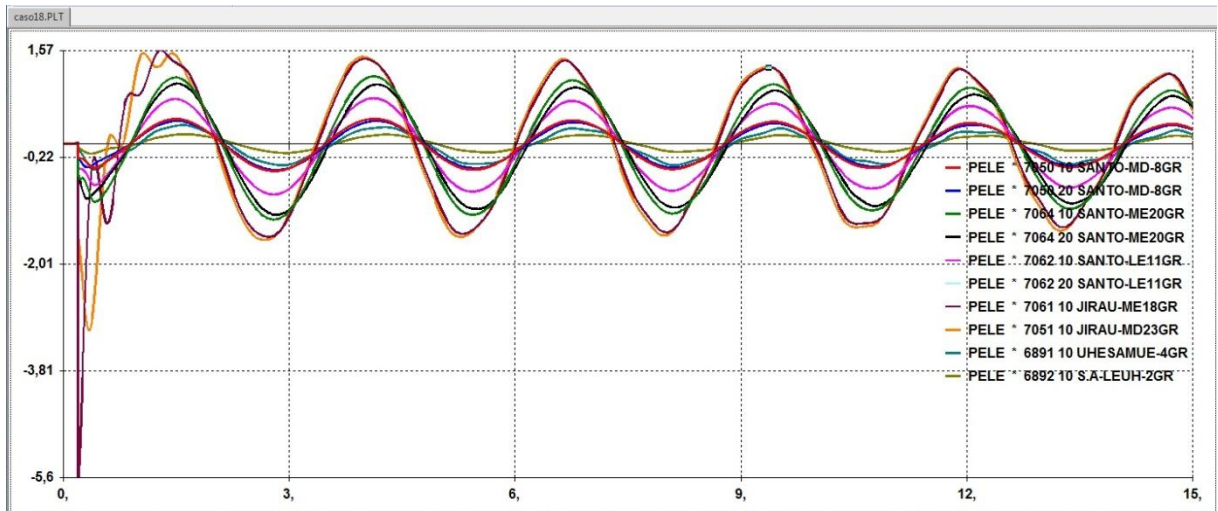


Figura 4.39: Caso 3 – Desvio na Potência Ativa das UHEs

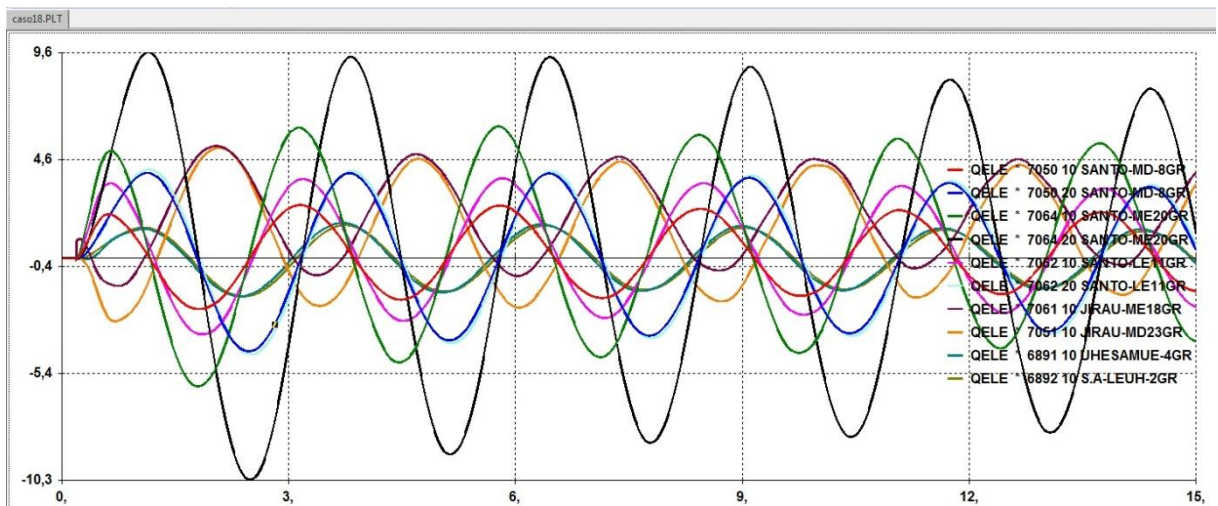


Figura 4.40: Caso 3 – Desvio na Potência Reativa das UHEs

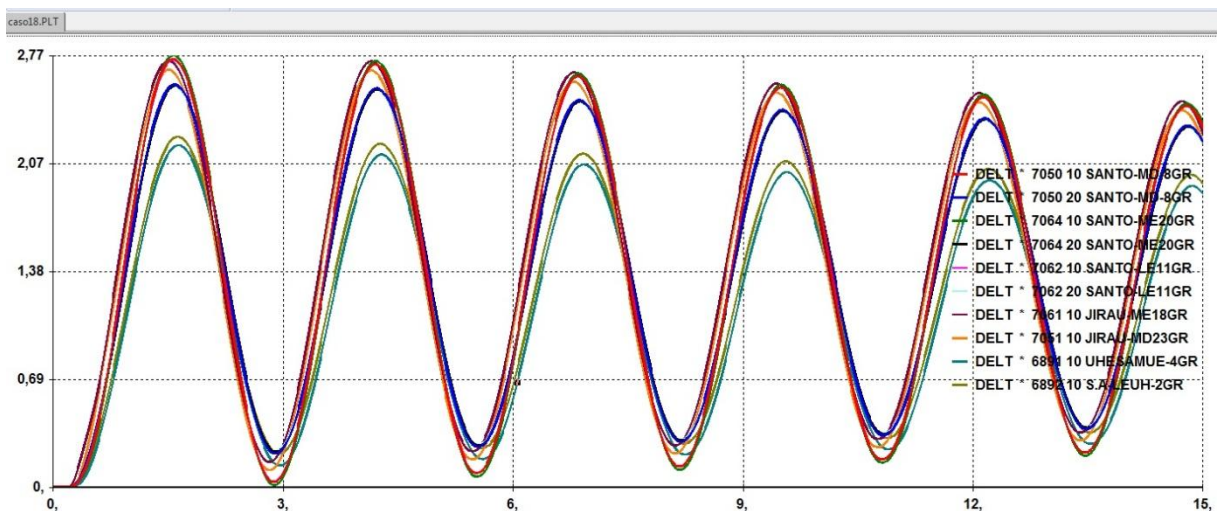


Figura 4.41: Caso 3 – Desvio no ângulo do rotor das UHEs

Para o caso em que se tem a conexão síncrona das máquinas do barramento de 500 kV da SE Coletora Porto Velho com o SIN, na presença dos ESPs das UHEs estudadas, notou-se uma redução nas oscilações para as grandezas verificadas. Observa-se que as amplitudes das oscilações diminuíram e o amortecimento aumentou em relação ao caso 2. Entretanto, ainda se constata a presença do modo local ditando a dinâmica do sistema, ainda falta amortecimento para que esse deixe de ser um modo dominante.

