

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

STEFÂNIA RODRIGUES DE SOUZA BARRA

ANÁLISE DE ROBUSTEZ DA ESTABILIDADE ANGULAR DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

São Carlos
2017

STEFÂNIA RODRIGUES DE SOUZA BARRA

**ANÁLISE DE ROBUSTEZ DA
ESTABILIDADE ANGULAR EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação
ORIENTADOR: Professor Rodrigo Andrade Ramos

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R532a Rodrigues de Souza Barra, Stefânia
 Análise de robustez da estabilidade angular de
 sistemas de potência / Stefânia Rodrigues de Souza
 Barra; orientador Rodrigo Andrade Ramos. São Carlos,
 2017.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
 ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2017.

 1. Sistemas elétricos de potência. 2. Estabilidade
 a pequenas perturbações. 3. Modos oscilatórios
 eletromecânicos. 4. Técnicas de estimação modal. 5.
 Prony. 6. Cepel. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Stefânia Rodrigues de Souza Barra

Título: "Análise de robustez da estabilidade angular de sistemas de potência"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30/06/2017,

com NOTA 8,0 (OITO, ZERO), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Rodrigo Andrade Ramos - Orientador -
SEL/EESC/USP*

Dra. Tatiane Cristina da Costa Fernandes - SEL/EESC/USP

*Mestre Breno Elias Brêtas de Carvalho - Doutorando -
SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

*À minha mãe e irmã,
mulheres da minha vida*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Rodrigo Ramos, pelo voto de confiança e por toda energia em mim depositada ao longo desses dois (extensos) anos de trabalho.

Ao Edson, pela ajuda e paciência extraordinárias nesses últimos meses.

Ao meu amigo João, engenheiro brilhante e grande admirador dessa área de estudo, por todo o tempo, pela motivação e por toda a dedicação a esse projeto e à nossa amizade.

À Isinha, pela paciência, ajuda, preocupação e principalmente, pela hospitalidade em São Carlos e por sempre transformar minhas vindas em dias tão bons.

À mamãe, por estar sempre presente, torcendo pelo melhor e fazendo o impossível para conseguir transformar duas meninas em mulheres. Essa graduação não existiria sem a pessoa mais inspiradora e importante da minha vida.

Ao restante de meus familiares e amigos, agradeço por todo o carinho e amor envolvidos, especialmente à minha avó e primos-irmãos queridos, Léo e Manu e à maravilhosa Ana Beatriz.

À Universidade de São Paulo e ao Departamento de Engenharia Elétrica pela qualidade de ensino e pelos ótimos professores e colegas.

***“ Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que sabe. ”***

(Aldous Huxley)

RESUMO

BARRA, S. R. S. (2017). Análise de Robustez da Estabilidade Angular em Sistemas de Potência. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Com a crescente utilização da energia elétrica nas mais variadas atividades, os sistemas elétricos de potência estão cada vez mais complexos, interligados e suscetíveis a variações de carga. Essas variações, também conhecidas como perturbações, mantêm uma relação direta com o aparecimento de fenômenos relacionados à estabilidade: os modos de oscilação eletromecânicos. Nesse contexto, a aplicação de um controlador para aumentar o fator de amortecimento dos modos oscilatórios presentes no sistema é uma das medidas corretivas a serem tomadas. O estudo da estabilidade a pequenas perturbações é feito através da aplicação de técnicas de linearização, as quais podem ser baseadas em modelo (técnicas clássicas) ou em medidas. O método de Prony, técnica de decomposição modal baseada em medidas bastante usada ao longo dos anos, é utilizado nesse trabalho para a identificação dos modos eletromecânicos a partir de sinais provenientes da variação da frequência das máquinas síncronas. Assim, é feita a comparação entre os dois métodos de identificação dos modos oscilatórios utilizados na atualidade e ainda uma análise do impacto da variação do ponto de operação do SEP na aparição desses mesmos modos. A principal conclusão de comparação entre os métodos é que a decomposição modal depende de alguns parâmetros para ser aplicada com precisão (como a ordem e a janela de tempo), o que torna o método baseado em modelo mais confiável, desde que os parâmetros do sistema sejam conhecidos. Quanto ao impacto da variação do ponto de operação em relação ao comportamento dos modos eletromecânicos conclui-se que o primeiro e o terceiro modo são bem amortecidos para toda a faixa de operação, enquanto o segundo modo é instável para alguns pontos de operação do SEP.

Palavras-chaves: Sistemas elétricos de potência, Estabilidade a pequenas perturbações, modos oscilatórios eletromecânicos, técnicas de estimação modal, Prony, Cepel

ABSTRACT

BARRA, S. R. S. (2017). Robust Analysis of Angular Stability in Systems Power. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

With the increasing use of electric power in a wide variety of activities, electric power systems are increasingly complex, interconnected and susceptible to load variations. These variations, also known as perturbations, maintain a direct relation with the appearance of stability-related phenomena: electromechanical oscillation modes. In this context, the application of a controller to increase the damping factor of the oscillatory modes presents in the system is one of the corrective measures to be taken. The small-signal stability study is done through the application of linearization techniques, which can be model-based (classical techniques) or measurement-based. The Prony method, a modal decomposition technique measurement-based that has been widely used over the years, is utilized in this work to identify electromechanical modes based on signals from the frequency variation of synchronous machines. Thus, it is made the comparison between the two methods of identification of the oscillatory modes used in the present time and also an impact analysis of the variation of the operation point of the electric power system in the appearance of these same modes. The main conclusion of the comparison between these methods is that modal decomposition depends on some parameters to be applied accurately (such time window and order), which makes the model-based method more reliable as long as the system parameters are known. Regarding the impact of the variation of the operation point in relation to the behavior of the electromechanical modes it is concluded that the first and third modes are well damped for the entire operation range, while the second mode is unstable for some operating points of the electrical system.

Key-Words: Electric power system, Small-signal stability, electromechanical oscillations, modal estimation techniques, Prony, Cepel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama unifilar de um SEP tradicional.....	1
Figura 2 - Classificação dos estudos de estabilidade	9
Figura 3 - Lugar geométrico dos polos da matriz A considerado como indicador satisfatório de margem de estabilidade a pequenas perturbações (Adaptado de Fernandes, T. C. C., 2017).....	17
Figura 4 – Comparação entre a reconstituição do sinal a partir da soma dos modos identificados pelo método de Prony e o sinal amostrado (Retirado de Geraldi Júnior, E. L., 2012).....	23
Figura 5 - Estrutura de controle do tipo rede de avanço-atraso.....	24
Figura 6 - Fluxograma com metodologia utilizada no trabalho	30
Figura 7 - Diagrama unifilar do sistema teste	31
Figura 8 - Curva de carga típica de um dia	32
Figura 9 – Autovalores do SEP obtidos através do PacDyn para sistema com PSS nos geradores 1 e 2	33
Figura 10 - Janela de amostragem para o sinal do sistema base com PSS descartando intervalo de tempo logo após a aplicação da perturbação	34
Figura 11 - Janela de amostragem para o sinal do sistema base com PSS considerando o tempo de aplicação da perturbação	35
Figura 12 - Comparação entre o sinal referente aos modos eletromecânicos estimados pelo Prony e o sinal original extraído do ANATEM.....	36
Figura 13 - Comparação entre o sinal referente aos modos eletromecânicos estimados pelo Prony e o sinal original extraído do ANATEM com vista aproximada	36
Figura 14 - Comparação entre o primeiro modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação	39
Figura 15 – Variação do primeiro modo eletromecânico identificado pelo PacDyn	39
Figura 16 - Comparação entre o segundo modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação	40
Figura 17 - Variação do segundo modo eletromecânico identificado pelo PacDyn	40
Figura 18 - Variação do terceiro modo eletromecânico identificado pelo PacDyn.....	40
Figura 19 - Comparação entre o terceiro modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação	40
Figura 20 - Diagrama unifilar do sistema teste	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de carregamento correspondente ao horário do dia	32
Tabela 2 - Variações aplicadas às tensões de referências	33
Tabela 3- Modos eletromecânicos obtidos através do PacDyn para sistema com PSS nos geradores 1 e 2.....	33
Tabela 4 - Erro absoluto entre função reconstruída e original em função da ordem p.....	36
Tabela 5 - Comparação entre os resultados obtidos entre o software PacDyn e via Prony quando aplicado sobre os dados adquiridos através de simulações no ANATEM.....	38
Tabela 6- Erro absoluto entre função reconstruída e original em função da ordem p para os casos não estimados anteriormente.....	38
Tabela 7 - Modos eletromecânicos obtidos através do PacDyn para os casos 5 e 12	39
Tabela 8 - Parâmetros dos geradores.....	49
Tabela 9 - Parâmetros dos AVR's	50
Tabela 10 - Parâmetros dos controladores do tipo PSS.....	50
Tabela 11 - Parâmetros dos reguladores de velocidade	50
Tabela 12 - Valores de carga e geração calculados para todos os pontos de operação do sistema	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AVR</i>	- <i>Automatic Voltage Regulator</i>
<i>FACTS</i>	- <i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
LT	- Linha de transmissão
<i>PSS</i>	- <i>Power System Stabilizer</i>
SEP	- Sistema Elétrico de Potência
p.u	- Por unidade

LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{a,b,c}$	módulo das tensões de fase a , b , e c
$Z_{aa,bb,cc}$	impedância própria das fases a , b , e c
$Z_{ab,bc,ac}$	impedância mútua entre as fases a , b , e c
$E'_{d,q}$	tensão equivalente transitória de eixo direto e de quadratura
$E'_{f,q}$	tensão de campo equivalente
$I_{d,q}$	corrente de eixo direto e de quadratura
d	ângulo do rotor do gerador
ω	velocidade angular do rotor do gerador
ω_s	velocidade síncrona
P_{mec}	potência mecânica
H	constante de inércia do gerador
$x_{d,q}$	reatância de eixo direto e de quadratura
$x'_{d,q}$	reatância transitória de eixo direto e de quadratura
$x''_{d,q}$	reatância subtransitória de eixo direto e de quadratura
x_0	reatância de sequência zero
r_a	resistência de armadura
r	resistência de uma fase do estator do gerador
K_e	ganho do regulador de tensão do gerador
T_e	constante de tempo do regulador de tensão do gerador
V_t	tensão terminal do gerador
V_{ref}	referência para o regulador de tensão do gerador
$T'_{do,qo}$	constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto e de quadratura

T''	constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto e de quadratura
K_{pss}	ganho do PSS clássico
T_w	constante de tempo do estágio de <i>washout</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	4
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2. ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	7
2.1. CONCEITOS BÁSICOS	7
2.2. CLASSIFICAÇÃO	8
2.2.1. ESTABILIDADE DE FREQUÊNCIA	9
2.2.2. ESTABILIDADE DE TENSÃO	10
2.2.3. ESTABILIDADE DO ÂNGULO DO ROTOR	10
3. ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES	13
3.1. TÉCNICAS LINEARES PARA O ESTUDO DA ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES	13
3.1.1. TÉCNICAS BASEADAS EM MODELO	13
3.1.2. TÉCNICAS BASEADAS EM MEDIDAS	18
3.1.2.1. Ringdown analysis	19
3.1.2.2. Moder-meter algorithms	20
3.1.2.3. Método de Prony	21
3.2. TIPOS DE OSCILAÇÃO E CONTROLADORES	23
4. PROPOSTA DE TRABALHO	27
4.1. REGIME PERMANENTE E APLICAÇÃO DO MÉTODO CLÁSSICO PARA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS OSCILATÓRIOS	27
4.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PRONY PARA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE OSCILAÇÃO	27
4.3. APLICAÇÃO NOS OUTROS PONTOS DE OPERAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	29
4.4. RESUMO DA METODOLOGIA UTILIZADA	29

5. TESTES E RESULTADOS	31
5.1. CENÁRIO DE ESTUDO	31
5.2. CARREGAMENTO DO SISTEMA	32
5.3. PERTURBAÇÕES UTILIZADAS	33
5.4. APLICAÇÃO DO PACDYN PARA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS OSCILATÓRIOS DO CASO BASE	33
5.5. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PRONY PARA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS OSCILATÓRIOS DO CASO BASE	34
5.6. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PRONY PARA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS OSCILATÓRIOS NOS OUTROS PONTOS DE OPERAÇÃO	37
5.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PONTO DE OPERAÇÃO NO COMPORTAMENTO DOS MODOS ELETROMECÂNICOS	39
6. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A energia sempre representou um fator de progresso e bem-estar para uma determinada região. Os sistemas elétricos de potência (SEPs) encontram-se entre as construções mais impressionantes desenvolvidas pelo homem, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico e científico.

Em um primeiro momento, no começo do século XX, a geração de energia existente encontrava-se próxima ao consumidor final, já que toda a energia era gerada localmente sem conexão com outras redes e advinha de fontes primárias tradicionais (como carvão e gás). Dessa forma, os sistemas operavam de forma ilhada e usinas isoladas forneciam energia a áreas geograficamente limitadas.

Com a evolução da demanda energética no país e o aumento de cargas nos sistemas, no final da década de 1920, esse cenário sofreu uma grande transformação. Deu-se início então ao processo de interligação das redes antes isoladas, resultando em um sistema interligado de grande e médio porte. Nesse momento, a geração de energia passou de distribuída para, aos poucos, se tornar centralizada (Borbely; Kreider, 2001).

Essa interconexão possibilitou a redução de custos, a cooperação para abastecimento de uma carga e o aumento da matriz energética do país. A geração, antes obrigatoriamente próxima a carga, passou a ser feita em larga escala e em áreas geograficamente adequadas (em termos de custo/benefício), uma vez que essa energia podia ser transmitida aos consumidores por meio do sistema único, caracterizando inclusive grande parte do modo de operação do sistema atual.

Assim, inicialmente, os SEPs eram divididos em três grandes blocos com funções bem definidas: a **geração**, a **transmissão** e a **distribuição** de energia, como mostra a representação abaixo.

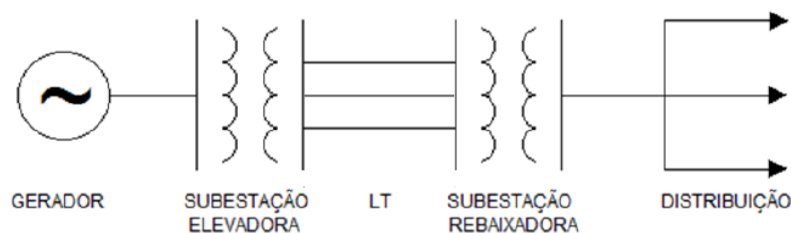


Figura 1 - Diagrama unifilar de um SEP tradicional

A estrutura convencional do SEP oferece benefícios nos blocos, como a instalação da geração próxima às fontes primárias de energia. A transmissão também é feita até os centros de carga por meio de linhas extensas, sujeitas a limites térmicos e de estabilidade, e possíveis perdas de quantias consideráveis de energia.

Forçados a operar próximos aos seus limites devido ao grande desenvolvimento social, aos avanços tecnológicos e ao aumento da demanda elétrica, mais fontes começaram a ser exploradas. O surgimento de novas tecnologias para geração de energia, como a energia eólica, solar, das marés e biomassa (em especial o bagaço de cana) juntamente ao aumento da procura por fontes de energia mais limpas e sustentáveis, e a escassez de recursos financeiros para projetos de expansão do sistema atual, vem dando espaço às pequenas unidades de geração conectadas diretamente aos sistemas de subtransmissão e distribuição e consequentemente, próximos aos consumidores finais. Nesse contexto, temos um aumento de interesse em geração distribuída (GD) e uma nova mudança na disposição do cenário energético.

