

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Felipe Fawzi Sakran

**Análise da influência dos parâmetros do PSS nos modos
eletromecânicos em um Sistema Elétrico de Potência**

São Carlos

2018

Felipe Fawzi Sakran

Análise da influência dos parâmetros do PSS nos modos eletromecânicos em um Sistema Elétrico de Potência

Monografia apresentada ao Curso de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos

**São Carlos
2018**

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S313a	Sakran, Felipe Fawzi Análise da influência dos parâmetros do pss nos modos eletromecânicos em um sistema elétrico de potência / Felipe Fawzi Sakran; orientador Rodrigo Andrade Ramos. São Carlos, 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018. 1. Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência. 2. Power System Stabilizer. 3. Fatores de Participação. 4. Oscilações eletromecânicas. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Felipe Fawzi Sakran

Título: "Análise da influência dos parâmetros do PSS nos modos eletromecânicos em um Sistema Elétrico de Potência"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29/06/2018,

com NOTA 9,5 (NOVE, CINCO), pela Comissão Julgadora:

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

*Mestre Murilo Eduardo Casteroba Bento - Doutorando -
SEL/EESC/USP*

*Profa. Dra. Tatiane Cristina da Costa Fernandes - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo/campus Piracicaba*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho ao professor Rodrigo Andrade Ramos que me orientou com atenção e dedicação desde o início do processo e que, apesar das dificuldades, sempre indicou qual o caminho certo a seguir.

À Anna Giulia, co-orientadora e amiga, que esteve sempre, com atenção e paciência, esclarecendo as dúvidas mais urgentes e, até mesmo, rindo dos erros mais básicos.

Dedico, claro, aos meus pais, Vitor e Cidinha, que acompanharam todos os passos e nos momentos mais difíceis, me deram forças para continuar. Também por toda a base, carinho e suporte que me deram, por todos esses anos de graduação, para que eu conseguisse atingir mais esse objetivo da minha vida.

À minha namorada, Aline, por todos os momentos felizes (e tristes, também) que estive junto comigo nessa longa caminhada que passei.

À todos os meus amigos de sala que passamos noites em claro estudando para que, agora, no final pudéssemos comemorar juntos.

À todos os professores que, com atenção e paciência, se esforçam para nos ensinar da melhor maneira possível.

À USP, por toda a infra-estrutura e oportunidades que ela promove.

RESUMO

SAKRAN, F. F. **Análise da influência dos parâmetros do PSS nos modos eletromecânicos em um Sistema Elétrico de Potência.** 2018. 62p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

As oscilações eletromecânicas são capazes de causar grandes problemas, até mesmo *blackouts*, quando não tratadas da forma que é preciso. Alguns controladores são responsáveis por amortecer os modos relacionados a essas oscilações e um deles, o *Power System Stabilizer* (PSS), será estudado nesse trabalho. Seu objetivo é mostrar quais os efeitos das alterações dos parâmetros desse controlador já presente no sistema no que diz respeito aos modos eletromecânicos dentro do sistema-teste *New England - New York*, que pode ser encontrado como *benchmark* da IEEE. Para isso, será lançado mão de métodos de simulação como Monte Carlo e também da análise de fatores de participação. Pode ser verificado que cada PSS relacionado a uma variável de estado de uma máquina tem uma ação maior nos polos em que o fator de participação é maior, no entanto, sua presença afeta diretamente todos os modos do sistema, inclusive os interáreas, podendo desestabilizá-lo. Portanto, o ajuste dos controladores individual e isoladamente pode corrigir problemas de amortecimento, porém prejudica o ajuste de outros controladores conectados ao sistema.

Palavras-chave: Oscilações Eletromecânicas. *Power System Stabilizer*. Fator de Participação. Modos Eletromecânicos. Estabilidade em Sistema Elétricos de Potência.

ABSTRACT

SAKRAN, F. F. **Analysis of the influence of PSS parameters on electromechanical modes in an Electrical Power System.** 2018. 62p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Electromechanical oscillations are capable of causing major problems, even blackouts, when untreated the way it is needed. Some controllers are responsible for rising the damping factor of the modes related to these oscillations and one of them, the Power System Stabilizer (PSS), will be studied in this work. Its purpose is to show the effects of changes in the parameters of this controller, already present in the system, with respect to the electromechanical modes within the New England - New York test system, which can be found as an IEEE benchmark. For this, will be used simulation methods such as Monte Carlo and also the analysis of participation factors. It can be verified that each PSS related to a state variable of a machine has a greater action in the poles which the participation factors are the greatest, however, its presence directly affects all the modes of the system, including the interareas, and can destabilize it. Therefore, adjusting the controllers locally and individually can correct damping problems, but it hinders the adjustment of other controllers connected to the system.

Keywords: Electromechanical oscillations. Power System Stabilizer. Participation Factor. Electromechanical Modes. Power System Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo SMIB linearizado segundo (DEMELLO et al., 1969). <i>Fonte: (DEMELLO et al., 1969)</i>	24
Figura 2 – Diagrama do sistema-teste NE-NY.	30
Figura 3 – Curva diária de carga.	31
Figura 4 – Diagrama de blocos do regulador DC4B utilizado no sistema em estudo (imagem adaptada de (RAMOS et al., 2014)).	32
Figura 5 – Diagrama de blocos do regulador ST1A utilizado no sistema em estudo (imagem adaptada de (RAMOS et al., 2014)).	33
Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador PSS.	34
Figura 7 – Diagrama de blocos do PSS usado nesse trabalho. Adaptado de (RAMOS et al., 2014)	34
Figura 8 – Modos do sistema (Em destaque, os modos eletromecânicos selecionados).	38
Figura 9 – Localização do modo selecionado no gráfico de polos e zeros do sistema estudado.	40
Figura 10 – Fator de participação normalizado para a variável de estado selecionada.	41
Figura 11 – Polos eletromecânicos do sistema considerando a variação do ganho.	42
Figura 12 – Variação dos parâmetros de compensação de fase e a respectiva alteração nos modos selecionados.	43
Figura 13 – Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.	46
Figura 14 – Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.	47
Figura 15 – Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.	48
Figura 16 – Gráfico resumando todos as situações selecionadas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos dos reguladores encontrados no sistema NE-NY.	31
Tabela 2 – Autovalores e seus respectivos amortecimentos selecionados e sua classificação segundo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).	37
Tabela 3 – Fatores de participação da variável δ das máquinas síncronas do sistema.	39
Tabela 4 – Parâmetros obtidos a partir de Monte Carlo utilizados para obtenção dos gráficos	45
Tabela 5 – Características das barras do sistema estudado. Adaptado de (RAMOS et al., 2014)	57
Tabela 6 – Parâmetros do AVR usados nos geradores do sistema estudado. Adaptado de (RAMOS et al., 2014).	60
Tabela 7 – Parâmetros do PSS usado nos geradores do sistema estudado. Adaptado de (RAMOS et al., 2014).	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PSS - *Power system Stabilizer*;