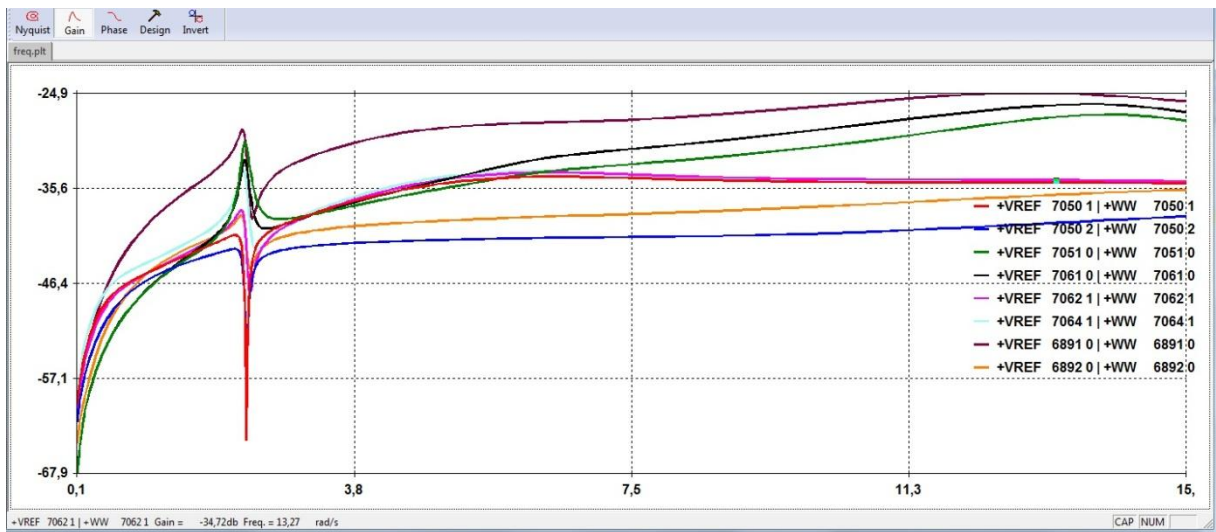


Figura 4.42: Caso 3 – Ganho das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs

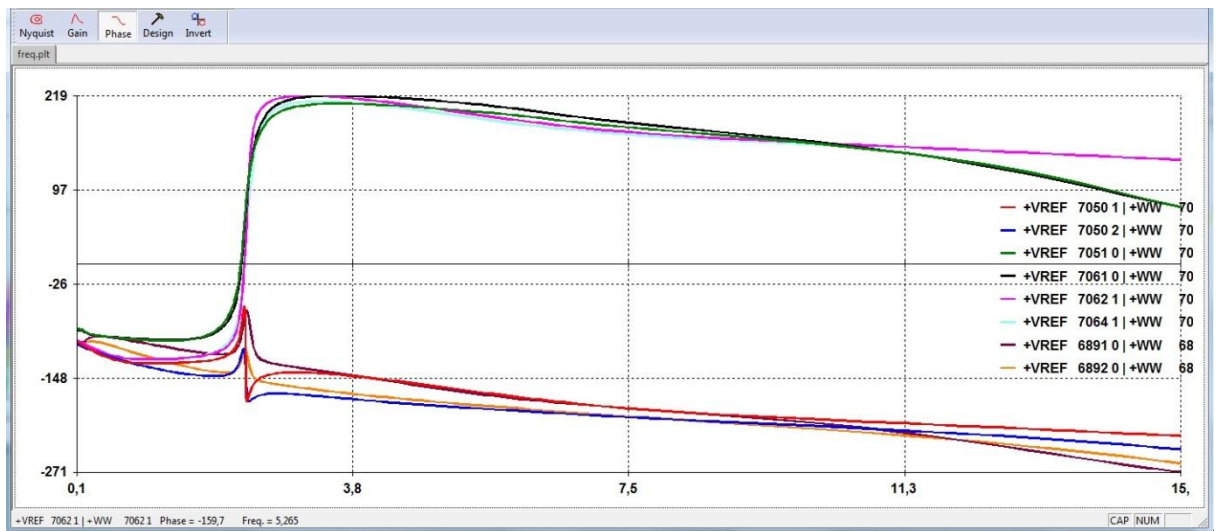


Figura 4.43: Caso 3 – Fase das funções transferência WW/VREF em frequência para as UHEs

Com a presença dos controladores os ganhos em frequência das funções de transferência WW/VREF diminuíram em relação ao caso 2. O modo dominante ainda é

possível ser visto no ponto de ressonância próximo a 2,38 rads (0,38 Hz aproximadamente). Em relação ao caso anterior, as fases de WW/VREF para UHEs Samuel e Santo Antônio LE diminuiram.