Com esse novo cenário, a oferta de energia passou a exigir um maior controle em sua entrega, visando atender de forma satisfatória os consumidores de cada área. Essa qualidade está diretamente relacionada ao planejamento detalhado da operação e proteção, assim como o conhecimento das condições de estabilidade do sistema, sendo essa característica de fundamental importância para confiabilidade de sua operação.

Dentre os problemas ligados a estabilidade que os SEPs passaram a apresentar após a interligação está o surgimento de oscilações eletromecânicas entre geradores e áreas do sistema. Alvo de estudos intensos desde o final da década de 60 do século XX, essas oscilações surgem devido à falta de torque de amortecimento, podendo inclusive ocasionar instabilidade em tais sistemas.

Existem várias perturbações às quais o sistema elétrico está suscetível e o estudo de sua estabilidade se dá analisando a natureza destas. O estudo das perturbações que podem ocorrer é classificado, de maneira bem geral, em estudo da estabilidade a grandes perturbações e estudo da estabilidade a pequenas perturbações (Kundur et. Al, 2004).

A estabilidade a grandes perturbações pode ser entendida como sendo a capacidade do sistema de encontrar um novo ponto de operação após a ocorrência de uma perturbação que o afaste significativamente do ponto de equilíbrio anterior. Tais perturbações estão relacionadas, por exemplo, a curtos-circuitos permanentes nas linhas de transmissão ou à perda de grandes unidades geradoras.

Já a estabilidade a pequenas perturbações, foco desse trabalho, pode ser definida como a capacidade do sistema de oferecer resposta a oscilações de pequena magnitude, como alterações de cargas diárias, que não afetam de maneira significativa o ponto de equilíbrio do mesmo e são bastante comuns durante a operação diária de um sistema.

Essas oscilações, quando não são bem amortecidas, podem causar desgastes mecânicos nos geradores, influenciar na transferência de potência das linhas de transmissão e até, na pior das hipóteses, interromper o fornecimento de energia elétrica. Assim, a estabilidade de um sistema está diretamente ligada a capacidade das máquinas síncronas permanecerem em sincronismo, característica relacionada à estabilidade do ângulo do rotor e que envolve o estudo de oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema elétrico.

As oscilações eletromecânicas causam alterações na potência de saída da máquina e são geradas pelo desbalanço entre o torque mecânico de entrada e o torque elétrico de saída resultante após uma perturbação, causando aceleração ou desaceleração dos rotores de uma ou mais máquinas do sistema. Logo, a diferença angular entre os geradores pode afetar a transferência de potência e levar o sistema à instabilidade (Kundur et al., 2004).

O estudo dessas oscilações, no contexto de pequenas perturbações, pode ser realizado a partir da análise do modelo linear. O conjunto de equações algébrico-diferenciais que representam o SEP pode ser linearizado em torno de um ponto de equilíbrio, a partir do primeiro termo da expansão em série de Taylor. Assim, o estudo da estabilidade pode ser feito de forma analítica a partir do cálculo dos autovalores associados a matriz de estado do sistema (Rogers, 1996; Kundur, 1994). Dessa forma, os modos de oscilação relativos às interações eletromecânicas e outras informações podem ser identificados para uma certa condição de operação.

Nesse contexto, a aplicação de um controlador, de técnica adequada para amortecimento das oscilações eletromecânicas, é uma das medidas corretivas a serem tomadas. O controlador assegurará que mesmo sob condições adversas, que podem ser relacionadas à natureza ou à operação do sistema, esse possa ser capaz de garantir o fornecimento de energia elétrica de forma ininterrupta, além de ser robusto e propiciar segurança, garantindo a estabilidade do mesmo.

Em (DEMELLO; Concordia, 1969), através do estudo de uma máquina modelada contra um barramento infinito, são mostrados os efeitos do regulador de tensão sobre o torque de amortecimento da máquina síncrona. Nesse trabalho, o uso dos Estabilizadores de Sistema de Potência (do inglês *Power System Stabilizers* (PSS)) é proposto como fonte de amortecimento usada para garantir um amortecimento adequado ao sistema elétrico, introduzindo um torque elétrico em fase com os desvios de velocidade do rotor. Tais estabilizadores são amplamente utilizados devido a facilidade do projeto e ao custo baixo de implementação.

As maiores dificuldades encontradas nos projetos de controladores encontram-se em dois fatos. O primeiro é que o SEP possui característica altamente não linear, ou seja, trata-se da dinâmica de um sistema com elevado número de geradores, centros de carga e sistemas de excitação. Esse fator faz com que a representação matemática do mesmo torne-se complexa, com uma quantidade significativa de equações algébricas e diferenciais. Já a segunda dificuldade tem relação com a variação das condições de operação ao longo do dia, podendo algumas dessas variações serem responsáveis por causar instabilidade em um modo de oscilação para apenas um determinado ponto de operação, enquanto para outros não.

O estudo das curvas de carga de um sistema é muito importante tanto para o setor de planejamento de operação da concessionária quanto para outros setores como o de marketing e financeiro. O conhecimento do funcionamento das curvas de carga de um sistema é de suma importância, portanto, para que se possa fazer um planejamento do mesmo e para que se possa estudar a faixa de operação que o sistema opera. Nesse contexto então temos como objetivo principal desse

trabalho o estudo da robustez de um SEP para uma determinada faixa de operação e como os modos eletromecânicos são impactados por essas variações.

Como alternativa para estudo do comportamento desses modos eletromecânicos é possível aplicar o método baseado em modelo. Essa técnica de estudo depende das simulações em um modelo matemático, limitando a precisão dos resultados obtidos pela habilidade desse modelo em representar adequadamente o comportamento dinâmico dos SEPs. Porém, a dinâmica dos sistemas é muito complexa devido aos seus componentes, e ainda está sujeita a diferentes alterações ao longo do tempo, resultantes das características topológicas ou até mesmo de sua condição de operação.

Além disso, os parâmetros considerados no processo de modelagem do SEP podem variar, assim como os parâmetros dos geradores que estão sujeitos a alterações devido a desgastes mecânicos, operação em altas temperaturas e a própria saturação dos materiais magnéticos. Tais alterações podem inclusive comprometer a precisão do modelo matemático usado.

Nesse contexto, uma abordagem alternativa para identificação dos modos eletromecânicos são os métodos baseados em técnicas de processamento de sinais sobre sinais de saída do sistema, as quais não requerem um modelo paramétrico do SEP em estudo, já que devem ser aplicadas diretamente na resposta amostrada. Dessa maneira a precisão do modo eletromecânico estimado não fica restrita ao grau de detalhamento do modelo matemático adotado ou à capacidade de o mesmo descrever o comportamento do sistema de forma exata.

As estimativas realizadas por essas técnicas ficam dependentes da disponibilidade e qualidade dos sinais no domínio do tempo. Para estimação precisa, a perturbação sobre a qual o sistema foi ou está sujeito deve ter energia suficiente que estimule a oscilação eletromecânica na porção do sinal em análise, fazendo com que o modo que se deseja estimar no sinal coletado seja observável. Porém, a perturbação não pode ser tão significativa a ponto de que a resposta amostrada apresente comportamentos não lineares, visto que a porção do sinal em análise deve possuir característica predominantemente linear para que o método seja aplicado.

Além disso, outros fatores relativos ao processamento do sinal também irão interferir na precisão dos resultados adquiridos a partir da análise direta do sinal amostrado, como o tamanho da janela de dados, a taxa de amostragem e a própria definição da ordem na configuração do método aplicado.

De acordo com os argumentos apresentados, observa-se que ainda há questões em aberto nas duas abordagens de identificação dos modos eletromecânicos. Assim, o trabalho posposto se desenvolve com duas abordagens distintas, visando comparar a aplicação das técnicas baseadas em modelo e as técnicas baseadas em medidas, avaliando o impacto da variação do ponto de operação no comportamento dos modos eletromecânicos.

1.2. Objetivo

Com base no que foi apresentado anteriormente, os objetivos específicos desse trabalho são:

- Verificar que os controladores PSS são efetivos para amortecimento dos métodos eletromecânicos que aparecem no sistema;
- Analisar o comportamento dos modos eletromecânicos no SEP em função da alteração no ponto de operação do sistema, comparando o método de identificação através de técnicas clássicas (baseado em modelo) e o método de estimação modal de Prony (baseado em medidas).

1.3. Estrutura do Trabalho

A estrutura desse Trabalho de Conclusão de Curso será composta por mais cinco capítulos que fornecerão os elementos e conceitos necessários à compreensão do estudo realizado. A descrição dos capítulos é apresentada na sequência.

Capítulo 2 – Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência: Neste capítulo é realizada uma revisão mais detalhada sobre estabilidade em sistemas de potência, onde conceitos básicos são revistos. Também é abordada a classificação da estabilidade, com ênfase na estabilidade angular dos rotores, foco de estudo desse trabalho.

Capítulo 3 – Estabilidade a Pequenas Perturbações: Neste capítulo apresenta-se em detalhes a diferença entre duas formas de aplicar técnicas lineares para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações: a técnica baseada em modelo e a técnica baseada em medida. Também são apresentados os tipos de oscilação existentes.

Capítulo 4 – Proposta do Trabalho: Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para todos os testes desse Trabalho de Conclusão de Curso usando um sistema base e como as técnicas de estudo da estabilidade a pequenas perturbações são aplicadas.

Capítulo 5 – Testes e Resultados: Nesse capítulo são apresentados todas as simulações e todos os resultados obtidos ao longo desse trabalho e suas respectivas interpretações, os quais foram feitos com a ajuda de *softwares* que fazem parte do pacote Cepel (ANAREDE, PacDyn e ANATEM) e o Matlab.

Capítulo 6 – Conclusões: A avaliação de robustez da estabilidade angular dará subsídio para que se possa concluir pela necessidade ou não de reajuste dos estabilizadores quando se considera a variação no ponto de operação do sistema. Neste capítulo são relatados os principais resultados obtidos ao longo do Trabalho de Conclusão, comparando os métodos de identificação dos modos eletromecânicos e a influência do ponto de operação sobre o comportamento dos modos oscilatórios no sistema.

2. ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1. Conceitos básicos

A estabilidade do SEP pode ser definida como a capacidade do sistema, para uma condição de operação inicial, em recuperar um estado de operação em equilíbrio após ter sido submetido a uma perturbação, sendo a estabilidade uma condição de equilíbrio entre forças opostas e a instabilidade o resultado de uma perturbação que ocasiona um desequilíbrio permanente entre as forças opostas (Kundur et Al, 2004).

O SEP é um sistema altamente não-linear que opera em um ambiente em constante mudança: entrada e saída de cargas e geradores, topologia e parâmetros operacionais fundamentais. Quando é submetido a uma perturbação transitória, a estabilidade do sistema depende da natureza do distúrbio bem como da condição de funcionamento inicial.

Pequenas perturbações na forma de mudanças de carga ocorrem continuamente e o sistema de energia se ajusta às condições de mudança, sendo capaz de operar de forma satisfatória mesmo sob essas condições e satisfazer a demanda de carga com sucesso. Além disso, o sistema também deve ser capaz de se reestabelecer após vários distúrbios de natureza grave, tal como um curto-circuito em uma linha de transmissão ou a perda de um grande gerador.

Na sequência de uma perturbação transitória, se a resposta do gerador conectado ao sistema for estável, ele irá atingir o estado de equilíbrio com praticamente todo o sistema intacto; as ações de controle automáticos e as manobras de proteção reestabelecerão o sistema para um ponto de operação. Por outro lado, se o sistema é instável, ele irá resultar em uma situação de risco, como um aumento progressivo da separação angular dos rotores do gerador ou uma diminuição progressiva da tensão de barramento. Uma condição do sistema instável pode conduzir a falhas em cascata e até a parada de uma porção principal do sistema de energia.

Um típico e moderno sistema de energia é, portanto, um processo de múltiplas variáveis de alta ordem cujo desempenho dinâmico é influenciado por uma ampla variedade de dispositivos com diferentes taxas de resposta e características. Assim, a instabilidade num sistema de energia pode ocorrer de muitas formas diferentes, dependendo da topologia do mesmo, seu modo de funcionamento e a forma do distúrbio. Tradicionalmente, o problema de estabilidade tem sido o de manter a operação síncrona. Dado que a energia do sistema é gerada pelas máquinas síncronas, uma condição necessária para operação satisfatória do sistema é que todas estas máquinas permaneçam em sincronismo (Kundur, 1994).

Este aspecto da estabilidade é influenciado pela dinâmica do rotor do gerador e pela relação entre potência e ângulo. No entanto, a instabilidade também pode ser atingida sem a perda de

sincronismo. Por exemplo, um sistema composto de um gerador que alimenta um motor de indução pode tornar-se instável devido a um colapso de tensão na carga. Nesse exemplo, a estabilidade e controle de tensão são os problemas, em vez da manutenção do sincronismo.

Este tipo de instabilidade também pode ocorrer no caso de cargas cobrindo uma grande área de um sistema de grande porte. No caso de uma incompatibilidade de carga/geração significativa, o gerador e controle de motor primário se tornam importantes, assim como os sistemas de controle e proteção. Caso não seja devidamente coordenada, é possível que a frequência do sistema se torne instável e unidades geradoras e/ou cargas podem vir a ser desarmadas, levando a um possível apagão do sistema. Este é um outro caso em que as unidades podem permanecer em sincronismo, mas o sistema fica instável (Kundur, 1994).

Portanto, devido à elevada dimensionalidade e complexidade dos problemas de estabilidade, é essencial fazer uso de simplificações e analisar os tipos específicos de problemas usando o grau de detalhe de representação do sistema. A classificação da estabilidade do sistema de alimentação pode ser feita em diferentes categorias.

2.2. Classificação

A instabilidade do sistema de energia pode assumir diferentes formas e é influenciada por uma ampla gama de fatores. Análises de problemas de estabilidade, incluindo a identificação de fatores essenciais que contribuem para tal e a elaboração de métodos de melhoria do funcionamento estável, são feitas de maneira muito mais simples pela classificação da estabilidade em categorias. Estas categorias são baseadas em (Kundur et al., 2004):

- A natureza física do modo de instabilidade resultante como indicado pelas principais variáveis do sistema nas quais a instabilidade pode ser observada;
- A dimensão da perturbação considerada, que influencia no método mais adequado de cálculo e previsão da estabilidade;
- Os dispositivos, processos e o intervalo de tempo que devem ser levados em consideração a fim de determinar a estabilidade .

A Figura 2 mostra a classificação mais aceita atualmente, de acordo com os tópicos vistos acima, da estabilidade do sistema em várias categorias e subcategorias.

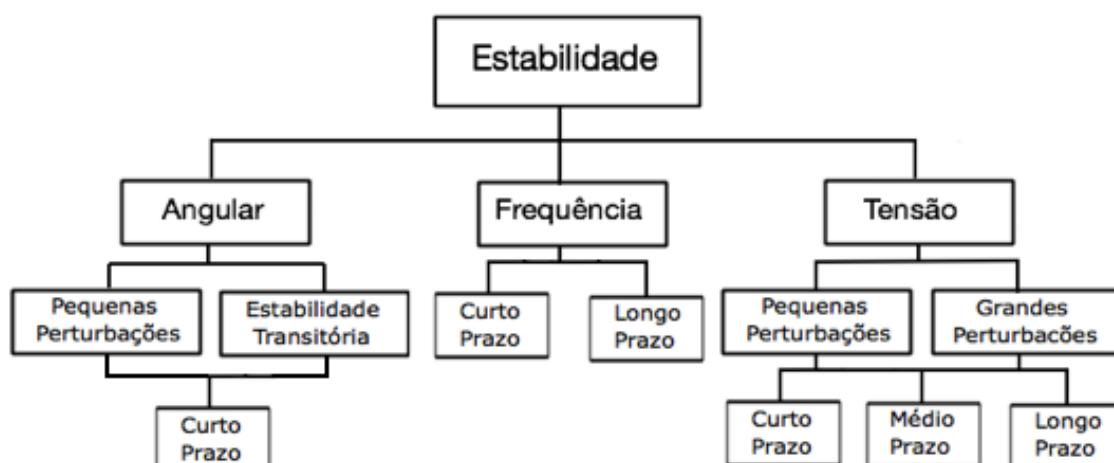


Figura 2 - Classificação dos estudos de estabilidade

2.2.1. Estabilidade de Frequência

A estabilidade de frequência se apresenta como a capacidade do sistema elétrico de potência de manter a frequência estável após uma perturbação severa no sistema, resultando em um desequilíbrio entre geração e carga (Kundur, 1994). Esse fenômeno depende da capacidade do SEP de manter/restabelecer o equilíbrio entre sistema de geração e carga e só vem sendo colocado em estudo recentemente.