AVR - *Automatic Voltage Regulator*;

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engeneering*;

SEP - Sistema Elétrico de Potência;

SMIB - *Single Machine Infinite Bus*;

SPE - Semi-plano Esquerdo;

SPD - Semi-plano Direito;

FP - Fatores de Participação (tradicionais);

SMA - *Selective Modal Analysis*;

LISTA DE SÍMBOLOS

X'_d - Reatância transitória de eixo direto;

X_e - Reatância equivalente do sistema;

x_e - Ponto de equilíbrio do sistema de controle não linear;

A, B, C, D - Matrizes do modelo de espaço de estados;

λ_k - Autovalor k da matriz de estados;

u_{ki} - k -ésimo elementos dos i -ésimo autovetor à esquerda;

y_{ki} - k -ésimos elementos dos i -ésimos autovetores à direita;

p_{ki} - Fator de participação do modo no estado;

e_t - Tensão terminal do gerador;

E_{fd} - Tensão do campo do gerador;

E'_q - Tensão transitória do eixo em quadratura da máquina síncrona;

δ - Ângulo do rotor da máquina síncrona;

ω - Velocidade da máquina síncrona;

T'_{do} - Constante de tempo do eixo direto em circuito aberto

T_e - Constante de tempo do AVR;

V_{Ref} - Tensão de referência do AVR;

V_t - Tensão terminal do gerador;

V_s - Sinal de tensão do PSS;

K_e - Ganho do AVR;

P_i - Potência ativa localizada na barra i ;

Q_i - Potência reativa localizada na barra i ;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Linearização e estabilidade a pequenas perturbações	23
2.1.1	Modelo SMIB linearizado	24
2.2	Fatores de Participação Tradicionais	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	O Sistema estudado	30
3.1.1	Regulador Automático de Tensão (AVR)	32
3.1.2	Controlador tipo PSS	33
3.2	Seleção do polo a ser analisado	35
3.3	Alteração do ganho do controlador	35
3.4	Alteração da compensação de fase do controlador	35
3.5	Alteração de ambos os parâmetros	35
3.5.1	Método de Monte Carlo	36
4	RESULTADOS	37
4.1	Simulação do Sistema Completo com o PSS original	37
4.2	Escolha do polo a ser estudado	37
4.3	Estudo do sistema considerando alteração do ganho	41
4.4	Estudo do sistema considerando alteração na compensação de fase	43
4.5	Estudo do sistema considerando alteração em ambos os parâmetros	45
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXOS	55
	ANEXO A – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND - NEW YORK	57
A.1	Características das barras	57
A.2	Dados do AVR	59
A.3	Dados do PSS	61

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) passaram a ser mais exigidos de forma que a capacidade de transmitir potência aumentou, assim como a demanda energética. Como um avanço, diversas áreas distintas de um mesmo SEP foram interligadas aumentando sua robustez e garantindo um fornecimento de energia contínuo para os consumidores.

Entretanto, esse fato também elevou a complexidade do controle usado nesses tipos de sistema, visto que, com a integração de novas áreas, os parâmetros destas novas áreas devem ser levados em consideração. Além disso, as cargas conectadas ao sistema, irão possuir uma dinâmica bastante variada sendo necessário que o mesmo se adapte à essas novas configurações.

Oscilações eletromecânicas são inerentes de qualquer sistema elétrico de potência (SEP) e ocorrem quando há um desbalanço de potência mecânica de entrada e potência elétrica de saída (representado pelo ângulo δ) da máquina síncrona. Quando o sistema é perturbado, os rotores destas máquinas oscilam uns contra os outros de maneira a estabelecer um novo ponto de operação estável. Na ocorrência de uma falta na rede ou mesmo as variações diárias de carga, os modos eletromecânicos são excitados e, caso sejam mal amortecidos, podem provocar danos aos rotores das máquinas síncronas e, consequentemente, um *blackout* de todo o sistema. Uma das formas de avaliar o comportamento dos modos eletromecânicos em um determinado sistema é a partir da análise dos fatores de participação.

Esta ferramenta permite definir o quanto cada modo de resposta influencia um determinado estado do sistema em análise e vice-versa (PÉREZ-ARRIAGA; VERGHESE; SCHWEPPE, 1982). Entretanto, esta ferramenta, em sua definição como premissa uma condição inicial formada pela base canônica do espaço de estados, fato que dificilmente ocorreria na prática.

Os modos eletromecânicos, por sua vez, tem sua classificação em dois tipos, que são do interesse nesse trabalho. São eles: modos locais e modos interáreas (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Os modos locais estão relacionados com as oscilações das máquinas síncronas dentro de uma mesma área em um sistema de potência contra o restante do sistema. Geralmente, esses modos possuem frequência entre 0.7 Hz e 3 Hz (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Os modos interáreas, por sua vez, estão relacionados com as oscilações de um grupo de geradores síncronos, em uma área do sistema, contra outro(s) grupo(s). São causados pela interconexão de dois ou mais grupos geradores por meio de linhas fracas

(que transportam grande potência) e sua frequência típica de oscilação está entre 0.3 Hz e 0.8 Hz.

Como citado anteriormente, com o avanço das tecnologias, novas exigências passaram a existir assim como novas demandas surgiram. Como uma solução para os problemas de controle clássico de modos eletromecânicos locais com baixo amortecimento ou instáveis, foi proposto um novo controlador: o *Power System Stabilizer* (PSS).

O PSS, foi proposto inicialmente em 1969, por DEMELLO e CONCORDIA, a partir da observação dos novos geradores que estavam sendo produzidos na época. Tais equipamentos, assim como a população, exigiam maior precisão e menor erro na tensão terminal o que, apenas com o regulador automático de tensão (do inglês, *Automatic Voltage Regulator* - AVR) não era possível alcançar (DEMELLO et al., 1969).

Assim, se mostrou prático utilizar de sinais estabilizantes, durante o período transiente, derivados da velocidade frequência ou potência superposto no sinal primário de controle do AVR, adicionando amortecimento às oscilações (DEMELLO et al., 1969).

Todavia, com o crescimento dos sistemas de transmissão de energia e aumento das interligações entre as barras, grandes grupos geradores passaram a ser influentes, não somente na área em que está presente, mas sim, em todo o sistema, assim como seus controles individuais. Assim, o PSS presente no gerador, agora, influencia diretamente o controlador presente em outro gerador, levando a um novo patamar de controle, mais complexo e delicado.