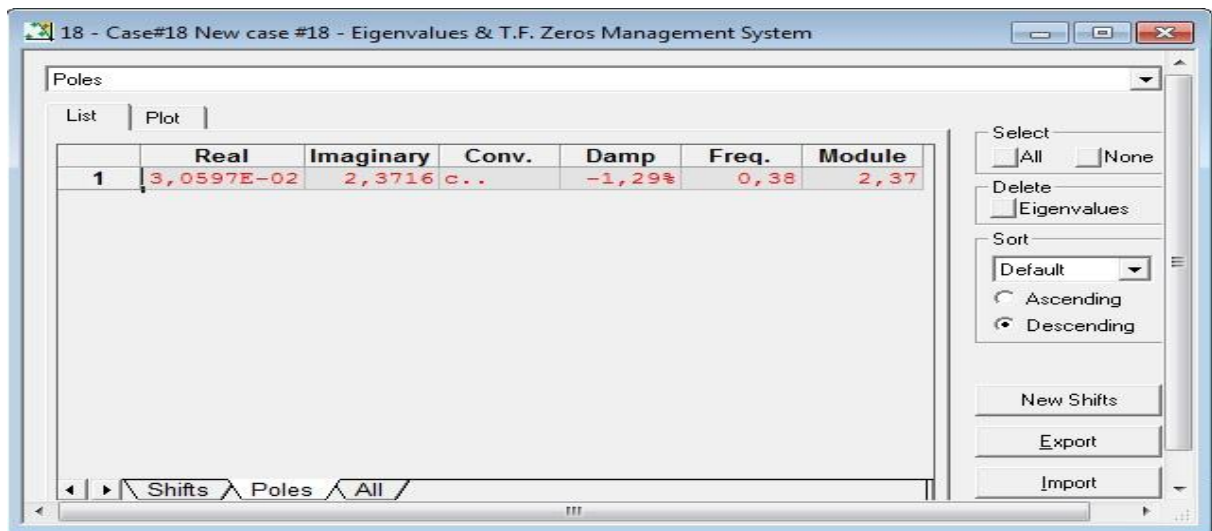


Figura 4.44: Caso 3 – Modo dominante 0,38 Hz

O modo dominante continua sendo o modo 0,38 Hz, mas já é possível ver que os sinais estabilizadores aumentaram o seu amortecimento. O valor de -1,29% ainda não é o desejável, pode levar máquinas a perda de estabilidade. Apesar de ter contribuído, a inércia do sistema Acre-Rondônia ainda é baixa comparada à do SIN, sendo a conexão síncrona uma condição severa para esse sistema.

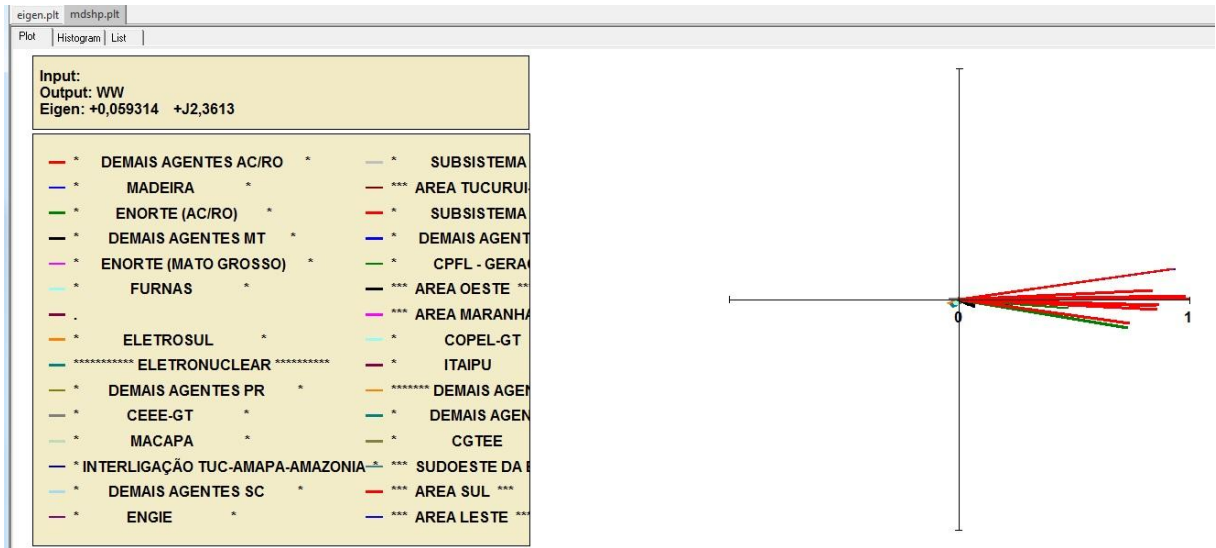


Figura 4.45: Caso 3 – Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = 0,059+j2,3613$