Grandes perturbações geralmente implicam grandes excursões de frequência, fluxo de potência, tensão e outras variáveis do sistema. Como consequência, são ativadas ações ou processos como controles e proteções que não são modeladas em estudos convencionais de estabilidade transitória e estabilidade de tensão. Estes processos podem ser muito lentos ou só desencadeados por condições extremas do sistema.

Durante excursões de frequência, a característica de tempo dos processos e dispositivos que são ativados estende-se desde frações de segundos até vários minutos, portanto a estabilidade de frequência pode ser um fenômeno de curto ou longo prazo.

Um exemplo de instabilidade de frequência em curto prazo é a formação de ilhas com geração insuficiente. O decaimento da frequência pode levar a ilha ao blecaute em poucos segundos. Por outro lado, cenários causados por controles de velocidade em turbinas de vapor ou dispositivos de proteção e controle da caldeira/reator originam instabilidade de frequência no longo prazo.

2.2.2. Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão é apresentada como a capacidade do SEP de se conseguir manter as tensões de forma aceitável em todos os barramentos do sistema sob condições normais de funcionamento e, também, após ter sido submetido a uma perturbação. A estabilidade de tensão está relacionada ao fluxo de potência reativa na rede, ao comportamento das cargas em face às variações de tensão, à ação de dispositivos automáticos de controle de tensão e a limitação sobre excitação de geradores.

A estabilidade de tensão, assim como a estabilidade de frequência, pode ser classificada em duas categorias de acordo com o tipo de perturbação: grandes perturbações e variações lentas de carga (pequenas perturbações). Esse tipo de estabilidade já foi bastante estudado e os principais questionamentos a respeito dele encontram-se relativamente resolvidos com algumas questões ainda em aberto. Alguns trabalhos nessa área podem ser vistos em (Huang, G; Zhao, L.; Song, X., 2002) e (Santos, C. J. R. dos., 2008).

2.2.3. Estabilidade do Ângulo do Rotor

A estabilidade do ângulo do rotor, categoria que é o foco de estudo desse trabalho, pode ser definida como a capacidade de máquinas síncronas interconectadas de permanecerem em sincronismo tanto em condições normais de operação, quanto após sofrerem uma perturbação (Kundur, 1994). Isso depende da capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico de cada máquina síncrona do sistema.

O problema de estabilidade envolve o estudo das oscilações eletromecânicas no sistema de potência, sendo uma das consequências fundamentais o modo como as potências geradas pelas máquinas síncronas são afetadas pelas oscilações de seus rotores (Kundur, 1994).

A capacidade de várias máquinas de se manter operando em sincronia quando interconectadas pode ser entendida como uma sequência de forças de restauração, as quais atuam onde há chances de aceleração ou desaceleração de uma ou mais máquinas em relação às outras máquinas. Em condições estacionárias, o torque mecânico de entrada e o torque elétrico de saída de cada máquina estão em equilíbrio e assim, a velocidade angular do rotor da máquina mantém-se constante.

Quando o sistema sofre uma perturbação, o equilíbrio é perdido e o rotor, ou rotores, de uma ou mais máquinas, sofre(m) aceleração ou desaceleração. Acima de certo limite, um aumento na separação angular entre os geradores é acompanhado de uma diminuição na transferência de potência, aumentando ainda mais a separação angular e levando à instabilidade. Assim sendo, a estabilidade do sistema depende do surgimento de torques de restauração como resultado de desvios nas posições angulares dos rotores das máquinas (Kundur, 1994).

A perda de sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o resto do sistema ou entre grupos de máquinas. No segundo caso, o sincronismo ainda pode ser mantido dentro de cada grupo de máquinas após sua separação do restante do sistema (Kundur, 1994).

As modificações do torque elétrico de uma máquina síncrona em um sistema de potência, podem ser decompostas em duas componentes:

- Torque sincronizante, em fase com o desvio no ângulo do rotor;
- Torque de amortecimento, em fase com o desvio de velocidade.

A estabilidade do sistema depende da existência dessas duas componentes do torque para cada máquina síncrona. Se não há torque sincronizante, o que se tem é instabilidade advinda de um viés aperiódico no ângulo do rotor. Assim, se não há torque de amortecimento, há instabilidade oscilatória. O fenômeno da estabilidade do ângulo do rotor é classificado em duas categorias: estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade a grandes perturbações ou estabilidade transitória (Kundur, 1994).

- **Estabilidade a Grandes Perturbações ou Transitória:** Tal tipo de estabilidade se refere à capacidade do SEP de manter o sincronismo quando este é submetido a uma severa perturbação. A resposta do sistema resultante envolve grandes excursões do ângulo do rotor do gerador e é influenciada pela relação não-linear entre potência e ângulo. A estabilidade transitória depende tanto do estado de funcionamento inicial do sistema quanto da dimensão da perturbação. Normalmente, a perturbação no sistema o altera de tal modo que o estado de operação do sistema pós perturbação será diferente do antes da perturbação. O prazo de interesse nos estudos de estabilidade transitória é normalmente limitado de 3 a 5 segundos depois da perturbação. Ele pode se estender a 10 segundos para casos de grandes sistemas com oscilações inter-área. Os sistemas de energia experimentam uma larga variedade de perturbações.

- **Estabilidade a Pequenas Perturbações:** Refere-se à capacidade do sistema manter o sincronismo quando submetido a pequenas perturbações. As perturbações são consideradas como sendo suficientemente pequenas para que a linearização, em torno de certo ponto de operação, das equações dinâmicas que descrevem o sistema seja admissível. Tais distúrbios são continuamente encontrados na operação normal do sistema, tais como pequenas mudanças na carga. A estabilidade a pequenos sinais depende do ponto de operação inicial do sistema. Já a possível instabilidade resultante pode ocorrer de duas formas: (i) aumento no ângulo do rotor devido à falta de torque sincronizante, ou (ii) as oscilações do rotor de amplitude crescente, devido à falta de torque de amortecimento. Em sistemas de energia modernos, a estabilidade a pequenos sinais é em grande parte um problema relacionado à insuficiência de amortecimento das oscilações eletromecânicas.

As classificações de estabilidade foram baseadas em diversas considerações para que a identificação dos casos de instabilidade pudesse ser conveniente, assim como a aplicação de ferramentas de análise e o desenvolvimento de medidas corretivas apropriadas para um determinado problema.

Certamente, há uma certa sobreposição entre as várias formas de instabilidade, uma vez que se os sistemas falham, mais de uma de suas formas pode aparecer. Entretanto, a ocorrência de um evento no sistema deveria ser classificada baseando-se primeiramente no fenômeno inicial dominante, referindo-se à tensão, ângulo do rotor ou frequência.

Embora a classificação da estabilidade do sistema elétrico seja um meio eficaz e conveniente para lidar com a complexidade do problema, a estabilidade geral do mesmo não deve ser esquecida e as soluções para um determinado tipo de instabilidade não devem ser feitas à custa de outro. Esse trabalho aborda apenas uma das subcategorias do problema da estabilidade, realizando o estudo da estabilidade do ângulo do rotor a pequenas perturbações.

3. ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

Em um ponto de equilíbrio, as variáveis de estado do sistema assumem valores constantes, os quais não variam com o tempo (Kundur, 1994). Para avaliar a estabilidade do sistema quando submetido a perturbações, mesmo com os SEP continuamente experimentando flutuações pequenas, é válido supor que o sistema está inicialmente operando sobre um ponto de equilíbrio (Kundur et Al, 2004).

No estudo de estabilidade a pequenas perturbações, considera-se que as perturbações ocorridas não afastam significativamente o sistema de seu ponto de operação original (ponto de equilíbrio em que se encontra originalmente o sistema). Assim, se o sistema operar em torno de um ponto de equilíbrio e se as perturbações envolvidas forem pequenas, é possível aproximar a dinâmica do modelo não linear pela dinâmica resultante de um modelo linearizado.

Esse modelo linearizado pode ser considerado uma boa aproximação do modelo não linear quando a análise é feita dentro de um conjunto limitado de pontos de operação numa vizinhança arbitrária do ponto de equilíbrio no qual foi obtida a modelagem linearizada (Ogata, 2003).

3.1. Técnicas lineares para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações

Com base nessa hipótese existem dois procedimentos bem estabelecidos na literatura para análise da estabilidade de um sistema: o primeiro fundamenta-se em análises das equações linearizadas do mesmo, enquanto o segundo as propriedades modais das oscilações eletromecânicas são obtidas por meio da aplicação de técnicas de estimação modal em sinais amostrados do SEP.

No estudo dos modos de oscilação eletromecânica do sistema, uma das preocupações é calcular as taxas de amortecimento desses modos. Assim, é possível determinar quais são os modos que apresentam um amortecimento abaixo do considerado “seguro” para o sistema e quantos deles são considerados instáveis, para que medidas de controle possam ser aplicadas para aumentar esse amortecimento e estabilizar os modos instáveis.

Assim, alguns conceitos gerais a respeito dessas técnicas são apresentados a seguir, com o objetivo de fornecer ao leitor uma introdução sobre o conjunto de ferramentas já existentes para esse estudo.

3.1.1. Técnicas baseadas em modelo

O procedimento de linearização apresentado adota como técnica o desenvolvimento de uma função não linear em uma série de Taylor em torno de um ponto de equilíbrio. Apenas o termo linear da expansão em série de Taylor será utilizado, desprezando os termos de ordem maior ou superior a 2.

Portanto, para que a aproximação seja válida, as variáveis não devem se desviar significativamente das condições de operação.

Considerando o seguinte sistema não linear:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) \\ x(t_0) &= x_0,\end{aligned}\tag{3.1}$$

sendo $x(t)$ um vetor de estados e $u(t)$ o vetor de entradas do sistema. Se o sistema é autônomo (derivada dos estados não são funções explícitas do tempo), a equação (3.1) pode ser simplificada para (Kundur, 1994):

$$\dot{x} = f(x, u).\tag{3.2}$$

A saída do sistema será expressa em função das variáveis de estado e da entrada do mesmo, de forma que seja representada por:

$$y = g(x, u)\tag{3.3}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1(x_1) \\ g_2(x_2) \\ \vdots \\ g_n(x_n) \end{bmatrix}$$

sendo y o vetor de saídas e g o vetor de funções não lineares, relacionando variáveis de entrada e estado com as saídas do sistema.

Para linearização de (3.2) devemos supor que u_e é o vetor de entrada e x_e é o estado de equilíbrio do sistema, sendo uma pequena perturbação analisada em torno desse ponto. Também devemos considerar que uma pequena perturbação é inserida no sistema,

$$x = x_e + \Delta x, \quad u = u_e + \Delta u,$$

onde Δ representa o pequeno desvio sofrido pela variável.

Dessa forma, o novo estado deve satisfazer a equação (3.2) de maneira que:

$$\dot{x} = x_e + \Delta \dot{x} = f[(x_e + \Delta x), (u_e + \Delta u)].\tag{3.4}$$

Assumindo que o desvio é pequeno e assim o sistema não se afasta significativamente do ponto de equilíbrio especificado, a função não linear pode ser escrita em termos da aproximação pela expansão em série de Taylor.

Assim, a função (3.2) pode ser aproximada da seguinte forma (Kundur, 1994):

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{ie} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_e + \Delta x), (u_e + \Delta u)] \approx f_i(x_e, u_e) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r, \quad (3.5)$$

sendo $i = 1, 2, \dots, n$.

Como $\dot{x}_{ie} = f_i(x_e, u_e) = 0$, temos:

$$\Delta \dot{x}_i \approx \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r,$$

sendo $i = 1, 2, \dots, n$.

Da mesma forma, a equação de saída do sistema (3.3) também pode ser reescrita por aproximação por série de Taylor:

$$\Delta y_i \approx \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r,$$

sendo $j = 1, 2, \dots, m$.

Portanto, as equações linearizadas resultantes de (3.2) e (3.3) podem ser escritas como,

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &\approx A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y &\approx C \Delta x + D \Delta u \end{aligned} \quad (3.6)$$

onde,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial u_r} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

A – matriz de estados com dimensão $n \times n$;

B – matriz de controle ou de entrada com dimensão $n \times r$;

C – matriz de saída com dimensão $m \times n$;

D – matriz de transmissão direta com dimensão $m \times r$.

Assim, para pequenos desvios no sistema, pode-se dizer que o modelo:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (3.8)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u, \quad (3.9)$$

representa de forma aproximada a dinâmica do sistema (3.2) e (3.3), quando este não se afasta significativamente do ponto de equilíbrio. Esta limitação é bastante significativa na teoria de linearização por expansão em série, já que a vizinhança para qual a análise é válida depende da precisão requerida pelo estudo pretendido, podendo ser muito pequena caso alta precisão seja requerida.

A matriz de estados A (3.7) é responsável pela parcela da resposta do sistema que é excitada pelas condições iniciais, definindo completamente a transição dos estados do instante inicial $t = 0$ a qualquer instante t quando as entradas são nulas (Kuo, 1995). Os autovetores e autovalores da matriz A representam a resposta do sistema nessas condições, além de possibilitar o estudo da estabilidade de um determinado ponto de equilíbrio.

Seja uma matriz de estados $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ representante de um sistema físico. Os autovalores da matriz são os parâmetros escalares λ que solucionam:

$$A\phi = \lambda\phi, \quad (3.10)$$

sendo ϕ um vetor com dimensão $n \times 1$.

Os autovalores associados à matriz A são raízes do polinômio característico:

$$\det(A - \lambda I) = 0. \quad (3.11)$$

Já em relação aos autovetores, os autovetores à direita associados à matriz A correspondem aos vetores colunas que satisfazem (3.10). Já os autovetores à esquerda são os vetores linha ψ que solucionam:

$$\psi A = \lambda\psi, \quad (3.12)$$

sendo ψ um vetor de dimensão $1 \times n$.

A partir dos autovetores, a resposta no tempo de um sistema linear para uma condição inicial Δx_0 , sendo $u = 0$ e supondo n autovalores distintos é dada por (Kundur, 1994):

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i c_i e^{\lambda_i t}, \quad (3.13)$$

onde:

- c_i – corresponde ao produto escalar $c_i = \psi_i \Delta x(0)$;
- ψ_i – autovetores à esquerda associados à matriz A ;
- $\Delta x(0)$ – condição inicial do sistema;
- ϕ_i – autovetores à direita associados à matriz A ;
- λ_i – autovalores associados à matriz A .

A equação (3.13) fornece a expressão para a resposta no tempo do movimento livre de um sistema dinâmico em função dos autovalores à direita e à esquerda da matriz de estado A . Ou seja, a resposta do sistema é obtida através de uma combinação linear dos n autovetores distintos associados à matriz de estado A , também chamados de modos de resposta (Kundur, 1994).