Fez-se o uso, agora, de projeto de controladores de maneira coordenada, levando em consideração a presença de cada controlador no sistema, alterando os parâmetros de forma que a combinação de todos os equipamentos possa atingir um resultado ótimo, sem que um possa levar o sistema a instabilidade.

Dessa forma, esse trabalho irá observar, a partir da alteração dos parâmetros do PSS, como os modos eletromecânicos do sistema se comportam, verificando se, em algum momento, o sistema apresenta instabilidade ou o controle do mesmo pode ser mais bem sintonizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Linearização e estabilidade a pequenas perturbações

De acordo com (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994), estabilidade a pequenas perturbações é a capacidade de um sistema de potência restabelecer o equilíbrio, em certo ponto, após sofrer uma perturbação.

A linearização é uma ferramenta muito aplicada na engenharia, em especial na teoria de controle clássico, com o intuito de simplificar a análise dos sistemas estudados que, na maioria das vezes, são não-lineares e variantes no tempo.

Da definição, um sistema não-linear é aquele em que o princípio da superposição não se aplica. Assim como muitos sistemas que são considerados lineares, em um estudo mais aprofundado, é possível verificar que a sua linearidade se aplica apenas a limites de operação bem definidos e, geralmente pequenos (OGATA; YANG, 2002).

Como em sistemas de controle, é esperado que o sistema opere normalmente dentro de uma área próxima ao ponto de equilíbrio, ou seja, o ponto em que nenhuma outra mudança ocorre a menos que seja imposta, e que os sinais que envolvem o sistema sejam pequenos, é possível aproximar para um sistema linear. A aproximação é válida e o modelo linearizado vai representar o original com boa precisão dentro de uma faixa de valores pré-estabelecida (OGATA; YANG, 2002).

Seja um sistema não linear, com seu ponto de equilíbrio em x_e , representado por:

$$y = f(x) \quad (2.1)$$

Sendo Δx o desvio com relação ao ponto de equilíbrio causado por um sinal na entrada, tem-se que:

$$\Delta x = x - x_e$$

Assim, é possível expandir o sistema (2.1) em sua série de Taylor da seguinte forma:

$$y = f(x_e) + \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2} (\Delta x)^2 + \dots \quad (2.2)$$

Como foi considerado que o sinal de entrada é pequeno então a perturbação é pequena, logo $\Delta x < 1 \rightarrow (\Delta x)^2 \ll 1$. Assim, os termos maiores que o de primeira ordem podem ser desprezados. Essa suposição é fundamental para a linearização dos sistemas dinâmicos encontrados nesse trabalho.

Portanto, o sistema linearizado pode ser representado, quando em uma situação de pequena perturbação, da seguinte forma:

$$y = f(x_e) + \frac{df}{dx} \Delta x \quad (2.3)$$

Como os sistemas modernos são compostos por múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multiple Inputs - Multiple Outputs - MIMO*, do inglês), é possível expandir o sistema representado em (2.3) como um vetor de variáveis, resultando em:

$$Y = f(X_e) + A \Delta X \quad (2.4)$$

Onde A é o jacobiano das funções $f(X)$ em relação a X e X é o vetor de estados.

2.1.1 Modelo SMIB linearizado

Para o modelo SMIB, utilizado nesse trabalho, (DEMELLO et al., 1969) sugere uma modelagem mais simplificada, considerando apenas as grandezas transitórias e desconsiderando o atrito mecânico do gerador. Na figura 1, está representado o modelo linear segundo (DEMELLO et al., 1969).

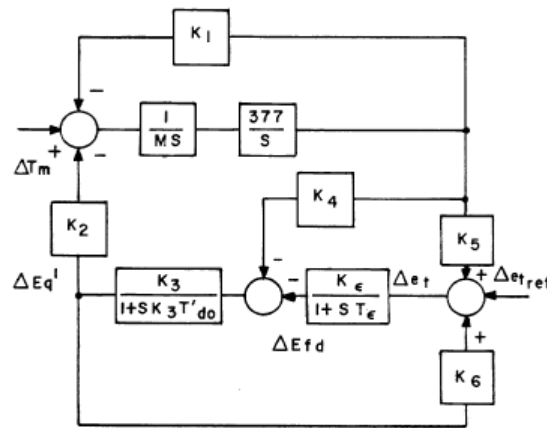


Figura 1: Modelo SMIB linearizado segundo (DEMELLO et al., 1969). Fonte: (DEMELLO et al., 1969)

Neste modelo, (DEMELLO et al., 1969) considerou as constantes K_1 até K_6 onde cada qual representa uma dinâmica do gerador *versus* barra infinita. Tais representação estão descritas em detalhes nas equações (2.5) a (2.10).

$$K_1 = \left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \right|_{E'_q} \quad (2.5)$$

$$K_2 = \left. \frac{\Delta T_e}{\Delta E'_q} \right|_{\delta} \quad (2.6)$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} \quad (2.7)$$

$$K_4 = \frac{1}{K_3} \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta} \quad (2.8)$$

$$K_5 = \frac{\Delta e_t}{\Delta \delta} \Big|_{E'_q} \quad (2.9)$$

$$K_6 = \frac{\Delta e_t}{\Delta E'_q} \Big|_{\delta} \quad (2.10)$$

Cada constante tem seu respectivo significado físico como abaixo:

- K1 - Variação no torque da máquina com relação a uma variação no ângulo δ do rotor mantendo-se a tensão transitória do eixo em quadratura constante;
- K2 - Variação no torque da máquina com relação a variação da tensão transitória do eixo em quadratura, mantendo-se o ângulo do rotor constante;
- K3 - Fator de impedância. Para o caso em que Z_e possui resistência desprezível com relação a reatância;
- K4 - Efeito desmagnetizante por consequência de uma variação no ângulo do rotor;
- K5 - Variação na tensão terminal do gerador com relação a uma variação no ângulo do rotor, mantendo-se a tensão transitória do eixo em quadratura constante.
- K6 - Variação na tensão terminal do gerador com relação a variação da tensão transitória do eixo em quadratura, mantendo-se o ângulo do rotor constante.