Module	Phase	Bus Name	Area
1,0000	0,	SANTO-ME20GR# 7064 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9854	0,9214	SANTO-MD-8GR# 7050 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9849	0,8086	SANTO-LE11GR# 7062 1	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,9445	8,1371	JIRAU-ME18GR# 7061	* MADEIRA *
0,9416	8,1585	JIRAU-MD23GR# 7051	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8697	-1,5469	SANTO-MD-8GR# 7050 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8626	-2,9032	SANTO-ME20GR# 7064 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8605	-1,9279	SANTO-LE11GR# 7062 2	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,8444	2,7142	S.A-LEUH-2GR# 6888	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,7440	-9,3944	UHE SAMUE-4GR# 6891	* ENORTE (AC/RO) *
0,7426	-7,8356	S.A-LEUH-2GR# 6892	* DEMAIS AGENTES AC/RO *
0,4732	-4,4535	UHEROND-2GR# 6831	* ENORTE (AC/RO) *
0,2359	-6,5746	JAURO-2GR# 4809	* DEMAIS AGENTES MT *
0,2142	-2,3477	DARDANE1-4GR# 4890	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,2118	-3,6216	DARDANE2-1GR# 4891	* ENORTE (MATO GROSSO) *
0,2024	-1,6436	JUBA-2-3GR# 4831	* DEMAIS AGENTES MT *
0,1926	-7,7599	GUAPORE-2GR# 4804	* DEMAIS AGENTES MT *
0,1665	-3,0756	JUBA-1-3GR# 4846	* DEMAIS AGENTES MT *
0,1225	-3,6056	MANSO-2GR# 21	* FURNAS *
0,07951	-2,2641	P.PEDRA-3GR# 4520	* DEMAIS AGENTES MT *
0,07471	-24,475	ITIQ-M2-2GR# 4525	* DEMAIS AGENTES MT *
0,07227	-20,418	ITIQ-M1-2GR# 4523	* DEMAIS AGENTES MT *
0,04914	-23,332	SMAOUEL-3GR# 4489	
0,04629	-26,274	TELESPIR-5GR# 4492	* DEMAIS AGENTES MT *
0,04586	200,21	PSJoao-2GR# 9218	* ELETROSUL *
0,04410	216,98	ANGRA-2-1GR# 11	***** ELETRONUCLEAR *****
0,04403	202,43	Fundao-2GR# 2475	* DEMAIS AGENTES PR *
0,04402	202,66	StaClara-2GR# 806	* DEMAIS AGENTES PR *
0,04262	174,27	Jacui-6GR# 1162	* CEEE-GT *
0,04186	203,69	Itauba-4GR# 1155	* CEEE-GT *
0,04180	227,99	C.NUNES2-1GR# 8225	* MACAPA *
0,04172	224,05	C.COMEC-2GR# 8226	* INTERLIGAÇÃO TUC-AMAPA-AMA

WWW | +0,059314 +j2,3613 /

DEMAIS AGENTES AC/RO * S.A-LEUH-2GR# 6888 Module = 0,844400 Phase = 2,71

Figura 4.46: Caso 3 - Lista com Mode shapes de velocidade para o modo $\lambda = 0,059+j2,3613$

Avaliando-se o *mode shape* de velocidade para o modo dominante, constata-se que houve um aumento na fase dos *mode shapes* diminuindo a defasagem angular. Ao alinhá-los mais próximos do *mode shape* da UHE Santo Antônio ME, a defasagem angular nas oscilações do desvio de velocidade são menores.