Por esse método, a estabilidade do sistema com relação a um determinado ponto de equilíbrio pode ser analisada a partir das raízes do polinômio característico, associados a matriz A , ou seja, por meio dos seus autovalores, da seguinte forma (Kundur, 1994):

- Quando a parte real do autovalor é negativa o ponto de equilíbrio em análise é assintoticamente estável;
- Se, pelo menos um dos autovalores tem parte real positiva para esse ponto de equilíbrio, o sistema é instável;
- Se a parte real do autovalor é nula não é possível afirmar algo sobre o modelo não linear com base no estudo do modelo linearizado.

Assim, a estabilidade do modelo não linear com base no modelo linearizado é determinada pela posição no plano complexo dos autovalores da matriz A , sendo esses mesmos autovalores responsáveis pela caracterização da resposta do sistema por meio da função $e^{\lambda_k t}$, ou seja, o modo de resposta. Se há algum autovalor com parte real positiva, a resposta do sistema é instável pois o mesmo é caracterizado por uma exponencial crescente na resposta da variável de estado caracterizando uma oscilação de amplitude crescente como saída.

Ainda há situações que os autovalores associados ao sistema possuem uma parte real muito pequena. Nesse caso, as oscilações na resposta do sistema poderão ocorrer por um tempo excessivo, podendo ser prejudicial ao sistema. Para verificar se o autovalor está numa posição aceitável o parâmetro normalmente adotado é o seu fator de amortecimento.

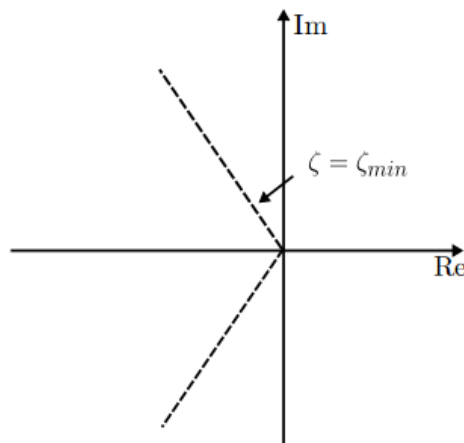


Figura 3 - Lugar geométrico dos polos da matriz A considerado como indicador satisfatório de margem de estabilidade a pequenas perturbações (Adaptado de Fernandes, T. C. C., 2017)

Considerando o autovalor associado a matriz A , $\lambda_k = \sigma_k \pm j\omega_k$, o fator de amortecimento desse autovalor pode ser definido em porcentagem como:

$$\zeta_k = \frac{-\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}} \cdot 100. \quad (3.14)$$

Para determinar se o autovalor está numa posição adequada deve-se verificar se ele apresenta um fator de amortecimento superior a um limite mínimo, devendo esse estar posicionado na região a esquerda do semiplano complexo, dentro do lugar geométrico definido pelas linhas pontilhadas na Figura 3.

Os modos de oscilação estão associados às interações dinâmicas entre as partes elétricas e mecânicas dos respectivos geradores conectados ao sistema, por isso o nome eletromecânico. Para algumas condições de operação eles podem ser estáveis, apresentando, entretanto, um baixo fator de amortecimento, resultando numa resposta temporal mal amortecida. Para os sistemas de transmissão define-se o valor de 5% (Gomes; Martins; Portela, 2003) como sendo o fator de amortecimento mínimo aceitável para todos os modos de oscilação do sistema. Esse critério implica na extinção dessas oscilações em tempo satisfatório de modo a não serem prejudiciais para o sistema.

Por meio do método clássico descrito é possível calcular com precisão qualquer um dos modos de um sistema para uma determinada condição de operação. Entretanto, por ser um método que se baseia em um modelo paramétrico do sistema, o grau de exatidão deste cálculo depende da modelagem correta dos componentes do sistema e do conhecimento dos valores de seus parâmetros.

Como descrito em (Fernandes, T. C. C., 2017) nem sempre o modelo é capaz de reproduzir adequadamente a realidade, sendo importante que eles sejam periodicamente avaliados. Os parâmetros podem sofrer variações devido ao envelhecimento de componentes do sistema, os ganhos de malha podem sofrer reajustes não documentados ou ainda dinâmicas não modeladas decorrentes de interações não previstas de novas formas de controle podem surgir.

Portanto, segundo (Pourbeik, 2010) e (Fernandes, T. C. C., 2017), é importante que os modelos sejam periodicamente avaliados para que se tenha confiança de que o modelo consegue descrever de forma suficientemente adequada o comportamento de um determinado sistema.

3.1.2. Técnicas baseadas em medidas

Várias técnicas de análise linear foram desenvolvidas e testadas para que fosse realizada a identificação dos modos eletromecânicos de um SEP através de sinais adquiridos por meio de unidades de medição fasorial sincronizada (MFS) ao longo das duas últimas décadas (Trudnowski; Pierre, 2009).

As técnicas adotadas para extrair as características modais de sinais amostrados no SEP são, normalmente, provenientes de métodos de processamento de sinais e identificação de sistemas já

existentes na literatura. Segundo (Sanchez-Gasca, 2012), o conceito de identificação dos modos oscilatórios a partir de sinais temporais não é novo e possui inúmeras aplicações em outras linhas de pesquisa da engenharia, como na área de estruturas civis. A inovação desse método consiste na crescente aplicação e adaptação dessas técnicas para identificação dos modos de oscilação do SEP.

As unidades de medição fasorial que atualmente possuem tecnologias cada vez mais avançadas permitem que se tenham altas precisão e taxa de amostragem nos dados medidos, sendo esta medição realizada de forma sincronizada via satélite (GPS), mesmo quando abrange uma grande área distante geograficamente, como é o que ocorre normalmente (Phadke, 2002). Através dos sinais amostrados, características importantes do SEP podem ser identificadas, como frequência e amortecimento dos modos eletromecânicos.

Observando os sinais amostrados da saída do SEP pode-se classificar a resposta dinâmica oscilatória em duas categorias, sendo elas resposta transitória e ambiente. A primeira forma de resposta, ou *ringdown*, é observada após a ocorrência de alguma perturbação no sistema nos primeiros ciclos da oscilação (5 a 20 segundos). Já a segunda categoria está associada a resposta do sistema ao regime normal de operação, no qual o mesmo é estimulado por variações de baixa amplitude.

As técnicas de estimação modal podem ser classificadas em duas categorias principais de acordo com o tipo de dado coletado: *ringdown analysis* e *moder-meter algorithms*. Como a excitação do comportamento dinâmico é diferente em cada categoria, algumas técnicas são mais adequadas para o estudo de sinais transitórios, enquanto outras permitem a análise dos sinais adquiridos durante a operação em regime permanente do sistema.

3.1.2.1. *Ringdown analysis*

As técnicas de estimação modal que se enquadram nessa categoria trabalham na porção “*ringdown*” da resposta do sistema. Esse termo corresponde à resposta transitória do sistema quando sujeito a perturbações que o afastam do seu ponto de equilíbrio, de forma que, depois de removida essa perturbação, o sistema retorne a esse ponto de equilíbrio ou alcance um novo ponto de operação. Alguns exemplos de perturbações: aberturas de linhas de transmissão e ocorrência de curto circuitos. Idealmente, tal termo é definido como resposta livre do sistema. Usualmente a porção do sinal referente à *ringdown* corresponde aos primeiros ciclos da oscilação (5 a 20 segundos) (Trudnowski; Pierre, 2009).

Há vários estudos com relação à análise modal em SEP nessa categoria, sendo essa uma área com certa maturidade na ciência, com grande quantidade de estudos e aplicações propostas. A técnica mais amplamente estudada corresponde ao método de Prony, sendo abordada a primeira vez em 1990 para esse estudo por (Hauer; Demeure; Schare, 1990). Mais tarde, melhorias foram desenvolvidas no método, tornando-o mais preciso e aplicável em múltiplos sinais de saída (Trudnowski; Johnson; Hauer Pierre, 1999).

3.1.2.2. *Moder-meter algorithms*

Diferente da categoria de *ringdown*, os métodos baseados em dados ambientes são aplicados em qualquer porção do sinal, tanto em meio com variações ambiente, quanto na resposta transitória do sistema, ou até mesmo nas duas situações combinadas (Trudnowski; Pierre, 2009). Tal abordagem se fundamenta no fato de que o sistema está sujeito a constantes mudanças aleatórias, de modo que, tais variações típicas podem estimular os modos eletromecânicos (Pierre; Trudnowski; Donnelly, 1997).

As técnicas de estimação em dados ambientes podem ser realizadas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo, as técnicas são aplicadas diretamente nos dados amostrados, enquanto no domínio da frequência é necessário, inicialmente, o cálculo da função de densidade espectral da potência do sinal (Trudnowski; Pierre, 2009).

Uma importante característica dos métodos dessa categoria corresponde ao fato dos mesmos serem minimamente invasivos, uma vez que para sua aplicação não é necessário a ocorrência de uma perturbação no sistema. Assim podem ser utilizados em qualquer porção do sinal e pode ser aplicada para o monitoramento dinâmico do sistema em tempo real, em centros de supervisão, como mencionado em (Fernandes, T. C. C, 2017).

As técnicas de estimação modal em dados ambientes podem ser divididas em técnicas que utilizam blocos de dados e em técnicas recursivas:

- **Bloco de dados:** Nos algoritmos dentro dessa categoria, os modos são estimados a partir de uma janela de dados, de modo que, para cada nova janela de dados uma nova estimação é realizada. Por exemplo, suponha que esteja sendo utilizada uma janela de dados de 5 minutos. Para cada conjunto de dados, um único conjunto de modos é calculado, de forma que todos os dados num conjunto são igualmente ponderados. Assim, a estimativa de novo conjunto de modos pode ser calculada quantas vezes for necessária. Entretanto, cada cálculo requer cinco minutos dos dados mais recentes (Trudnowski et al., 2008).
- **Algoritmos recursivos:** Nos métodos recursivos, os modos estimados são atualizados a cada nova amostra considerada. Assim, uma nova estimativa é realizada a partir da combinação da nova amostra com aquelas obtidas na estimação anterior. Com o intuito de atribuir pesos menores às amostras adquiridas anteriormente, um fator de esquecimento é adotado (Trudnowski et al., 2008).

É importante destacar que a técnica de estimação modal adotada nesse trabalho é classificada como técnica de *ringdown analysis*, uma vez que há necessidade de aplicar uma perturbação no sistema, de forma que esta provoque uma resposta transitória do mesmo, para que tal técnica seja aplicada. Neste

trabalho, a técnica é aplicada a dados adquiridos via simulações sobre um modelo e não à medidas adquiridas de um sistema real.

3.1.2.3. Método de Prony

O Método de Prony é a técnica de categoria *ringdown* que possui o maior número de resultados reportados na literatura e foi introduzida para análise modal em SEP em 1990 pelo Dr. John Hauer no trabalho (Hauer; Demeure; Scharf, 1990).

Ela estima um modelo para os dados amostrados de um sinal, através de uma combinação linear de exponenciais complexas (Marple, 1987), ou seja, é responsável por reconstruir o sinal a partir de um modelo paramétrico, decompondo a resposta temporal em uma soma de senóides amortecidas.

A partir desse modelo, o método permite extrair informações valiosas sobre a combinação modal do sinal, sendo que no caso desse trabalho, isso possibilita identificar de forma direta a frequência, o amortecimento, a fase e a amplitude da oscilação associada ao método eletromecânico.

O método de Prony é uma técnica antiga que foi introduzida há mais de 200 anos. Mais precisamente, foi desenvolvida em 1795, originalmente, por Gaspard Riche, Barão de Prony, o qual apresentou em seu trabalho que as leis que governavam a expansão de vários gases podem ser representadas por uma soma de senóides amortecidas (Marple, 1987).

Em seu conceito original, somente $2p$ amostras deveriam ser utilizadas para estimar o modelo de exponenciais amortecidas, sendo p a ordem do modelo. Aprimoramentos foram realizados e a sua versão mais moderna faz uso do método de mínimos quadrados. Assim, uma quantidade maior de amostras pode ser utilizada no ajuste do modelo (número de amostras maior que $2p$).

Em muitos trabalhos presentes na literatura verifica-se o uso da análise de Prony. Quanto aos trabalhos relacionados à SEP, as principais pesquisas estão relacionadas à identificação de modos eletromecânicos de baixa frequência, tornando-se o seu uso um paradigma na extração de modos eletromecânicos mal amortecidos para análise de estabilidade do sistema a pequenas perturbações. A técnica também é aplicada no ajuste dos PSS e para identificação de funções de transferência do sistema.

Considerando um sinal $x(n)$ representado por N amostras $x(1), \dots, x(N)$, o método de Prony irá estimar $x(n)$ a partir de um modelo formado pela soma de p exponenciais complexas (Marple, 1987) a partir da equação:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p A_k e^{-[(\sigma_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\phi_k]}, \quad (3.15)$$

para $1 \leq n \leq N$, sendo:

- k – k -ésima exponencial complexa que compõe o modelo;
- p – número total de exponenciais que compõe o modelo (ordem do modelo);

- A_k – amplitude da exponencial complexa;
- f_k – frequências em Hz;
- σ_k – taxa de decaimento;
- ϕ_k – fases iniciais em rad,

onde $x(n)$ é o sinal de interesse discretizado e $\hat{x}(n)$ é o sinal estimado, o qual será adquirido por meio do modelo.

Os parâmetros de cada senóide são estimados pelo algoritmo de Prony, possibilitando então que o fator de amortecimento e a frequência associada a cada modo de oscilação identificado possam ser calculados. Dentre essas senóides amortecidas identificadas, uma delas ou mais são resultantes da oscilação eletromecânica, dependendo da quantidade de modos eletromecânicos que podem ser observados naquela saída. Assim, após o procedimento de estimação de cada parâmetro da senóide amortecida que compõe o modelo, é necessário identificar quais delas são referentes a essas interações.

Com o intuito de desenvolver o método de Prony, a equação (3.15) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad (3.16)$$

sendo que,

$$h_k = A_k e^{[j\theta_k]} \quad (3.17)$$

$$z_k = e^{[(\sigma_k + j2\pi f_k)(n-1)T]} \quad (3.18)$$

Observando a equação (3.17) verifica-se que o principal objetivo do método consiste em encontrar os valores de h_k e z_k que permitam que $\hat{x}(n)$ seja igual a $x(n)$ para todas as amostras que compõe o sinal de interesse. Para isso, a equação deve ser desenvolvida para cada amostra que contém o sinal, mas essa demonstração não será feita nesse trabalho.

A aplicação do método de Prony pode ser resumida, de forma geral, em três passos (Hauer; Demeure; Scharf, 1990):

1. Construir um Modelo de Predição Linear Discreta (MPLD) que se ajuste ao sinal;
2. Encontrar as raízes do polinômio característico associado ao MPLD desenvolvido no passo anterior;
3. Usando as raízes calculadas no **passo 2**, determinar a amplitude, a fase inicial, a frequência e a taxa de decaimento de cada modo.

Para se ter uma ideia do modo de oscilação eletromecânica em relação ao sinal de variação de velocidade do rotor, na Figura 4 abaixo é feita uma comparação entre o sinal de variação de velocidade e o modo eletromecânico estimado pelo método de Prony. Os sinais estão em fase e a amplitude de ambos é praticamente a mesma.