Nesse trabalho, o controlador PSS irá atuar na tensão de referência do AVR (V_{ref}) a partir da variação da velocidade angular do rotor (ω). Para tanto, (DEMELLO et al., 1969), observa que uma máquina operando contra um grande sistema, equivalente a uma barra infinita (*Single Machine Infinite Bus* - SMIB, do inglês), é possível reduzir todo o sistema de excitação e circuito de campo da máquina, relacionando o novo sinal de controle com a variação na potência da máquina. Essa função de transferência que relaciona tais aspectos será chamada de GEP e é definida como:

$$GEP(s) = \frac{\Delta P_m}{\Delta V_s} = \frac{K_2}{K_6 [1 + s(\frac{T'_{do}}{K_e K_6})] (1 + sT_e)} \quad (2.11)$$

Onde T'_{do} é a constante de tempo do eixo direto em circuito aberto, T_e , a constante de tempo do AVR, K_e o ganho do mesmo regulador, K_2 e K_6 são parâmetros do sistema SMIB linearizado, de acordo com o apresentado nessa seção.

2.2 Fatores de Participação Tradicionais

Os fatores de Participação Tradicionais (FP) são índices que compõem uma matriz e que possibilitam quantificar a contribuição relativa dos modos do sistema linearizado em relação as variáveis de estado deste (PÉREZ-ARRIAGA; VERGHESE; SCHWEPPE, 1982).

Esses fatores compõem uma técnica muito utilizada na análise da estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência, chamada de *Selective Modal Analysis* (SMA). A técnica de SMA (Análise Modal seletiva, em português) consiste em selecionar os modos de interesse de um sistema complexo de forma que sua estrutura e resposta não é alterada.

Neste trabalho, tanto a abordagem de fatores de participação quanto a SMA serão utilizadas de forma a selecionar apenas os modos eletromecânicos para se observar seus parâmetros referentes à pequena perturbação.

Para se obtê-los, considere o sistema linearizado em torno de ponto de equilíbrio, representado por:

$$\dot{\Delta x} = A \cdot \Delta x \quad (2.12)$$

Em que A é a matriz de estados com dimensões $n \times n$.

Considere, agora, U como um espaço vetorial e T uma transformação linear no espaço U , tal que (ZANI, 2011):

$$T(u) = \lambda u \quad (2.13)$$

Então, u é definido como um autovetor de T assim como λ é definido como autovalor de T associado ao autovetor u .

A partir dos autovetores à esquerda e à direita relacionados a essa matriz, os elementos da matriz de fatores de participação tradicionais são definidos como:

$$p_{ki} = u_{ki} y_{ki} \quad (2.14)$$

Sendo p_{ki} a participação da k -ésima variável de estado no i -ésimo modo (e vice-versa), u_{ki} e y_{ki} , os k -ésimos elementos dos i -ésimos autovetores à esquerda e à direita, respectivamente. Sendo esses autovetores:

$$u_i^T y_j = 1, \text{ se } i = j \quad (2.15)$$

$$u_i^T y_j = 0, \text{ c.c.} \quad (2.16)$$

A soma dos elementos das linhas ou das colunas da matriz de fatores de participação deverá ser 1.

Sendo o vetor de condições iniciais Δx_0 constituído por um vetor da base canônica e_k (na posição k , o valor é 1 e as outras são 0), obtém-se diretamente a resposta dinâmica da variável de estado, conforme a equação (2.17), a partir do fator de participação obtido em (2.14).

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N p_{ki} e^{\lambda_i t} \quad (2.17)$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será explicado como irá funcionar o processo de ajuste, simulação e análise do sistema estudado nesse trabalho. O equipamento em foco é o controlador do tipo PSS, presente em algumas máquinas deste sistema que terá os seus parâmetros alterados de acordo com a análise a ser desenvolvida.

Primeiramente, serão avaliados quais são os modos eletromecânicos do sistema em questão e, em seguida, os respectivos fatores de participação de acordo com cada variável de estado correspondente às máquinas conectadas ao sistema elétrico. O modo eletromecânico com maior participação nas variáveis de estado de uma máquina é o que terá um estudo específico neste trabalho.

Será escolhido apenas um PSS dentre todos que estão instalados no sistema, de uma máquina com boa participação em um (ou mais) dos modos eletromecânicos destacados, para alterar os parâmetros e verificar os efeitos de sua inclusão considerando todos os outros elementos presentes no sistema. Serão analisados os polos, antes e depois das alterações e seus amortecimentos.

As alterações nos parâmetros do PSS escolhido será feito seguindo 3 (três) etapas: Alterando o ganho do PSS sem alterar a compensação de fase, alterando a compensação de fase, sem alterar o ganho, alterando tanto o ganho quanto a fase.

Na primeira etapa, apenas o ganho direto do PSS será alterado, mantendo constante os parâmetros de compensação de fase do equipamento. Será estipulada uma faixa de variação do ganho de forma empírica para se estudar como os polos se alteram com a mudança nesse parâmetro desse PSS, em específico.

Na segunda etapa, apenas os parâmetros de compensação de fase, em específico, o zero dos compensadores, serão alterados, mantendo o ganho constante. Será utilizada a mesma faixa de variação estipulada para o ganho, nesse caso.

Na terceira etapa, ambos os parâmetros serão alterados, tanto o ganho, quanto a compensação de fase, utilizando o método de Monte Carlo, explicado na seção 3.5.1 para a seleção dos valores que serão utilizados pois, devido à faixa de parâmetros que podem ser utilizados, ocorre um grande número de combinações possíveis, sendo necessário lançar mão de métodos probabilísticos para essa análise.

Assim, os resultados serão apresentados de forma a ilustrar o comportamento do sistema visando as alterações nos parâmetros do PSS. É esperado que as alterações mostrem de forma clara como o equipamento pode ser ajustado de forma a melhorar o amortecimento dos modos eletromecânicos e, assim, a estabilidade do sistema elétrico

como um todo.

3.1 O Sistema estudado

O sistema em que este trabalho será baseado é o *New England - New York* (NE-NY), presente no *benchmark* da IEEE, como um sistema-teste. Ele é composto pelos sistemas *New England Test System* (NETS) e *New York Power System* (NYPS), a primeira compreendendo os geradores 1 a 9 e a segunda, de 10 a 13, sendo o 13, uma pequena área do sistema NYPS. Também possui 5 áreas distintas em que as três adjacentes ao NETS e ao NYPS são representadas por equivalentes de área (geradores 14 ao 16). Suas interconexões podem ser vistas na figura 2.