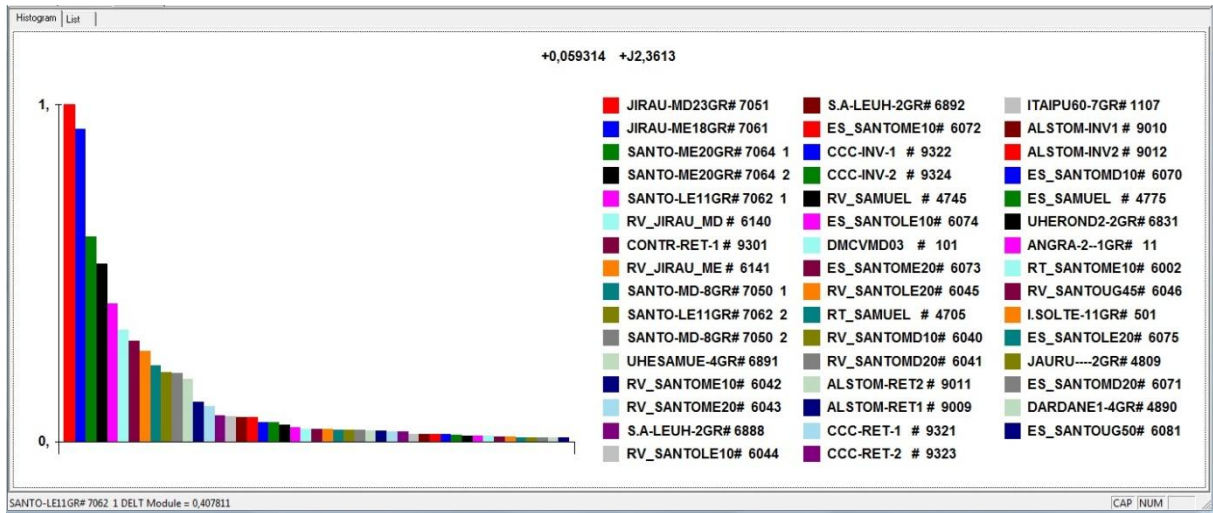


Figura 4.47: Caso 3 – Histograma do Fator de Participação para o modo $\lambda = 0,059+j2,3613$

O modo ainda continua tendo como participações preponderantes as UHEs Jirau MD e ME, Santo Antônio ME e Santo Antônio LE. Os ESPs não alteraram significativamente os fatores de participação, mas aumentaram o seu amortecimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o atual panorama do sistema interligado nacional, com sua complexidade no contexto da estabilidade em sistemas de potência. Introduziu-se os fundamentos básicos sobre o estudo da estabilidade de sistemas de potência a pequenas perturbações. Foi mostrada a formulação do problema via espaço de estados. Utilizando-se de técnicas de análise modal, pode-se conceituar elementos importantes para análise linear do sistema dinâmico como: Modos de oscilação, *Mode Shapes*, *Resíduos* e Fatores de participação.

Como forma de introduzir a utilização em conjunto dos programas ANATEM e PacDyn para o estudo de estabilidade de pequenos sinais, criou-se um sistema teste com um gerador com um regulador de tensão rápido conectado a uma barra infinita por meio de uma reatância. Com intuito de apresentar as ferramentas, suas funcionalidades e aplicar os conceitos vistos sobre estabilidade dinâmica, realizou-se simulações no domínio não-linear, através do ANATEM, e no regime linear com o PacDyn. O procedimento de análise da rede teste foi o mesmo utilizado, posteriormente, para a análise de um sistema de grande porte.

Em seguida, para aplicação do estudo da estabilidade de pequenas perturbações em um sistema de grande porte, utilizou-se a rede da área elétrica Acre/Rondônia pertencente ao SIN. O caso estudado é um problema real de oscilação nessa rede, onde as unidades geradoras que se conectam a SE Coletora Porto Velho experimentam oscilações em caso de operação dessa subestação de forma síncrona com o SIN. Esta conexão é feita através do transformador 13 que é utilizado para energizar o transformador conversor do bipolo 2. O problema estudado foi dividido em três casos, de forma a analisar o desempenho dinâmico da rede para condição em regime normal (operação assíncrona), operação síncrona sem os estabilizadores das UHEs e operação síncrona com os estabilizadores ligados. A avaliação do desempenho dinâmico foi feita através de simulações no domínio não linear e no regime linear, este último considerando apenas pequenas perturbações.