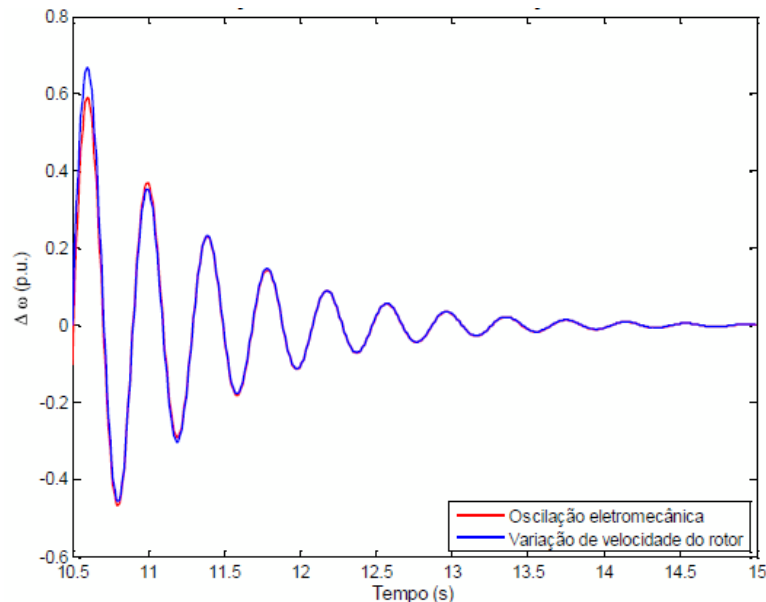


Figura 4 – Comparação entre a reconstrução do sinal a partir da soma dos modos identificados pelo método de Prony e o sinal amostrado (Retirado de Geraldi Júnior, E. L., 2012)

3.2. Tipos de Oscilação e Controladores

As pequenas variações nas cargas do sistema, que ocorrem ao longo do dia, podem excitar os modos de oscilação que são intrínsecos aos sistemas de potência. Esses modos de oscilação podem ser observados no sistema como oscilações nos ângulos e velocidades dos rotores das máquinas e oscilações nos fluxos de potência ativa das linhas, e quando mal amortecidas podem trazer vários danos ao sistema elétrico.

As oscilações podem ser classificadas em alguns tipos e podemos dividi-las em:

- Modos locais ou interplanta: caracterizadas pela troca de energia entre geradores de duas plantas distintas geralmente ocorrente na faixa de 1,2 a 2,0 Hz;
- Modos interárea: envolvem um grupo de geradores oscilando coerentemente contra outro grupo em uma área diferente, e ocorrem geralmente na faixa de 0,2 a 1,2 Hz (Klein et al., 1991);
- Modos intra-planta: ocorrem entre geradores próximos, geralmente localizados na mesma unidade geradora, na faixa de frequência acima de 2,0 Hz (Kundur, 1994);

- Modos da excitatriz: caracterizados por oscilações no sistema e excitação dos geradores (Kundur, 1994);
- Modos torcionais: oscilações das partes (seções) que constituem o eixo do conjunto turbo-gerador (Kundur, 1994).

Tradicionalmente, para mitigar as questões relacionadas as oscilações eletromecânicas de baixa frequência, os modos interárea e local são amortecidos por meio do ajuste de controladores do tipo PSS, os quais são instalados no sistema de excitação dos geradores síncronos e utilizam sinais de realimentação locais tais como velocidade angular e potência elétrica (Larsen; Swann, 1981).

De modo geral, para evitar a perda de sincronismo dos SEPs e melhorar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, são empregados dispositivos de controle por meio da inserção de um sinal estabilizante na malha do regulador de tensão dos geradores. Esses dispositivos devem ser capazes de colocar em fase a componente do torque elétrico com o desvio de velocidade do rotor, compensando o atraso de fase introduzido pelo gerador, sistema de excitação e transmissão nos caminhos de formação do torque elétrico (Kundur, 1994).

Os dois principais controladores usados para uma melhoria significativa do amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos dos SEPs são os Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP, ou PSS, da sigla em inglês) e os sistemas de controle suplementar instalados em equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission System*).

A estrutura do controlador do tipo PSS é composta por um ganho de alimentação K_{PSS} , um filtro passa alta denominado *washout*, o qual protege o controlador da atuação em condições de regime permanente, e o bloco de avanço-atraso utilizado para compensar o atraso de fase que ocorre entre a aplicação da entrada V_s e o efeito produzido pela mesma no balanço de potência da máquina, como mostra a Figura 5. No projeto, a quantidade de blocos de avanço de fase a ser utilizada é determinada de acordo com o ângulo a ser compensado.

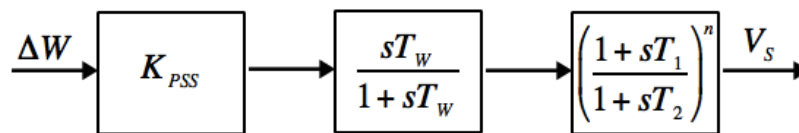


Figura 5 - Estrutura de controle do tipo rede de avanço-atraso

Os dispositivos de controle inicialmente, usavam como sinal de entrada do controlador a medida direta da velocidade angular do rotor (Dandeno et. Al., 1968). Porém, obter uma medida confiável da velocidade do gerador síncrono para aplicações em PSS não é algo simples.

Visando lidar com estes problemas, como robustez, performance e coordenação, métodos novos de projetos foram propostos. Entretanto, mesmo com o desenvolvimento de várias estruturas de PSS,

incluindo controle descentralizado e técnicas de controle modernas, os PSS convencionais de avanço/atraso ainda são os mais utilizados devido ao seu fácil ajuste online e a falta de garantia da estabilidade associada às novas técnicas.

Os métodos clássicos são técnicas de compensação por atraso ou avanço de fase e cálculo de ganho pelo lugar geométrico das raízes ou pelo domínio da frequência. Os requisitos de estabilidade, amortecimento mínimo e tempo de resposta são especificados, porém não há nada relacionado a robustez e coordenação entre as fontes de amortecimento, pois esses controladores são projetados para apenas um ponto de operação.

Neste tipo de projeto, a magnitude e a fase da função de transferência do sistema são determinadas de forma a atender um amortecimento mínimo e fase desejável. Tanto a magnitude quanto o ângulo de fase são determinados para a frequência do modo dominante do sistema, selecionada através do diagrama de Nyquist (Rogers, G., 2000).

Os controladores do sistema de potência então funcionam com a adição de um sinal de amortecimento, proporcional à velocidade do rotor, diretamente ao eixo do mesmo, através da entrada de potência mecânica do gerador. Assim, é adicionado o sinal estabilizante através de um laço de controle que possui atuação rápida o suficiente para amortecer as oscilações.

As técnicas clássicas de controle são de fácil aplicação, implementação e geram controladores efetivos, por isso alguns anos depois os PSS começaram a ser amplamente utilizados nas empresas de geração e transmissão de energia. Além do mais, são usadas para esse propósito por mais de vinte anos e ainda são as técnicas difundidas no ensino das engenharias.

Apesar de amplamente utilizada, essa estrutura apresenta duas desvantagens principais, as quais se tornam cada vez mais relevantes à medida que os sistemas começam a operar perto de seus limites. Primeiramente, todo o projeto dos controladores vem da modelagem Heffron-Phillips, a qual reduz o restante do sistema a um barramento infinito, excluindo dessa forma os modos interárea. Em segundo lugar, há um problema atrelado ao uso da técnica clássica na execução do projeto dos controladores: sua validade é restrita a uma vizinhança do ponto de operação original do sistema, já que este foi linearizado.

4. PROPOSTA DE TRABALHO

Para que as técnicas de identificação dos modos eletromecânicos apresentadas sejam aplicadas nesse trabalho e a avaliação do impacto do ponto de operação no comportamento dos modos eletromecânicos seja realizada é necessário que uma estrutura seja adotada para que os resultados sejam comparados. Assim, nesse capítulo é mostrado todo o procedimento necessário.

4.1. Regime permanente e aplicação do método clássico para identificação dos modos oscilatórios

A primeira etapa consiste em encontrar o ponto inicial de operação do sistema para o caso teste. O fluxo de potência do ponto de operação dará informações de tensão, potência reativa e carga presentes na rede e deve ser encontrado através do *software* ANAREDE.

O ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é o programa mais utilizado no Brasil para análise de SEPs em regime permanente, reunindo programas de fluxo de potência, equivalentes de rede, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e de fluxo e análise de segurança de tensão.

Além disso, é aplicado o primeiro método (baseado em modelo) de identificação dos modos oscilatórios do sistema, o qual é dado pelo *software* PacDyn. Nele, os autovalores provenientes do modelo linearizado do sistema são calculados e identificados aqueles correspondentes aos modos eletromecânicos para esse ponto de operação e os valores são comparados com os valores do *benchmark* do trabalho proposto por (Marco, F. J. D.; Martins. N., 2013).

O PacDyn (Análise e Controle de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência) é voltado para a análise e controle de oscilações resultantes de pequenas perturbações nos SEPs, usando para isso algoritmos para o cálculo de polos, zeros, resíduos, resposta no tempo e resposta em frequência, utilizando técnicas de controle clássico e modernos para a identificação das oscilações crescentes ou pouco amortecidas e o ajuste dos diversos controladores para aumento dos seus amortecimentos.

4.2. Aplicação do Método de Prony para identificação dos modos de oscilação

Para que o método de Prony possa ser aplicado é necessário a aplicação de uma perturbação para análise dos modos oscilatórios através do método de identificação baseado em medidas. Essa perturbação será feita em forma de mudanças na tensão de referência dos reguladores de tensão conectados em cada uma das unidades geradoras, sendo o principal objetivo associado à seleção deste tipo de perturbação o estímulo dos modos de oscilação que caracterizam as oscilações eletromecânicas intra-planta, local (inter-planta) e inter-área. Essas simulações são dadas pelo *software* ANATEM.

O ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) é utilizado para análise dos SEPs em regime dinâmico, podendo ser usado na análise de grandes perturbações, compreendendo períodos de estabilidade transitória e dinâmica, dando ainda a flexibilidade e precisão de modelagem, onde o usuário consegue modelar as características dinâmicas dos seus principais controladores (CDUs, ou, Controles Definidos pelo Usuário).

Após essa etapa, a janela da resposta do sinal de interesse onde as oscilações eletromecânicas devem ser observadas é amostrada, a fim de demonstrar o comportamento dinâmico do sistema sob análise. A variável escolhida para amostragem é a variação de frequência do gerador 2 (em Hz) com relação ao instante $t=0$. As outras variáveis relacionadas aos demais geradores 1 e 3 foram testadas, mas não foram obtidos resultados satisfatórios para essas variáveis. O sucesso no uso do sinal proveniente do gerador 2 pode ter relação com o fato desse ter sido submetido à menor perturbação aplicada, confirmando mais uma vez o estudo da estabilidade a pequenas perturbações.

Para aplicação do método de Prony ainda é preciso determinar qual a janela do sinal a técnica de estimação modal será aplicada para identificar os modos e qual a ordem p do modelo para o caso base. Os critérios utilizados para escolha da ordem, basicamente, foram a comparação com os resultados obtidos via modelo linearizado através do PacDyn, e também, o menor erro absoluto entre a soma dos modos estimados pelo Prony e o sinal de saída amostrado.

Já em relação à janela referente ao sinal amostrado, somente a porção do sinal correspondente ao comportamento predominantemente linear do sistema deve ser levada em consideração, ou seja, apenas a “cauda” do sinal. Sendo assim, o período imediatamente após a aplicação da perturbação deve ser removido do sinal amostrado por conter características não lineares.

Esse processo de escolha do instante adequado que caracterize a cauda do sinal é um processo empírico que envolve o julgamento do engenheiro sobre o momento mais apropriado. Após esse estágio, a técnica de Prony pode ser aplicada.

Porém, um número maior de modos presentes no sistema é resultante da aplicação do método de Prony, sendo necessário, portanto identificar dentre esses modos quais correspondem às oscilações eletromecânicas. Para isso, um conjunto de regras também empíricas é utilizado, sendo elas:

1. Desconsiderar as senóides amortecidas com frequências menores do que 0,1 Hz ou maiores que 10 Hz, ou seja, considerar apenas as senóides com valores de frequência típicos de oscilações eletromecânicas;
2. Excluir as senóides consideradas no passo anterior que possuam amplitude extremamente baixa;
3. Por fim, dentre as senóides que restaram, excluir aquelas com alto fator de amortecimento, pois para este estudo as oscilações eletromecânicas de baixo fator de amortecimento são as que interessam.

4.3. Aplicação nos outros pontos de operação e comparação dos resultados

Após o estabelecimento da janela de amostragem utilizada para aplicar o método de Prony da etapa anterior, o método será aplicado, com os mesmos parâmetros, aos outros pontos de operação do sistema, assim como o método baseado em modelo também será aplicado para esses pontos. A faixa de operação do sistema foi definida por uma curva de carga apresentada no capítulo de resultados pela Figura 8. Para cada hora do dia foi definido um novo ponto de operação do sistema, considerando que o caso base seja correspondente a 62% do carregamento e relativo às 15 horas.

Dessa forma é possível verificar a influência do ponto de operação do SEP no comportamento dos modos oscilatórios eletromecânicos, objetivo principal do trabalho, e ainda analisar a precisão de estimação dos modos através da utilização dessa técnica de decomposição modal, comparando os resultados com os resultados obtidos na primeira etapa através da análise do modelo linearizado do sistema.

4.4. Resumo da metodologia utilizada

No fluxograma abaixo é possível analisar a sequência de passos da metodologia utilizada de forma compacta para melhor entendimento.

Como o objetivo principal desse trabalho não é a simulação do SEP, e sim a identificação dos modos eletromecânicos obtidos a partir da resposta dessa simulação, não será apresentada uma descrição dos modelos dos elementos utilizados no sistema. Todos os dados de modelagem encontram-se no trabalho de (Marco, F. J. D.; Martins. N., 2013).

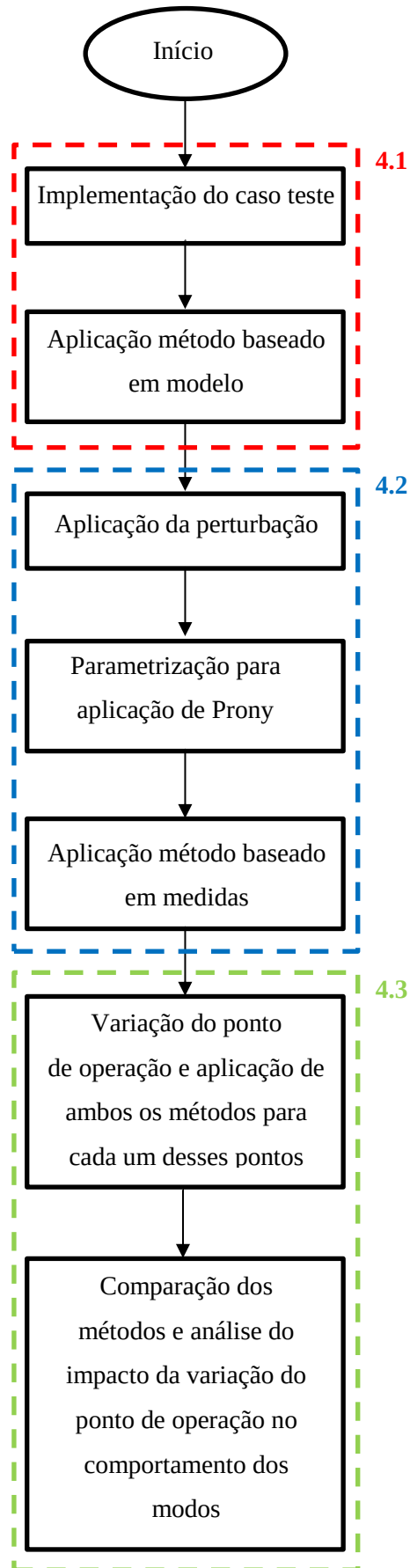


Figura 6 - Fluxograma com metodologia utilizada no trabalho

5. TESTES E RESULTADOS

De acordo com a metodologia exibida no capítulo 4, nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das técnicas clássica e de estimação modal para extração dos modos eletromecânicos do sistema. Os resultados das simulações foram escolhidos de forma a fornecerem embasamento para o suporte às conclusões adquiridas com esse trabalho:

- Resultados referentes à validação entre as duas técnicas de identificação dos modos eletromecânicos do sistema;
- Avaliação da taxa de amortecimento e da frequência dos modos eletromecânicos presentes no sistema em função da variação dos pontos de operação do SEP.