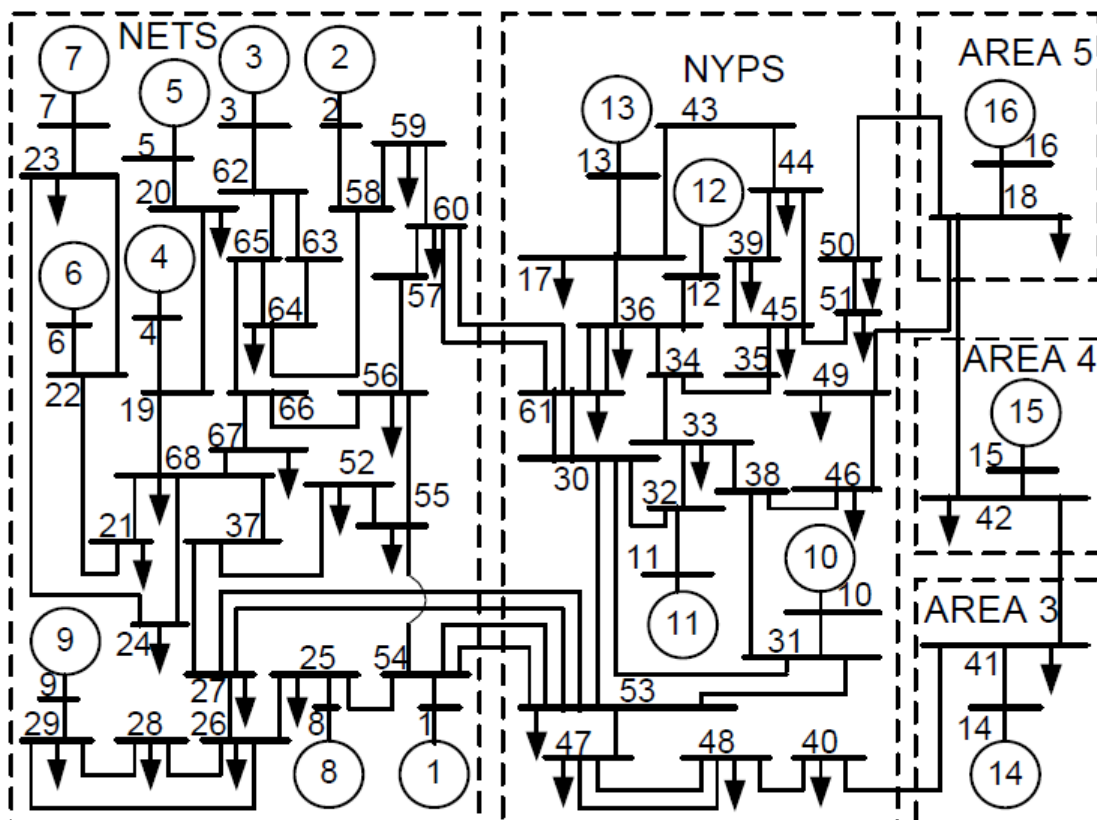


Figura 2: Diagrama do sistema-teste NE-NY.

Além disso, o sistema NE-NY possui três grandes linhas de conexão, sendo essas as que interligam as barras 60 e 61, 53 e 54 e 27 e 53, o que caracteriza linhas com limitação de transferência de potência, ressaltando um possível problema de estabilidade de tensão que não será abordada nesse trabalho.

Os geradores possuem reguladores de tensão conforme os modelos mostrados na tabela 1

Tabela 1: Modelos dos reguladores encontrados no sistema NE-NY.

Área	Gerador	Modelo do regulador
NETS	1	DC4B
	2	DC4B
	3	DC4B
	4	DC4B
	5	DC4B
	6	DC4B
	7	DC4B
	8	DC4B
	9	ST1A
NYPS	10	DC4B
	11	DC4B
	12	DC4B
	13	Manual
3	14	Manual
4	15	Manual
5	16	Manual

As cargas seguem um padrão de curva diária segundo a figura 3. Para este trabalho será utilizado o carregamento referente às 13h, conforme indicado no trabalho do *benchmark* ((RAMOS et al., 2014)) como caso base.

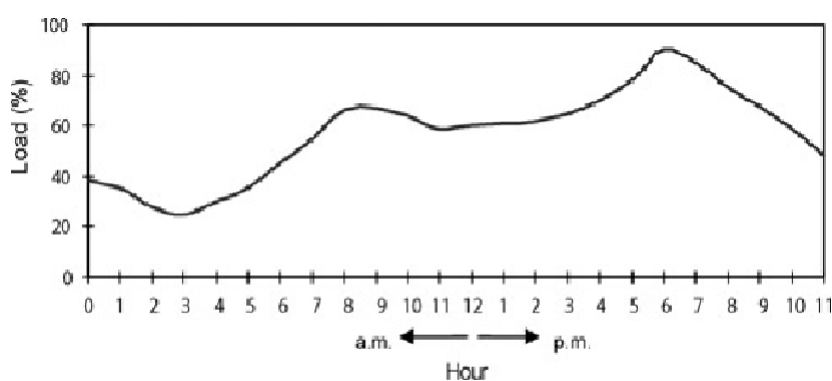


Figura 3: Curva diária de carga.

Os tipos e as cargas das barras do sistema podem ser verificadas na tabela 5, localizada no anexo A.1. As cargas se referem ao caso base apresentado no relatório (RAMOS et al., 2014).

3.1.1 Regulador Automático de Tensão (AVR)

Um regulador automático de tensão é responsável por manter a tensão nos terminais de gerador o mais próximo possível da referência. Para isso, a ação de controle é baseada em verificar qual a tensão terminal do gerador, através de transdutores e, caso haja alguma diferença entre a tensão terminal naquele momento e a referência, alterar a tensão aplicada no rotor de forma que a corrente induza um campo maior (ou menor) que compense tal diferença.

Com o avanço da eletrônica de potência, atualmente os AVRs são acionados a tiristores, com rápida atuação e mais eficientes. Também, as excitatrizes das máquinas geradoras passaram a ser baseadas em retificadores eletrônicos, evitando o uso de buchas diminuindo os desgastes mecânicos e os problemas que isso acarreta ao controle do gerador.

Neste sistema estudado, existem dois modelos de reguladores e estão mostrados na tabela 1. Os diagramas de blocos desses modelos são mostrados nas figuras 4 e 5 retirados do relatório de estudo presente no *benchmark* (RAMOS et al., 2014).