Por meio desse estudo, pode-se consolidar os conceitos a respeito de estabilidade a pequenas perturbações aplicado a sistemas de grande porte. Pode-se avaliar problemas reais de estabilidade dinâmica através de simulações computacionais utilizando em conjunto os

aplicativos ANATEM e PacDyn, tendo como base os conceitos de análise modal aplicado a estabilidade em sistemas elétricos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se uma avaliação do impacto de sistemas de controle em equipamentos FACTS sob o ponto de vista de estabilidade a pequenas perturbações. Dessa forma, identifica-se a influência desses nos modos de oscilação do sistema, bem como as suas contribuições como fonte de amortecimento de oscilações eletromecânicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KUNDUR, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: Dover Publications.

[2] MOTA, W. S. (2006). *Simulação de Transitórios Eletromecânicos*. Campina Grande: EPGRAF.

[3] OGATA, K. (2010). *Engenharia de Sistemas de Controle 5ed*. São Paulo: PEARSON PRENTICE HALL.

[4] CEPEL. *Curso PacDynBR*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[5] ONS (2018). *Instrução de Operação IO.ON.5MD Revisão 46*.

[6] ONS (2018). *Dinâmica de Sistemas de Potência: Engenharia de Sala de Controle e Análise*. Rio de Janeiro.

[7] NOHARA, ALEXANDRE AKIO (2015). *Influência da Modulação de Potência de Elos de Transmissão em Corrente Contínua na Estabilidade de Frequência e no Amortecimento de Modos Interárea*. Rio de Janeiro.

[8] ONS (2018). *Procedimentos de rede - Submódulo 21.33*.

[9] CEPEL. *Manual Antem 11.2*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[10] CEPEL. *Manual PacDyn 9.92*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[11] CEPEL. *Curso Anatem*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[12] CEPEL. *Manual Anarede 10.2.3*. Rio de Janeiro: Eletrobrás

[13] CEPEL. *Curso Anarede*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[14] ONS (2015). *Programa MaisValor: Estabilidade Eletromecânica*

[15] ONS (2017). *Programa MaisValor: HVDC - Transmissão em corrente contínua*.

ANEXOS

A.1 Código no ANATEM para o sistema teste simulado no capítulo 4.

A.1.1 Código para o caso 1

(ARQUIVOS DE SÁIDA DA SIMULAÇÃO

(Tipo) (C) (Nome do Arquivo

OUT TESTE.OUT

LOG TESTE.LOG

PLT TESTE.PLT

(

(ARQUIVO HISTÓRICO/REGISTRO DO CASO DE FLUXO DE POTÊNCIA

SAV 01 TESTE.SAV

(

(ARQUIVOS DE MODELOS

BLT TESTE.BLT

CDU TESTE.CDU

DAT DMAQ1.DAT

999999

(=====

=====

(EVENTOS

(=====

=====

(

(

DEVT IMPR

(Tp) (Tempo)(El)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (Bl)P (Rc) (Xc) (Bc)
(Defas)

APCC 0.200 1 0.7

RMCB 0.250 1

999999

(

(=====

=====

(VARIAVEIS DE SAIDA

(=====

=====

DPLT IMPR

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

VOLT 1

FMAQ 1 10

PELE 1 10

QELE 1 10

DELT 1 10

CDU 1 6

(

999999

```
(
(=====
=====

( DADOS DE SIMULACAO
(=====
=====

DSIM
( Tmax ) (Stp) ( P ) ( I )
    30.0 .001  5  1  1
(
(=====
=====

( EXECUCAO DO CASO
(=====
=====

EXSI
(
FIM
```

A.1.2 Código para o caso 2

(ARQUIVOS DE SÁIDA DA SIMULAÇÃO

(Tipo) (C) (Nome do Arquivo

OUT TESTE.OUT

LOG TESTE.LOG

PLT TESTE.PLT

(

(ARQUIVO HISTÓRICO/REGISTRO DO CASO DE FLUXO DE POTÊNCIA

SAV 01 TESTE.SAV

(

(ARQUIVOS DE MODELOS

BLT TESTE.BLT

CDU TESTE.CDU

DAT DMAQ1.DAT

999999

(=====

=====

(EVENTOS

(=====

=====

DEVT IMPR

(Tp) (Tempo)(El)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (Bl)P (Rc) (Xc) (Bc)

(Defas)

MDLP 0.200 1 -10

999999

(

(=====

(VARIAVEIS DE SAIDA

(=====

DPLT IMPR

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

VOLT 1

FMAQ 1 10

PELE 1 10

QELE 1 10

DELT 1 10

CDU 1 6

(

999999

(

(=====

(DADOS DE SIMULACAO

(=====

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I)

30.0 .001 5 1 1

(

(=====

=====

(EXECUCAO DO CASO

(=====

=====

EXSI

(

FIM

A.2 Código no ANATEM para o estudo em um sistema de grande porte presente no capítulo 4.