5.1. Cenário de estudo

O modelo utilizado neste trabalho é o mesmo utilizado em (Marco; Martins; Ferraz; 2013). Trata-se de um sistema 3MIB (*Three Machine versus Infinite Bus*, em português, 3 máquinas versus barramento infinito), de três barras contra um barramento infinito. Ele é composto por seis barras, três geradores síncronos (os quais são conectados às barras 1, 2 e 3) e duas cargas (sendo diretamente conectadas às barras 4 e 5). Esse sistema pode ser visto na Figura 6.

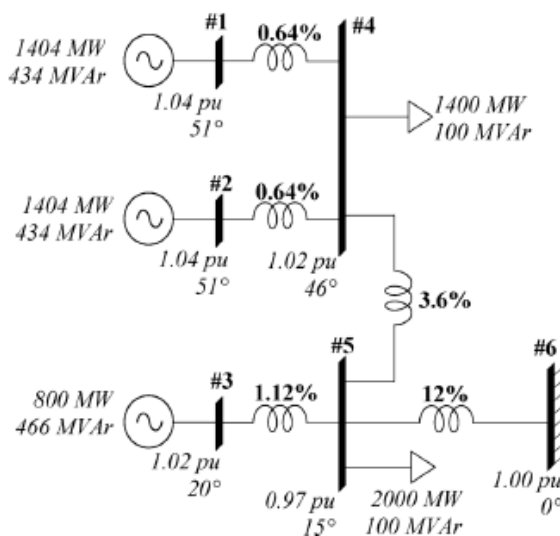


Figura 7 - Diagrama unifilar do sistema teste

Os geradores 1 e 2 são unidades idênticas de uma única planta de geração, sendo modelados como máquinas de polos salientes, enquanto o gerador 3 é descrito por um modelo de máquina de polos lisos. Os três geradores estão equipados com regulador de tensão de primeira ordem. Além disso, os geradores 1 e 2 estão equipados com PSSs, modelo PSS1A com três blocos de avanço atraso. Os dados do sistema são apresentados no Apêndice.

5.2. Carregamento do sistema

A variação do carregamento do sistema nesse trabalho foi feita considerando-se o gráfico de uma curva de carga típica, a qual é mostrada pela Figura 8 e é composta por 24 pontos de operação, cada um correspondendo a uma respectiva hora do dia.

As relações entre carregamento e número do caso estão presentes na Tabela 1.

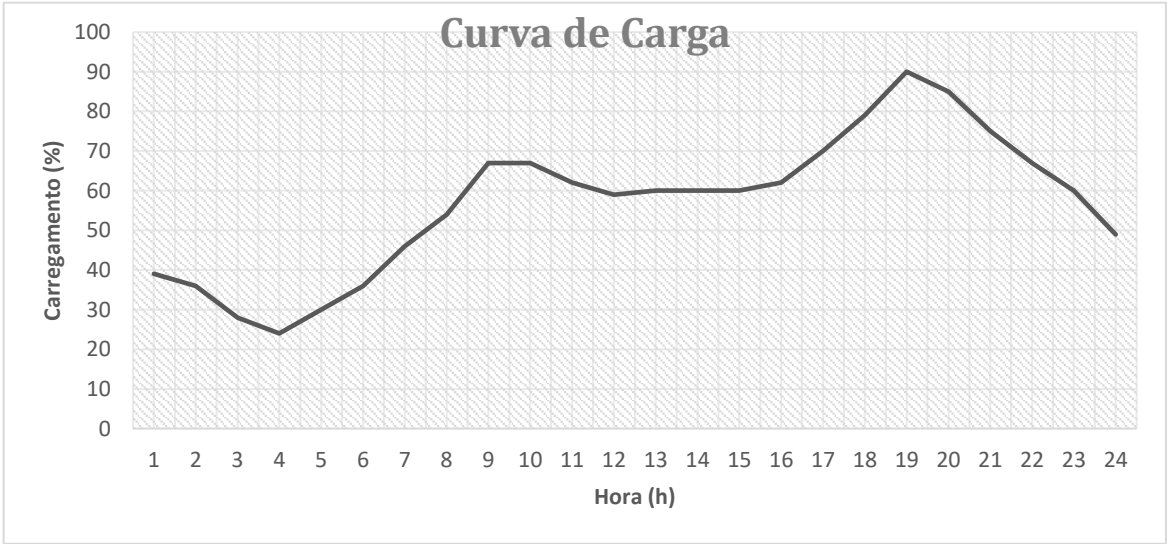


Figura 8 - Curva de carga típica de um dia

Hora	%	Caso	Hora	%	Caso
0	39	5	12	60	10
1	36	4	13	60	10
2	28	2	14	60	10
3	24	1	15	62	11
4	30	3	16	70	13
5	36	4	17	79	15
6	46	6	18	90	17
7	54	8	19	85	16
8	67	12	20	75	14
9	67	12	21	67	12
10	62	11	22	60	10
11	59	9	23	49	7

Tabela 1 - Valores de carregamento correspondente ao horário do dia

5.3. Perturbações utilizadas

As simulações foram feitas com mudanças na tensão de referência dos reguladores de tensão conectados em cada uma das unidades geradoras, aplicadas em $t=1.0$ segundo e retiradas 100ms após seu início, como apresentado na Tabela 2.

Gerador	Variação de V_{REF}
1	+3%
2	-1%
3	-2%

Tabela 2 - Variações aplicadas às tensões de referências

5.4. Aplicação do PacDyn para identificação dos modos oscilatórios do caso base

Para obtenção dos valores de amortecimento e frequência dos modos eletromecânicos do sistema base através do método linearizado baseado em modelo, como mostrado no capítulo 3, foi utilizado o *software* PacDyn, o qual foi considerado como *benchmark* nesse primeiro conjunto de resultados, como apresentado no trabalho de (Marco, F. J. D.; Martins. N., 2013).

Os valores dos modos eletromecânicos obtidos são apresentados na Tabela 3 e podem ser vistos também na Figura 9. Os modos encontrados são, respectivamente, modo intraplanta, modo local e modo interárea.

Modo	$\sigma \pm j\omega$	Freq.(Hz)	$\zeta(\%)$
1	$-3,5796 \pm j12,712$	2,023	27,105
2	$-0,7079 \pm j7,7008$	1,225	9,1538
3	$-0,6634 \pm j2,5133$	0,400	25,522

Tabela 3- Modos eletromecânicos obtidos através do PacDyn para sistema com PSS nos geradores 1 e 2

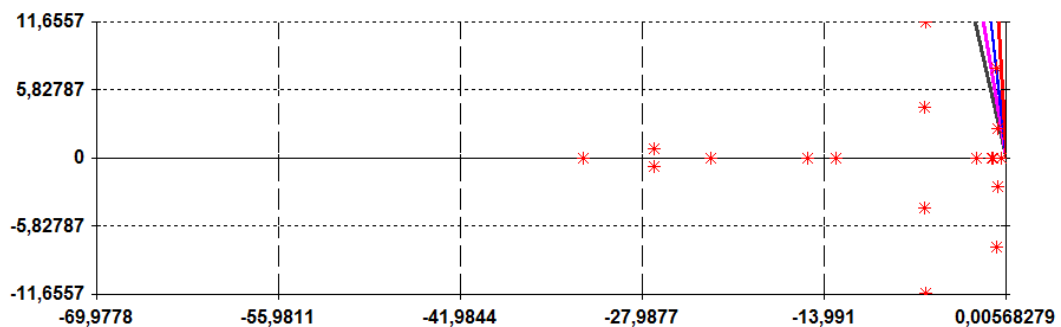


Figura 9 – Autovalores do SEP obtidos através do PacDyn para sistema com PSS nos geradores 1 e 2

5.5. Aplicação do Método de Prony para identificação dos modos oscilatórios do caso base

Depois de realizada a simulação no *software* ANATEM para o sistema base e obtidos os sinais de variação da frequência do gerador (em Hz) para o sistema, utilizou-se o MATLAB para trabalhar com esses sinais.

Para definição da janela de amostragem procurou-se selecionar a parte do sinal em que ficasse evidente o amortecimento. Não era de interesse selecionar uma janela muito ampla, pois a maior quantidade de dados gerada seria desnecessária e resultaria em um esforço adicional na estimação do modo eletromecânico. Assim, selecionou-se um tempo final para a janela de tal forma que os valores de amplitude do sinal para tempos posteriores não possuíssem uma variação significativa.

Como pode ser visto na Figura 10, o tempo final da janela de amostragem é 20s e a amplitude do sinal próximo aos 20s já possui um valor muito pequeno.

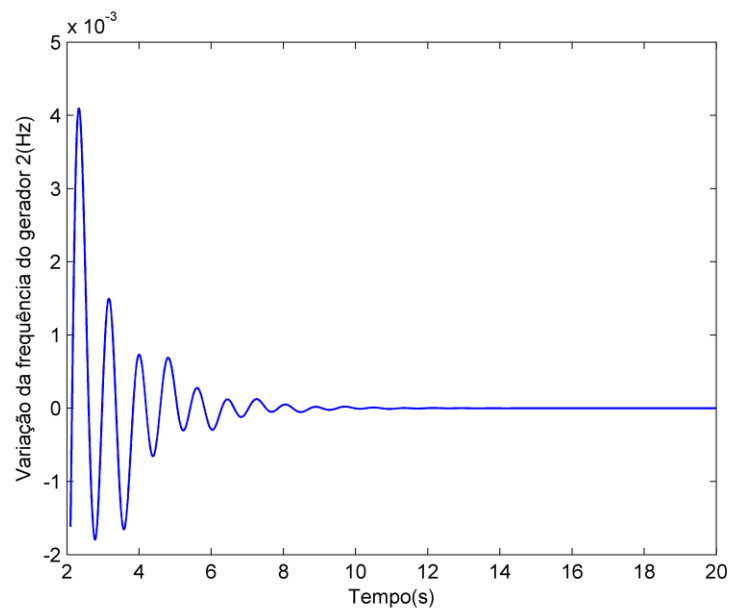


Figura 10 - Janela de amostragem para o sinal do sistema base com PSS descartando intervalo de tempo logo após a aplicação da perturbação

A seleção do tempo inicial da janela de amostragem não considerou o momento de aplicação da perturbação. Na Figura 11 pode-se notar que quando a perturbação é aplicada, ocorre uma deformação da forma de onda que não está presente após os 2,1s. A taxa de amostragem utilizada foi de 0,005s.

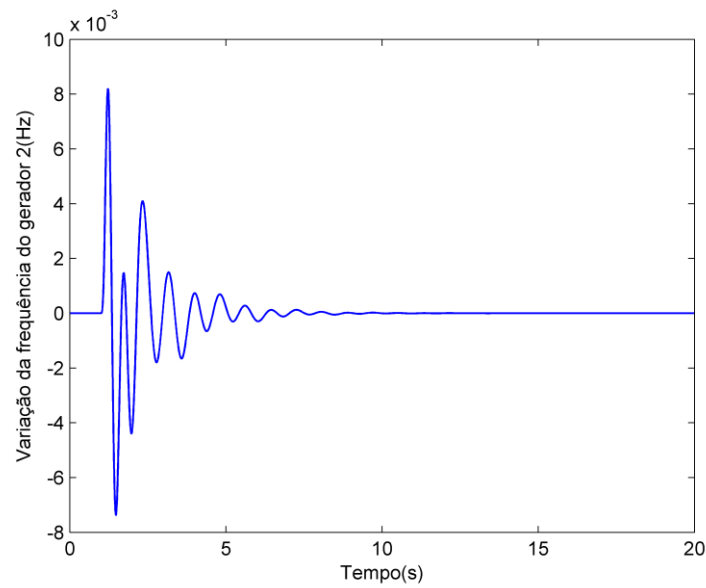


Figura 11 - Janela de amostragem para o sinal do sistema base com PSS considerando o tempo de aplicação da perturbação

Já a escolha da ordem p foi feita com os critérios de comparação com os valores encontrados pelo PacDyn e o menor erro absoluto entre a reconstrução do sinal com base na soma dos modos identificados pelo Prony e o sinal original, sendo o erro descrito pela equação 4.1.

$$Erro = \sum_{k=1}^N (x'_k - x_k)^2 \quad (4.1)$$

onde,

- x'_k – corresponde ao sinal reconstituído, o qual é formado pela soma dos modos eletromecânicos encontrados através de Prony;
- x_k – sinal de entrada original, advindo do ANATEM;

Os valores dos erros em relação às ordens p simuladas podem ser vistos na Tabela 4.

Ordem (p)	Erro Absoluto (10⁻⁷)
70	9,3749
71	2,0765
72	2,2164
73	1,8154
74	1,0324
75	0,9761
76	0,9656
77	1,3965

78	1,5869
79	1,2810
80	1,9915

Tabela 4 - Erro absoluto entre função reconstruída e original em função da ordem p

Quando se observa o sinal referente aos modos eletromecânicos estimados via Prony com o sinal adquirido via simulação no ANATEM verifica-se que eles são muito próximos, como pode ser visto na Figura 12 e Figura 13, onde é possível observar o sinal referente à reconstrução através dos modos eletromecânicos com relação ao sinal do desvio da frequência do gerador escolhido e essa mesma comparação vista um pouco mais de perto.

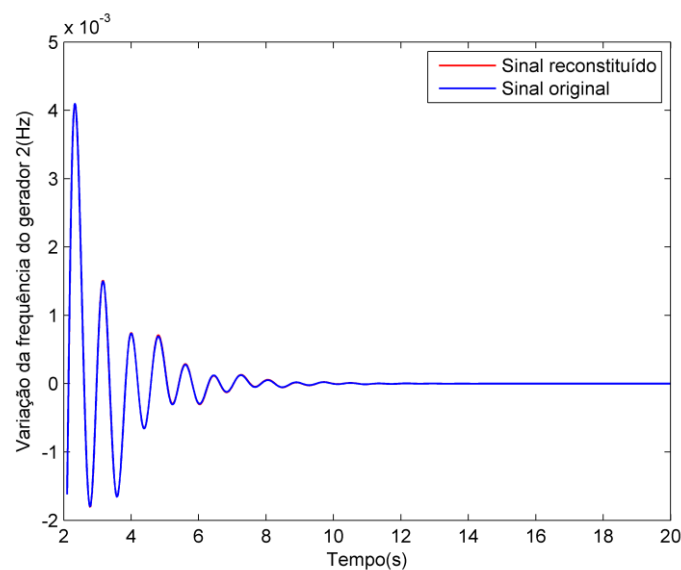


Figura 12 - Comparação entre o sinal referente aos modos eletromecânicos estimados pelo Prony e o sinal original extraído do ANATEM

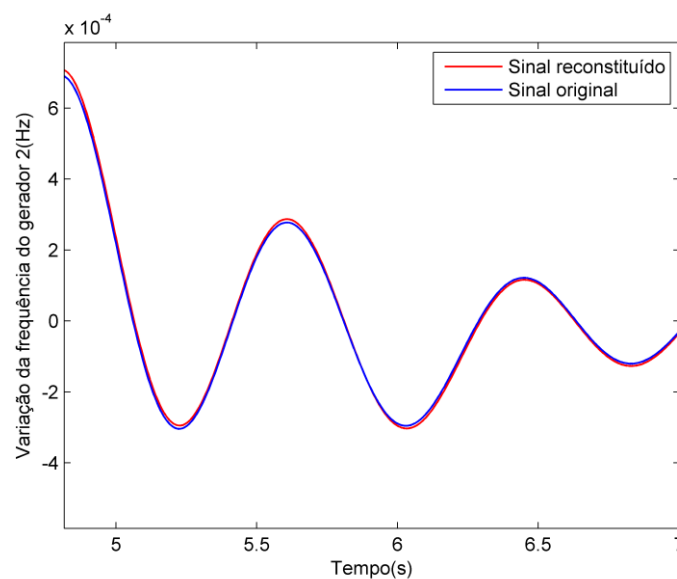


Figura 13 - Comparação entre o sinal referente aos modos eletromecânicos estimados pelo Prony e o sinal original extraído do ANATEM com vista aproximada

5.6. Aplicação do Método de Prony para identificação dos modos oscilatórios nos outros pontos de operação

Após a aplicação da técnica de estimação modal para todos os pontos de carregamento do sistema usando os mesmos parâmetros utilizados para o caso base, os modos identificados sobre esse conjunto de dados adquiridos a partir do sinal de variação da frequência do gerador 2 (em Hz) com relação ao instante $t=0$ são descritos e comparados aos valores encontrados através das simulações no PacDyn e mostrados na Tabela 5.