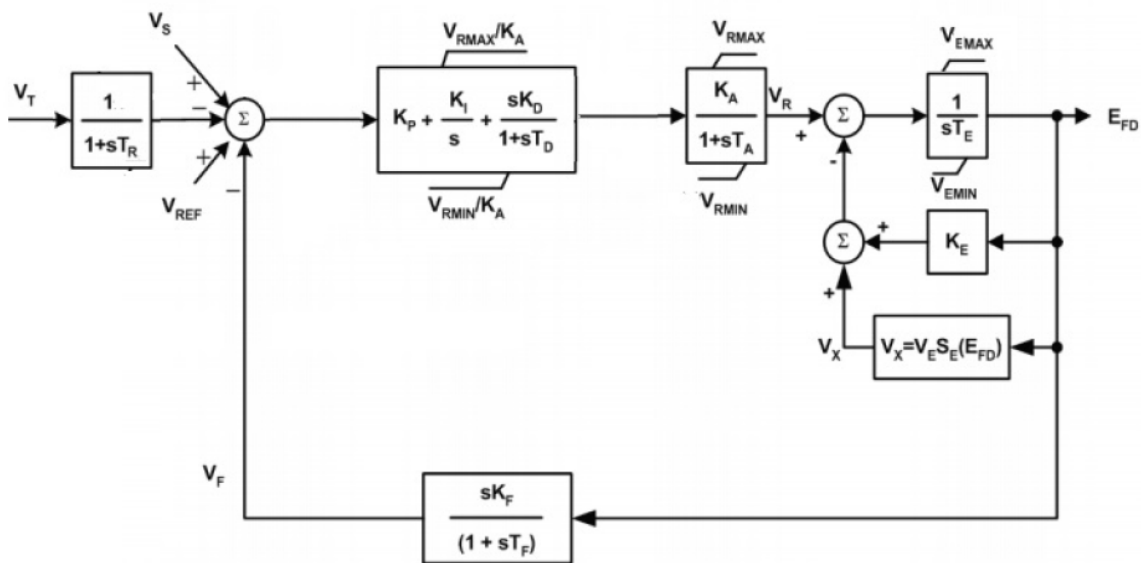


Figura 4: Diagrama de blocos do regulador DC4B utilizado no sistema em estudo (imagem adaptada de (RAMOS et al., 2014)).

Os parâmetros desse controlador que está sendo considerado nesse trabalho estão mostrados na tabela 6, no anexo A.

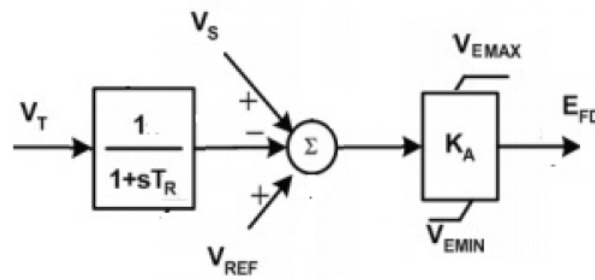


Figura 5: Diagrama de blocos do regulador ST1A utilizado no sistema em estudo (imagem adaptada de (RAMOS et al., 2014)).

3.1.2 Controlador tipo PSS

O controlador *Power System Stabilizer* (PSS) foi inicialmente proposto em 1969 por (DEMELLO et al., 1969) e se baseia no princípio da compensação de fase para a melhor na estabilidade a pequenas perturbações do sistema em que está inserido.

Dessa maneira, a função do PSS é produzir um sinal diretamente no erro da tensão terminal com o sinal do AVR, de forma que compense o atraso de fase entre o laço eletromecânico e a potência do gerador.

Todo o estudo e projeto do PSS é baseado na função GEP, descrita na seção 2.1.1, na equação (2.11). Verifica-se, então, que essa função possui um grande atraso de fase e pequena margem de ganho (dependendo dos parâmetros do sistema em estudo, pode ser instável). O controlador proposto é, então, na forma de avanço/atraso de fase tendo em vista, aumentar a margem de ganho da planta e possibilitar maior ganho no AVR, resultando em menor erro de regime permanente e maior precisão no controle da tensão terminal.

Visto que o PSS age durante o transitório, é preciso um novo bloco que evita a ação durante o regime permanente. Assim, o controlador é dividido em três partes principais e que também está representado na figura 6:

- Bloco *Washout*: Responsável por inibir a ação de controle no regime permanente;
- Bloco *Lead/Lag* (Avanço/atraso): Responsável por avançar ou atrasar a fase do sistema em questão, dependendo dos valores das constantes de tempo T1 e T2;
- Bloco de ganho: É o ganho da malha direta do controlador.

O PSS pode ter quantos blocos de avanço/atraso forem necessários para obter a compensação desejada.

Esse controlador pode ser incluso na máquina com diversas entradas, cada qual com sua particularidade. O mais comum é utilizando a velocidade angular do rotor (ω) e

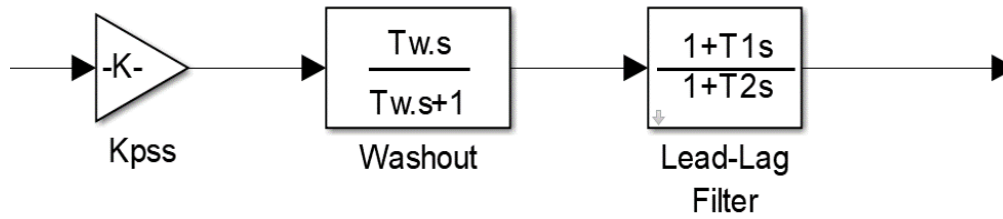


Figura 6: Diagrama de blocos do controlador PSS.

tendo como ação de controle, uma defasagem de tensão na entrada da tensão de referência (V_{ref}) do AVR ((LARSEN; SWANN, 1981a)).

Um controlador com essas características deve ser capaz de compensar a fase de um sistema representado pela função GEP (que será esclarecida futuramente). Em uma faixa de frequências acima das desejadas, ou seja, fora da faixa especificada para os modos eletromagnéticos, a ação do PSS deve ser bastante atenuada para que não haja ruído na entrada do AVR ((LARSEN; SWANN, 1981a)).

Para assegurar que o amortecimento será válido para a maior faixa de frequência possível (no mínimo entre, 0,5 e 2 Hz), as constantes de tempo do controlador, tanto do bloco *Washout* quanto do bloco *Lead/Lag*, devem compensar o atraso da máquina + regulador de tensão (denominado de planta) de forma que o atraso da malha de controle seja menor que 90° , dentro da faixa estabelecida e menor que 45° para o modo de menor frequência ((LARSEN; SWANN, 1981c)).

Nesse trabalho será utilizado um PSS cujo diagrama de blocos está mostrado na figura 7.

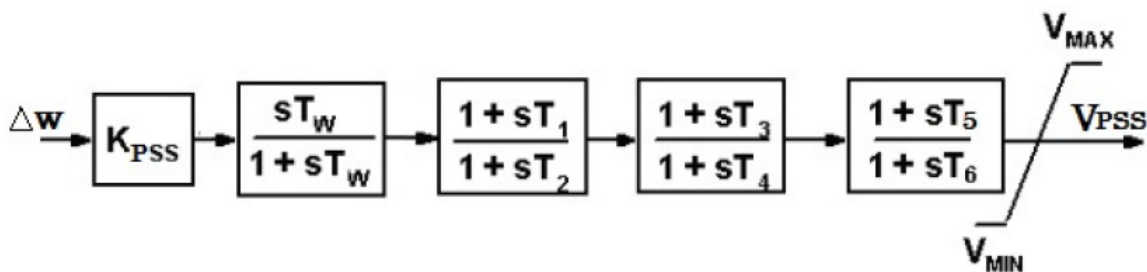


Figura 7: Diagrama de blocos do PSS usado nesse trabalho. Adaptado de (RAMOS et al., 2014)

Neste diagrama, tem-se os valores para os parâmetros do controlador como segue na tabela 7 localizada no anexo A.3.