DARQ

(|-----|

(| ARQUIVOS EM USO - DESCOMENTADOS

|

(| ARQUIVOS SEM USO - COMENTADOS |

(|-----|

(

(ARQUIVOS DE SÁIDA DA SIMULAÇÃO

(

(Tipo) (C) (Nome do Arquivo

OUT caso20.OUT

LOG caso20.LOG

PLT caso20.PLT

(

(ARQUIVO HISTÓRICO/REGISTRO DO CASO DE FLUXO DE POTÊNCIA

SAV 10 JUN18.SAV

(

(ARQUIVOS DE MODELOS

BLT BDados\BD 1017.BLT

CDU BDados\BD 1017.CDU

(

(ARQUIVOS DE ENTRADA DE DADOS

DAT DMAQ20.DAT

(DAT EOLICA-DINAMICO1.dat

(DAT BDados\Fotovoltaicas\UFV SIN 1017.dat

DAT BDados\FACTS 1017.DAT

DAT BDados\HVDC 1017.DAT

(

(ARQUIVOS DE DADOS COMPLEMENTARES

(DAT BDados\Dados complementares\DREL 1017.DAT

(DAT BDados\Dados complementares\DCAR 1017.DAT

(DAT BDados\Dados complementares\ERAC 1017.DAT

(DAT Bdados\Dados complementares\FLUXBR 1017.DAT

(

(ARQUIVOS DE PLOTAGEM

(DAT BDados\Plotagem\PLT FMAQ.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT USUARIO 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT HVDC 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT MAQ 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT EOL SUL 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT EOL NE 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT UFV 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT FACTS 1017.DAT

(DAT BDados\Plotagem\PLT FLUXBR 1017.dat

(DAT Bdados\HVDC Melo\Melo_BtB_DPLT.dat

(DAT Bdados\HVDC Melo\Melo_BtB_DPLT_S.dat

(

999999

(

(

(

DPLT

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

(

VOLT 7050

VOLT 7064

VOLT 7062

VOLT 7061

VOLT 7051

VOLT 6891

VOLT 6892

(

FMAQ 7050 10

FMAQ 7050 20

FMAQ 7064 10

FMAQ 7064 20

FMAQ 7062 10

FMAQ 7062 20

FMAQ 7061 10

FMAQ 7051 10

FMAQ 6891 10

FMAQ 6892 10

(

(

PELE * 7050 10

PELE * 7050 20

PELE * 7064 10

PELE * 7064 20

PELE * 7062 10

PELE * 7062 20

PELE * 7061 10

PELE * 7051 10

PELE * 6891 10

PELE * 6892 10

(

QELE * 7050 10

QELE * 7050 20

QELE * 7064 10

QELE * 7064 20

QELE * 7062 10

QELE * 7062 20

QELE * 7061 10

QELE * 7051 10

QELE * 6891 10

QELE * 6892 10

(

DELT * 7050 10

DELT * 7050 20

DELT * 7064 10

DELT * 7064 20

DELT * 7062 10

DELT * 7062 20

DELT * 7061 10

DELT * 7051 10

DELT * 6891 10

DELT * 6892 10

999999

(

(

(|-----|

(| Eventos |

(|-----|

(

DEVT IMPR

(Tp) (Tempo)(El)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (Bl)P (Rc) (Xc) (Bc)

(Defas)

(

MDLP 0.200 7061 -10

999999

(

(|-----|

(| Dados de Execução da Simulação e intervalo de plotagem |

(|-----|

(

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I) (F)

15.0 .001 11

EXSI

(

(DSIM

((Tmax) (Stp) (P) (I) (F)

(30.0 .0001 11

(EXSI DLCC DLCA SAD2

(

FIM