Caso	PacDyn			Prony		
	$\sigma \pm j\omega$	Freq. (Hz)	$\zeta(\%)$	$\sigma \pm j\omega$	Freq. (Hz)	$\zeta(\%)$
1	$-2,7595 \pm j9,8417$	1,566	26,998	$-2,7295 \pm j10,036$	1,597	26,254
	$-1,1928 \pm j7,6139$	1,212	15,477	$-1,0451 \pm j7,7333$	1,231	13,393
	$-0,2605 \pm j2,6100$	0,415	9,9328	$-0,3729 \pm j2,6371$	0,419	14,005
2	$-2,9228 \pm j10,1580$	1,617	27,652	$-3,6479 \pm j11,0573$	1,760	31,330
	$-1,1032 \pm j7,7224$	1,229	14,143	$-1,1153 \pm j7,8781$	1,254	14,017
	$-0,2998 \pm j2,6123$	0,416	11,403	$-0,4642 \pm j2,2815$	0,363	19,939
3	$-2,9953 \pm j10,3150$	1,642	27,887	$-3,3292 \pm j11,5059$	1,831	27,795
	$-1,0531 \pm j7,7707$	1,237	13,429	$-1,0344 \pm j7,9564$	1,266	12,892
	$-0,3195 \pm j2,6131$	0,416	12,135	$-1,1441 \pm j1,6077$	0,256	57,980
4	$-3,1778 \pm j10,7740$	1,715	28,290	$-2,2901 \pm j12,0744$	1,922	18,634
	$-0,8922 \pm j7,8920$	1,256	11,234	$-0,9545 \pm j7,9635$	1,267	11,900
	$-0,3787 \pm j2,6141$	0,416	14,339	$-0,5404 \pm j2,0271$	0,323	25,759
5	$-0,4333 \pm j7,8877$	1,255	5,4848	Não foi possível estimar		
	$-1,5454 \pm j7,0622$	1,124	21,376			
	$-0,1802 \pm j1,5971$	0,254	11,210			
6	$-3,3885 \pm j11,4780$	1,827	28,314	$-4,2695 \pm j11,6741$	1,858	11,674
	$-0,6252 \pm j8,0320$	1,278	7,7602	$-0,6271 \pm j8,0292$	1,278	8,029
	$-0,4780 \pm j2,6076$	0,415	18,031	$-0,4067 \pm j2,5506$	0,406	2,551
7	$-3,4338 \pm j11,6710$	1,858	28,225	$-4,4329 \pm j12,0511$	1,918	34,523
	$-0,5510 \pm j8,0629$	1,283	6,8178	$-0,5578 \pm j8,0613$	1,283	6,903
	$-0,5077 \pm j2,6033$	0,414	19,142	$-0,4096 \pm j2,5781$	0,410	15,692
8	$-3,4955 \pm j11,9750$	1,906	28,022	$-4,4682 \pm j12,4014$	1,974	33,897
	$-0,4353 \pm j8,1059$	1,290	5,362	$-0,4328 \pm j8,1071$	1,290	5,331
	$-0,5569 \pm j2,5927$	0,413	21,002	$-0,4889 \pm j2,5119$	0,399	19,105
9	$-3,5424 \pm j12,2510$	1,950	27,778	$-4,0795 \pm j12,5528$	1,998	30,908
	$-0,3317 \pm j8,1400$	1,295	4,071	$-0,3129 \pm j8,1502$	1,297	3,837
	$-0,6057 \pm j2,5796$	0,411	22,859	$-0,6102 \pm j2,3120$	0,368	25,519
10	$-3,5506 \pm j12,3060$	1,958	27,723	$-4,0040 \pm j12,029$	1,914	12,029
	$-0,3113 \pm j8,1454$	1,296	3,819	$-0,2750 \pm j8,1575$	1,298	8,1575
	$-0,6155 \pm j2,5751$	0,410	23,247	$-0,8599 \pm j2,2208$	0,353	2,2208
11	$-3,5796 \pm j12,712$	2,023	27,105	$-4,1613 \pm j13,7410$	2,187	28,984
	$-0,7079 \pm j0,7008$	1,225	9,154	$-0,7023 \pm j7,6936$	1,224	9,091
	$-0,6634 \pm j2,5133$	0,400	25,522	$-0,6330 \pm j2,4710$	0,393	24,818

12	-3,5947±j12,6480	2,013	27,339	Não foi possível estimar		
	-0,1886±j8,1759	1,301	2,306			
	-0,6839±j2,5467	0,405	25,937			
13	-3,6091±j12,7820	2,034	27,174	-17,0926±j19,8313	3,156	65,287
	-0,1430±j8,1833	1,302	1,747	-2,5510±j11,2109	1,784	22,187
	-0,7136±j2,5320	0,403	27,127	-0,1203±j8,2496	1,313	1,458
14	-3,6273±j12,9880	2,067	26,900	-6,3380±j23,1809	3,689	23,181
	-0,0750±j8,1872	1,303	0,916	-3,2966±j12,7238	2,025	12,724
	-0,7641±j2,5009	0,398	29,219	-0,0751±j8,2143	1,307	8,214
15	-3,6378±j13,1370	2,091	26,686	-2,3278±j23,4852	3,738	9,833
	-0,0308±j8,1793	1,302	0,377	-5,7653±j10,8518	1,727	46,917
	-0,8059±j2,4703	0,393	31,013	-0,0269±j8,1901	1,303	0,3286
16	-3,6495±j13,337	2,123	26,394	-16,2288±j16,8150	2,676	16,815
	-0,0212±j8,1484	1,297	-0,261	-0,1111±j16,3596	2,604	16,360
	-0,8721±j2,4178	0,385	33,929	-0,0236±j8,1495	1,297	8,149
17	-3,6563±j13,481	2,146	26,175	-5,3232±j34,5520	5,499	15,227
	-0,0523±j8,0956	1,288	-0,646	-0,3747±j20,9967	3,337	1,787
	-0,9332±j2,3620	0,376	36,746	0,0529±j8,0931	1,288	-0,653

Tabela 5 - Comparação entre os resultados obtidos entre o software PacDyn e via Prony quando aplicado sobre os dados adquiridos através de simulações no ANATEM

Através da Tabela 5 é possível notar que para os casos 5 e 12, os parâmetros escolhidos para aplicação do método de Prony não foram bem-sucedidos. Os modos que o Prony identifica para esses dois casos possuem amplitudes muito pequenas, que não podem ser levadas em consideração como os modos eletromecânicos que estão presentes no sistema. Assim, fez-se necessário uma nova escolha de parâmetros para esses dois casos.

O novo intervalo de tempo utilizado será de 2,1s a 10s e a nova ordem será diferente para cada um dos casos, levando em consideração novamente o menor erro absoluto entre a reconstituição do sinal através da soma dos modos identificados e o sinal original de entrada, além dos valores encontrados no método baseado em modelo, como mostra a Tabela 6 a seguir.

Ordem (p)	Caso 5	Caso 12
	Erro Absoluto (10 ⁻⁵)	Erro Absoluto (10 ⁻⁵)
34	1,5125	2,5778
35	1,4121	3,0072
36	1,5321	2,7651
37	2,0260	2,4108
38	2,7916	1,8237

Tabela 6- Erro absoluto entre função reconstruída e original em função da ordem p para os casos não estimados anteriormente

Os valores dos modos eletromecânicos obtidos através dos novos parâmetros são apresentados na Tabela 7.

Caso	Prony		
	$\sigma \pm j\omega$	Freq. (Hz)	$\zeta(\%)$
5	$-0,4127 \pm j7,7243$	1,229	5,3357
	$-3,2428 \pm j7,6697$	1,221	38,942
	$-1,0493 \pm j2,0412$	0,325	45,720
12	$-1,9399 \pm j17,0984$	2,721	11,273
	$-0,1921 \pm j8,1618$	1,299	2,353
	$-1,0071 \pm j3,2971$	0,525	29,213

Tabela 7 - Modos eletromecânicos obtidos através do PacDyn para os casos 5 e 12

5.7. Comparação entre os dois métodos e análise da influência do ponto de operação no comportamento dos modos eletromecânicos

A variação dos modos eletromecânicos e a comparação entre os métodos aplicados pode ser vista através das Figuras 14 a 19 abaixo, sendo os modos representados separadamente para uma melhor visualização.

As Figuras 14 e 15 são relacionadas ao Modo 1 e mostram que para toda a faixa de operação esse modo é bem amortecido. Esse fato pode ser observado através dos fatores de amortecimento que se encontram todos acima do limiar satisfatório de amortecimento de um controlador, ou seja, todos os modos possuem fator de amortecimento acima de 5%.

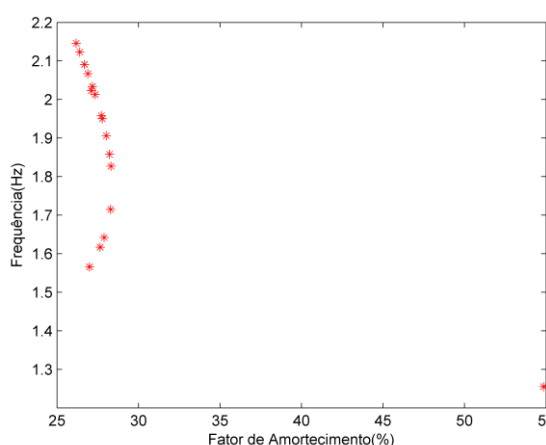


Figura 15 – Variação do primeiro modo eletromecânico identificado pelo PacDyn

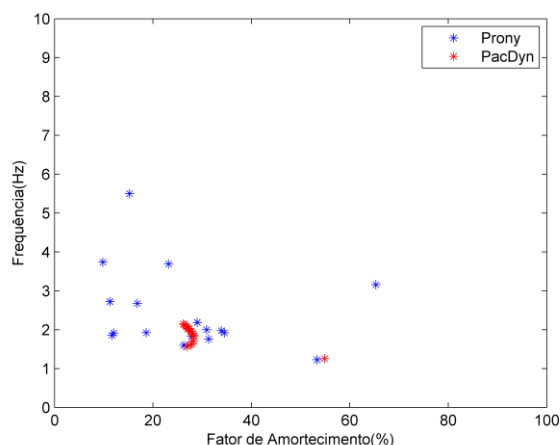


Figura 14 - Comparação entre o primeiro modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação

Já as Figuras 16 e 17 são relacionadas ao Modo 2 e mostram que esse segundo modo não é bem amortecido para toda a faixa de operação. Esse fato pode ser observado através dos fatores de

amortecimento que se encontram muito próximos a 0%, ou seja, os controladores não são efetivos para toda a faixa de operação do sistema.

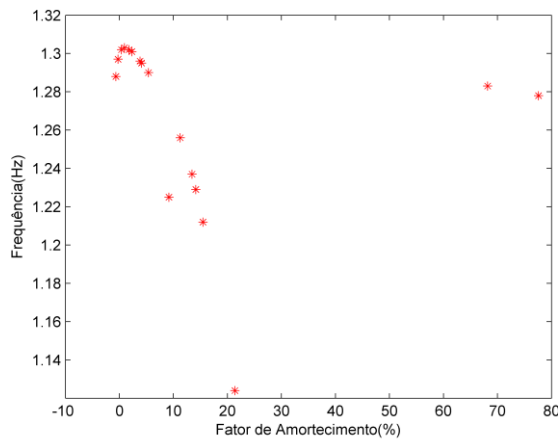


Figura 17 - Variação do segundo modo eletromecânico identificado pelo PacDyn

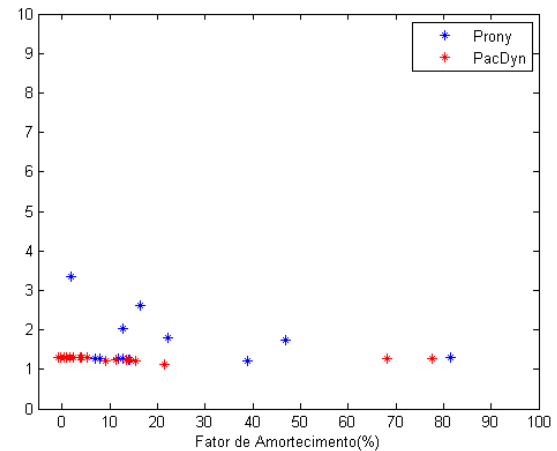


Figura 16 - Comparação entre o segundo modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação

Pode-se perceber com a análise das Figuras 18 e 19, o terceiro e último modo eletromecânico do sistema elétrico, o Modo 3. Também é possível notar que a variação no ponto de operação mostrou que o modo, assim como o Modo 1, é estável para toda a faixa de operação, o que também pode ser observado por todos os valores de amortecimento acima de 5%.

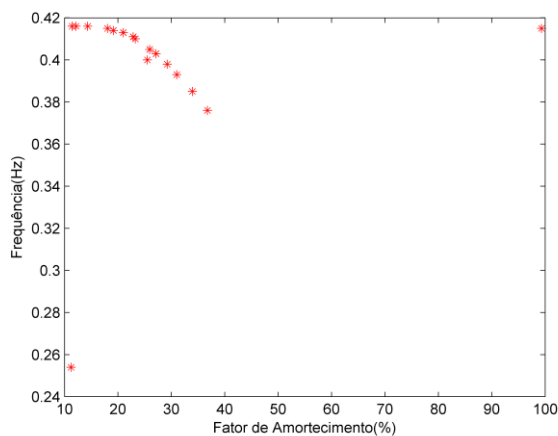


Figura 18 - Variação do terceiro modo eletromecânico identificado pelo PacDyn

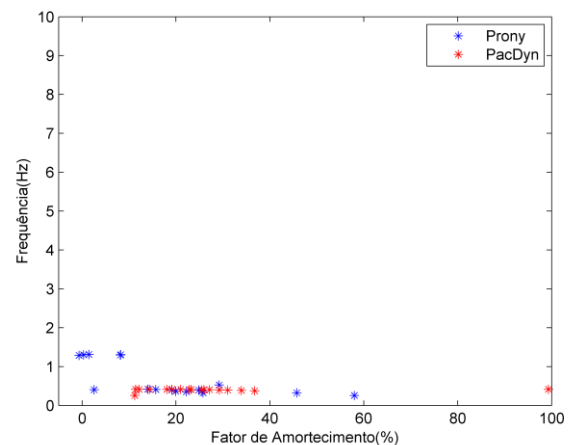


Figura 19 - Comparação entre o terceiro modo eletromecânico identificado pelo método de Prony e pelo PacDyn para todos os pontos de operação

Portanto, após análise das Figuras 14, 16 e 18 que comprovam o comportamento dos modos eletromecânicos através da variação do ponto de operação do sistema é possível confirmar a presença

de três modos, dentre os quais apenas dois deles são amortecidos para toda a faixa de operação, o modo 1 e o modo 3.