3.2 Seleção do polo a ser analisado

Nesta etapa, será determinado qual PSS será alterado para a análise do comportamento do sistema. Para tal, será lançado mão dos fatores de participação para localização dos polos correspondentes à máquina escolhida.

Os fatores de participação, como explicado na seção 2.2, mostram qual a participação de cada variável de estado em um modo específico. Assim, como são de interesse deste trabalho, serão observadas as variáveis eletromecânicas que mais influenciam nos modos locais, tendo em vista que o PSS tem baixo controle sobre os modos interáreas.

Será observado qual o maior fator de participação para a variável eletromecânica considerada e, assim, seleciona-se o polo com maior participação.

É possível que uma mesma variável participe em mais de um polo distinto, porém, o polo que possui maior participação é o que será considerado neste trabalho.

Para se obter as matrizes de estado e os fatores de participação, o sistema, descrito na seção 3.1, será simulado no *software* ANATEM[®], exportando, em seguida, para o *software* PACDYN[®] para se obter as matrizes A, B, C e D, do sistema linearizado e representado em espaço de estados. Agora, com as matrizes em mãos, será utilizado o *software* MATLAB[®] que, a partir disso, foram obtidos os autovalores e autovetores, de acordo com os procedimentos descritos em (ZANI, 2011) e assim, calcular os fatores de participação, segundo a seção 2.2.

3.3 Alteração do ganho do controlador

Como a primeira análise, será considerado o PSS já instalado no sistema em questão de acordo com os parâmetros mostrados na seção 3.1 e, de forma empírica, será selecionada uma faixa para a variação do ganho do controlador, mantendo os parâmetros de compensação de fase constantes.

3.4 Alteração da compensação de fase do controlador

Seguindo a mesma linha de análise que mostrada na seção 3.3, será utilizada a mesma faixa de variação para os parâmetros de compensação de fase, mantendo o ganho fixo.

3.5 Alteração de ambos os parâmetros

Nessa etapa, ambos os parâmetros, tanto o ganho quanto a fase, serão alterados. Por possuírem uma grande gama de combinações possíveis, será utilizado para a simulação, o método de Monte Carlo, mostrado na seção 3.5.1.

Serão gerados 100 combinações com valores aleatórios dentro da faixa estipulada na primeira etapa de simulações (indicada na seção 3.3). Dentre essas combinações, apenas algumas serão expostas nesse trabalho, na seção 4, para sumarizar os resultados obtidos.

3.5.1 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é um método de simulação probabilístico utilizado para a solução de problemas matemáticos por meio da geração de números aleatórios, seguindo uma determinada distribuição de probabilidade. Tais números serão atribuídos às variáveis do problema que se deseja descobrir a solução (MORACO, A. G. M, 2011). Essa metodologia surgiu no século XX e seu nome se originou da roleta homônima, localizada no Cassino de Monte Carlo, na cidade de Mônaco.

O primeiro trabalho a ser publicado fazendo o uso do método foi pelos senhores Jon Von Neuman e Stanislaw Ulam (ULAM; RICHTMYER; NEUMANN, 1947) com o intuito de obter resultados para a equação de Schrodinger lançando mão de ferramentas probabilísticas (PAULA et al., 2017).

O método por ser aplicado em diversas áreas de pesquisa, inclusive em estabilidade em sistemas elétricos de potência, uma vez que é bastante difícil se determinar as condições iniciais do sistema ou mesmo a localização de uma falta por causa de seu caráter aleatório. Assim, o método de Monte Carlo pode definir quais os pontos para a simulação trazendo boa precisão ao se utilizar de uma quantidade adequada de valores (MORACO, A. G. M, 2011).

Nesse trabalho, o método será utilizado para se determinar quais os valores para os parâmetros do PSS ao passo que todas as grandezas (tanto ganho quanto a fase) variam. Assim, dentre esse grande número de combinações, um grupo será selecionado para a análise dos resultados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as análises do comportamento do sistema que diz respeito aos polos, tanto em sua localização quanto a estabilidade, de acordo com a variação dos parâmetros de um controlador em específico.

4.1 Simulação do Sistema Completo com o PSS original

Para se obter condições iniciais para a simulação não-linear, exigida pelo ANATEM, o fluxo de potência do sistema NE-NY foi calculado com auxílio do *software* ANAREDE, utilizando um alto carregamento, de acordo com (LARSEN; SWANN, 1981b). Observando o gráfico de carregamento mostrado no gráfico .

Sabe-se que, em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), os modos eletromecânicos são os mais presentes na resposta à perturbação, visto que são menos amortecidos e oscilatórios. Tais modos terão atenção especial pois estes estão mais presentes nas oscilações devido a perturbações. Eles se apresentam no plano imaginário conforme a figura 8 e são explicitados na tabela 2.

Tabela 2: Autovalores e seus respectivos amortecimentos selecionados e sua classificação segundo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

	Modo	Autovalores	Amortecimento (%)
Modos locais	λ_{93}	$-1.0880 + 8.0306i$	13.4
	λ_{95}	$-3.0156 + 8.5917i$	33.1
	λ_{97}	$-2.7490 + 8.1209i$	32.1
	λ_{99}	$-3.4846 + 8.0940i$	39.5
	λ_{101}	$-1.4312 + 7.4665i$	18.8
	λ_{103}	$-4.3727 + 6.9656i$	53.2
	λ_{115}	$-2.1073 + 7.1409i$	28.3
	λ_{117}	$-1.2821 + 6.7799i$	18.6
	λ_{119}	$-2.1379 + 6.7705i$	30.1
	λ_{121}	$-1.4334 + 5.9005i$	23.6
Interárea	λ_{123}	$-1.7219 + 6.1078i$	27.1
	λ_{125}	$-0.1657 + 4.8917i$	3.39
	λ_{130}	$-0.3590 + 3.7107i$	9.63
	λ_{132}	$-0.1184 + 3.2665i$	3.62
	λ_{136}	$-0.7018 + 1.9710i$	33.5

4.2 Escolha do polo a ser estudado

Seguindo a metodologia apresentada no capítulo 3, e a partir do modelo linearizado e representado em espaço de estados do sistema estudado, foi possível aplicar as técnicas de