Além da análise do comportamento dos modos de oscilação presentes no sistema, é possível notar, ao comparar os dois métodos de identificação, através das Figuras 15, 17 e 19, que o método baseado em modelo (PacDyn) para o caso analisado, onde todos os parâmetros do sistema são conhecidos e tem-se acesso a todos os componentes do SEP, apresenta-se mais preciso que o método baseado em medidas (Prony).

O método de Prony, portanto, mostra alguns desvios, principalmente, no cálculo das taxas de amortecimento dos modos oscilatórios, mostrando que a técnica apresenta dificuldades para estimar modos bem amortecidos.

6. CONCLUSÕES

Conforme descrito ao longo do texto, esse trabalho de conclusão propôs avaliar a influência do ponto de operação sobre o comportamento dos modos oscilatórios em um sistema elétrico de potência, aplicando e comparando as técnicas de linearização utilizadas atualmente para identificação dos modos eletromecânicos: as técnicas baseadas em medida e as técnicas baseadas em modelo.

Quanto ao comportamento dos modos eletromecânicos a partir da variação do ponto de operação do sistema, pode-se observar a presença dos três modos já esperados para o tipo de estímulo de entrada: o Modo 1, ou modo intraplanta, o qual mostra a troca de energia entre os dois geradores que estão na mesma planta, no caso, geradores 1 e 2; o Modo 2, ou modo local/interplanta, representando a troca de energia entre as duas plantas do sistema, ou seja, geradores 1 e 2 oscilando contra o gerador 3 e o Modo 3, interárea, onde é possível perceber a troca de energia entre os três geradores e o barramento infinito;.

Assim, a partir da análise do comportamento dos modos eletromecânicos em relação à variação do ponto de operação do sistema conclui-se, portanto, que o primeiro e o terceiro modo são bem amortecidos para toda a faixa de operação, enquanto o segundo modo é instável para alguns pontos de operação do SEP.

Quanto à aplicação dos métodos de identificação baseados em modelo e medidas nota-se que ambos possuem pontos positivos e limitações. O método baseado em modelo mostra-se a opção mais precisa e confiável, desde que seja de conhecimento a natureza do sistema analisado. Já o método baseado em medidas, representado pela decomposição modal feita por Prony, é uma opção eficaz quando não se tem detalhes da natureza do sistema, já que analisa apenas o sinal de saída do mesmo. Porém, ele mostra-se sensível ao ajuste dos parâmetros iniciais, como a janela de amostragem, a escolha do tempo após a perturbação, a ordem adequada e o número de amostras, mostrando que a calibração do método é empírica e complexa de ser feita de modo completamente preciso. Além disso, a técnica apresenta dificuldades na estimação de modos bem amortecidos.

Diante dos resultados obtidos com as simulações computacionais desse trabalho ainda pode-se observar que os PSS utilizados nesse SEP não foram ajustados para amortecer adequadamente os modos oscilatórios para a faixa de operação estudada, o que fica bem evidente nos pontos em que o sistema está mais carregado, característica das horas de pico do consumo de energia do dia.

Os modos que não possuem um amortecimento considerado seguro podem ser observados pelas taxas de amortecimento menores que 5% identificadas pelo PacDyn, incluindo modos de instabilidade que são observados pelos valores negativos de amortecimento.

Por perspectivas futuras deste trabalho, tem-se a possibilidade de regulação dos controladores presentes no SEP, de forma que estes estabilizem os modos eletromecânicos presentes em todos os casos de operação. Para isso, as técnicas de identificação dos modos oscilatórios baseadas em modelo e

medidas podem ser utilizadas em conjunto no estudo de estabilidade a pequenas perturbações, aumentando assim confiabilidade de operação do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORBELY, A. M.; KREIDER, J. F. **Distributed generation: the power paradigm for new millennium**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

(CEPEL), C. **Análise de Transitórios Eletromecânicos (Anatem)** v10.4.2/2009. 2009

DANDENO, P. L. et al. Effect of high-speed rectifier excitation systems on generator stability limits. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1970. PAS-89, n. 7, p. 1670-1678, sept 1970. ISSN 0018-9510.

DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v. PAS-88, n. 4, p. 316-329, april 1969.

EDWARDS, F.; DUDGEON, G.; MCDONALD, J.; LEITHEAD, W. Dynamics of distribution networks with distributed generation. In: **Power Engineering Society Summer Meeting**, 2000. IEEE, 2000. Anais. . . [S.l.: s.n.], 2000. v.2, p.1032 –1037 vol. 2.

FERNANDES, T. C. C. **Aplicação de técnicas de estimação modal para análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas de distribuição com geração distribuída**. 2012. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FERNANDES, T. C. C. **Estimação de Velocidade Angular de Geradores Síncronos para Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Potência**. 187 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

GERALDI JUNIOR, E. L. **Estimação modal para medidas com ruído em sistemas com geração síncrona distribuída**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GOMES, S.; MARTINS, N.; PORTELA, C. Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2003. v. 18, n. 2, p. 747-752, May 2003. ISSN 0885-8950.

HAUER, J.; DEMEURE, C.; SCHARF, L. Initial results in prony analysis os power system response signals. **Power Systems, IEEE Transaction on**, 1990. v. 5, n. 1, p. 80-89, feb 1990. ISSN 0885-8950.

HUANG, G.; ZHAO, L.; SONG, X. A New Bifurcation Analysis for Power System Dynamic Voltage Stability Studies. **Power Engineering Society Winter Meeting**, New York, NY, v.2, Janeiro 2002.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York, NY: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. et al. Practical utility experience with and effective use of power system stabilizers. In: **Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3, p. 1777-1785 vol.3
KUNDUR, P. et al. Definition and classification os power system stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 2004. v. 19, n. 3, p. 1387-1401. ISSN 0885-8950.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CA- NIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.19, n.3, p.1387 – 1401, aug. 2004.

KUO, B. C. **Automatic control systems**. Englewood Cliffs, NF: Prentice Hall, 1995.

LARSEN, E.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers part iii: Practical considerations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981. PAS-100, n. 6, p. 3034-3046, June 1981. ISSN 0018-9510.

MARPLE, S. L. **Digital Spectral Analysis with Applications**. San Diego, California: Prentice Hall, 1987.

MARCO, F. J. D.; MARTINS, N. **Report on the Three-Machine Infinite-Bus (3MIB) System**. IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls. Version 2, July 2013.

MARCO, F. J. D.; MARTINS, N.; FERRAZ, J. C. R. An automatic method for power system stabilizers phase compensation design. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013. V, 28, n. 2, p. 997-1007, May 2013. ISSN 0885-8950.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo, SP: Peardon Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, R. V.; KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G. **Automatic tuning method for the design of supplementary damping controllers for flexible alternating current transmission system devices**. IET - Generation Transmission & Distribution, v. 3, n. 10, p. 919–929, October 2009.

PHADKE, A. Synchronized phasor measurements-a historical overview. In: **Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 476-479 vol.1.

PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D.; DONNELLY, M. Initial results in eletromechanical mode identification from ambient data. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 1997. v. 12, n. 3, p. 1245-1251, aug 1997. ISSN 0885-8950.

POURBEIK, P. Approaches to validation of power system models for system planning studies. In: **Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1-10. ISSN 1944-9925

RAMOS, R. A. **Procedimento de Projeto de Controladores Robustos para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ROGERS, G. Demystifying power system oscillations. **Computer Applications in Power, IEEE**, [S.l.], v.9, n.3, p.30-35, jul 1996.

ROGERS, G. **Power System Oscillations**. USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.

SALIM, R. H. **Uma nova abordagem para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores síncronos distribuídos**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP.

SANCHEZ-GASCA (Ed.), J. J. **Identification of eletromechanical models in power systems**. [S.l.]: IEEE Task Force on Identification of Eletromechanical Modes, 2012.

SANTOS, C. J. R. dos. **Método Rápido para Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão Considerando os Limites de Potência Reativa de Geradores**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

SILVA, Marcelo Santos. **Estudo comparativo do modelo linear de Heffron-Phillips e modelo de sensibilidade de potência com a inclusão de dispositivos FACTS SVC e TCSC**. 2008. 121 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica, Automação). Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.^[1]_{SEP}

TRUDNOWSKI, D.; JHONSON, J.; HAUER, J. Making Prony analysis more accurate using multiple signals. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 226-231, feb 1999.

TRUDNOWSKI, D.; PIERRE, J. Overview of algorithms for estimating swing models from measured responses. In: **Power Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1-8. ISSN 1944-9925.

TRUDNOWSKI, D.; PIERRE, J.; ZHOU, N.; HAUER, J.; PARASHAR, M. Performance os Three Mode-Meter Block-Processing Algorithms for Automated Dynamic Stability Assessment. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.]; v. 23, p. 680-690, may 2008.

APÊNDICE

Sistema 3 Máquinas *versus* Barramento Infinito

O sistema 3 máquinas *versus* barramento infinito (3MIB) é composto por 3 geradores e 6 barras. Tal sistema foi proposto com o objetivo de mostrar a eficiência do PSS em contribuir com amortecimento de modos eletromecânicos de diferente natureza: desde o modo intraplanta ao modo interárea.

O diagrama unifilar do sistema é descrito na Figura 20 abaixo, onde também são fornecidos os dados de barra e de linha desse sistema, sendo as impedâncias dadas na base de 100MVA, enquanto as potências ativa e reativa de cada barra são especificadas em MW e MVar, respectivamente.

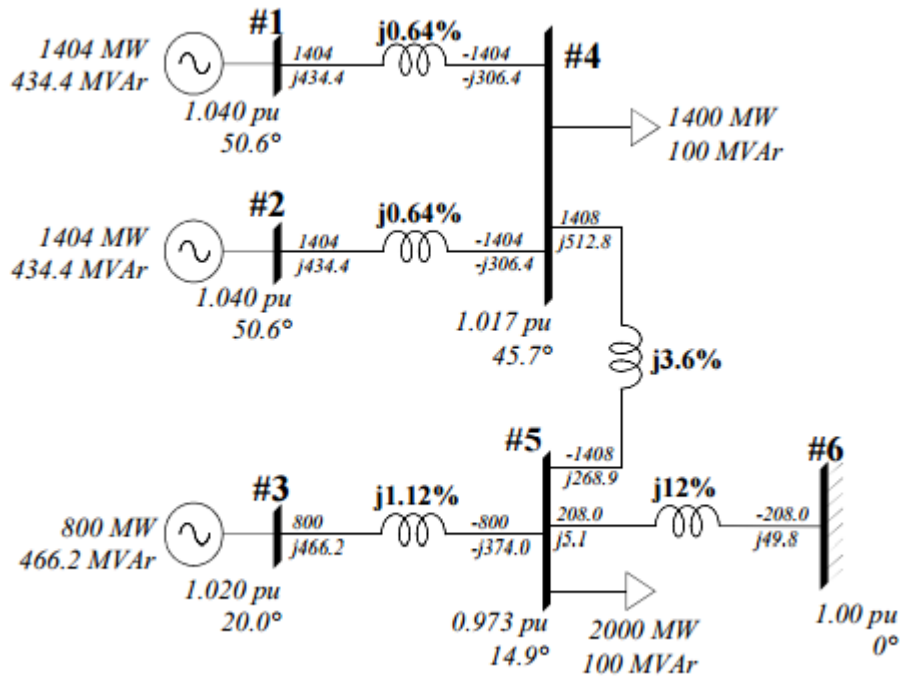


Figura 20 - Diagrama unifilar do sistema teste

a) Geradores

Os dados dos três geradores conectados a esse sistema são fornecidos na Tabela 8 abaixo.

Unid.	H	x''_d	x''_q	x'_d	x'_q	x_d	x_q	x_l	T''_{do}	T''_{qo}	T'_{do}	T'_{qo}	R_a
1	4,5	0,29	0,29	0,36	0,36	0,89	0,66	0,28	0,06	0,094	5,1	0,06	0,0019
2	4,5	0,29	0,29	0,36	0,36	0,89	0,66	0,28	0,06	0,094	5,1	0,06	0,0019
3	3,86	0,34	0,34	0,49	0,80	1,72	1,68	0,27	0,048	0,066	5,3	0,048	0

Tabela 8 - Parâmetros dos geradores

b) AVR

Os dados dos AVRs são apresentados na Tabela 9 abaixo.

Unid.	K_A	T_A
1	100	0,05
2	100	0,05
3	150	0,05

Tabela 9 - Parâmetros dos AVRs

c) Estabilizadores de Potência

Os dados dos controladores são apresentados na Tabela 10 abaixo.

Unid.	K_{pss}	T_ω	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	V_{MIN}	V_{MAX}
1	35	3	0,142	0,014	0,142	0,014	0,158	0,641	-0,3	0,3
2	35	3	0,142	0,014	0,142	0,014	0,158	0,641	-0,3	0,3

Tabela 10 - Parâmetros dos controladores do tipo PSS

d) Reguladores de Velocidade

Os valores dos parâmetros dos reguladores de velocidade conectados às máquinas do sistema são exibidos na Tabela 11 abaixo.

Unid.	R	T_1	T_2	T_3
1	0,05	0,20	2,0	6,0
2	0,05	0,20	2,0	6,0
3	0,05	0,20	2,0	6,0

Tabela 11 - Parâmetros dos reguladores de velocidade

e) Dados de geração e carga para os pontos de operação do sistema

Os parâmetros de geração e carga foram calculados proporcionalmente considerando o sistema base como carregado 62% e sendo correspondente às 15 horas e encontram-se na Tabela 13.

Hora	Carga 1		Carga 2		Gerador 1		Gerador 2		Gerador 3	
	P_1	Q_1	P_2	Q_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	P_3	Q_3
0	881	63	1259	63	794,2	150,60	794,2	150,60	681,1	148
1	813	59	1162	59	733,1	134,40	733,1	134,40	628,7	126
2	633	46	904	46	570,2	95,70	570,2	95,70	489,0	73,2
3	542	39	775	39	488,8	79,30	488,8	79,30	419,1	51
4	678	49	968	49	610,9	104,50	610,9	104,50	523,9	85,1
5	813	59	1162	59	733,1	134,40	733,1	134,40	628,7	126
6	1039	75	1484	75	936,8	194,90	936,8	194,90	803,3	209
7	1220	88	1742	88	1100,0	254,20	1100,0	254,20	943,1	291

8	1513	109	2162	109	1364,0	373,10	1364,0	373,10	1170,0	457,8
9	1513	109	2162	109	1364,0	373,10	1364,0	373,10	1170,0	457,8
10	1400	100	2000	100	1404,0	434,40	1404,0	434,40	800,0	466,20
11	1333	96	1904	96	1201,0	295,80	1201,0	295,80	1030,0	348,6
12	1355	97	1936	97	1222,0	305,00	1222,0	305,00	1048,0	362
13	1355	97	1936	97	1221,9	305,00	1221,9	305,00	1047,8	362
14	1355	97	1936	97	1221,9	305,00	1221,9	305,00	1047,8	362
15	1400	100	2000	100	1262,6	434,40	1404,0	434,40	800,0	466,20
16	1581	113	2259	113	1425,0	404,50	1425,0	404,50	1222,0	502,4
17	1784	128	2549	128	1609,0	514,90	1609,0	514,90	1380,0	661,90
18	2033	146	2904	146	1833,0	681,10	1833,0	681,10	1572,0	907,7
19	1920	138	2742	138	1731,0	600,00	1731,0	600,00	1484,0	786,4
20	1694	121	2420	121	1527,0	462,80	1527,0	462,80	1310,0	506,1
21	1513	109	2162	109	1364,4	373,10	1364,4	373,10	1170,1	457,8
22	1355	97	1936	97	1221,9	305,00	1221,9	305,00	1047,8	362
23	1107	80	1581	80	997,9	216,00	997,9	216,00	855,7	237,9

Tabela 12 - Valores de carga e geração calculados para todos os pontos de operação do sistema