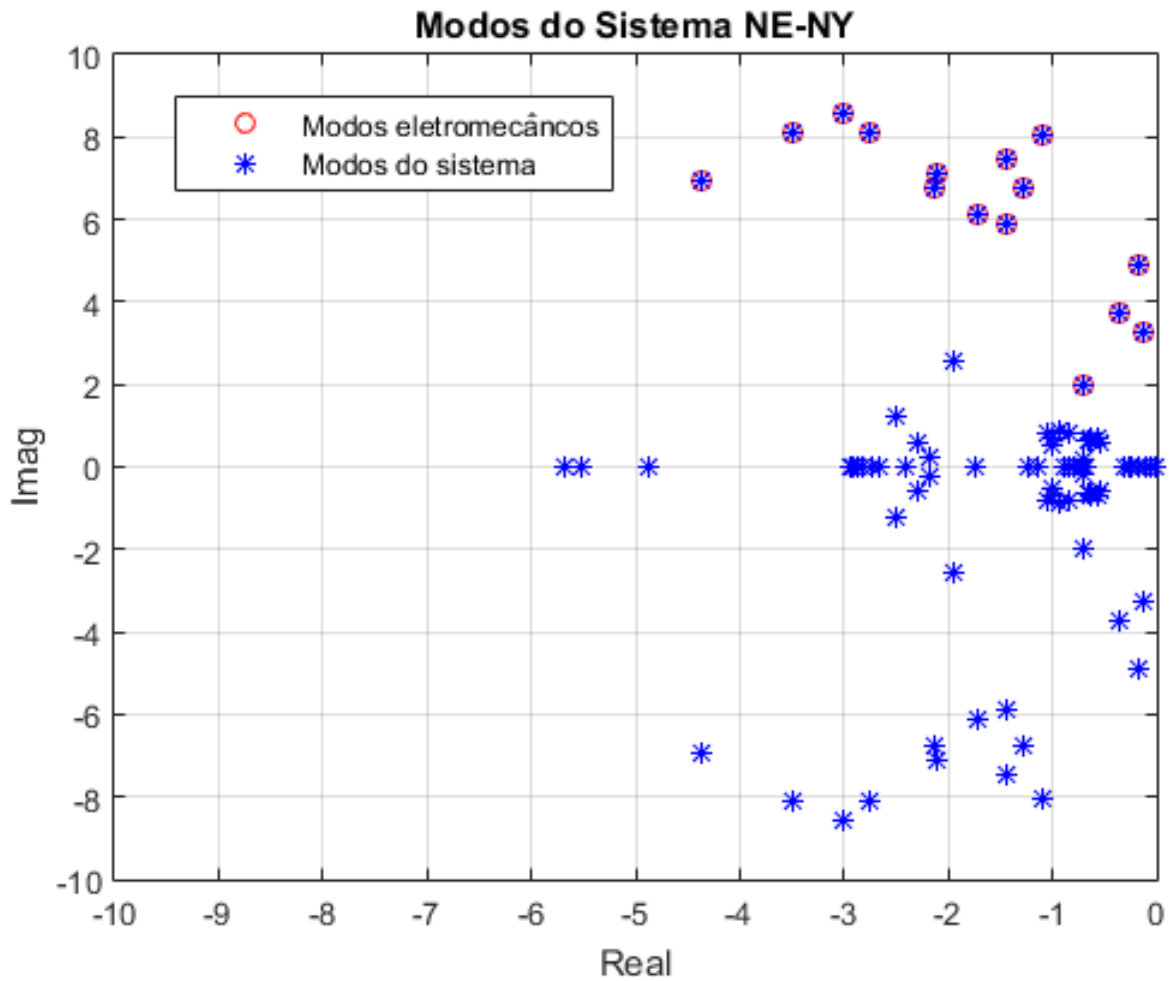


Figura 8: Modos do sistema (Em destaque, os modos eletromecânicos selecionados).

álgebra linear citadas na seção 2.2 e obter os modos do sistema assim como os autovetores, esquerdos e direitos.

Os valores encontrados para os fatores de participação tradicionais, estão mostrados na tabela 3. Vale ressaltar que apenas os fatores de participação referentes a variável δ das máquinas síncronas do sistema assim como apenas os modos referentes às oscilações eletromecânicas são mostrados. Os fatores relacionados a variável ω , segundo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994), é igual ao apresentado para a variável δ .

Tabela 3: Fatores de participação da variável δ das máquinas síncronas do sistema.

	λ_{93}	λ_{95}	λ_{97}	λ_{99}	λ_{101}	λ_{103}	λ_{115}	λ_{117}	λ_{119}	λ_{121}	λ_{123}	λ_{125}	λ_{130}	λ_{132}	λ_{136}
δ_1	0.4704	0.0000	0.0687	0.0000	0.0393	0.0008	0.0001	0.0016	0.0007	0.0063	0.0027	0.0001	0.0057	0.0012	0.0191
δ_2	0.0042	0.0000	0.0018	0.0001	0.0048	0.0007	0.2436	0.0051	0.0057	0.0301	0.1415	0.0000	0.0099	0.0017	0.0204
δ_3	0.0036	0.0000	0.0018	0.0002	0.0030	0.0006	0.1892	0.0050	0.0055	0.0384	0.1532	0.0000	0.0129	0.0021	0.0264
δ_4	0.0007	0.0004	0.0006	0.2514	0.0001	0.0001	0.0000	0.0002	0.0509	0.0096	0.0381	0.0001	0.0130	0.0019	0.0257
δ_5	0.0009	0.0002	0.0012	0.1143	0.0002	0.0001	0.0000	0.0003	0.1631	0.0133	0.0682	0.0001	0.0119	0.0017	0.0270
δ_6	0.0043	0.1707	0.0037	0.0037	0.0015	0.0002	0.0005	0.0008	0.1598	0.0180	0.0559	0.0001	0.0171	0.0025	0.0312
δ_7	0.0028	0.2536	0.0007	0.0021	0.0009	0.0001	0.0002	0.0005	0.0874	0.0119	0.0357	0.0001	0.0133	0.0019	0.0239
δ_8	0.0522	0.0004	0.4127	0.0015	0.0114	0.0016	0.0001	0.0006	0.0007	0.0076	0.0019	0.0000	0.0040	0.0008	0.0120
δ_9	0.0132	0.0000	0.0092	0.0001	0.0061	0.0003	0.0001	0.0016	0.0027	0.2592	0.0063	0.0001	0.0114	0.0019	0.0229
δ_{10}	0.0438	0.0000	0.0044	0.0000	0.3902	0.0085	0.0003	0.0222	0.0001	0.0005	0.0033	0.0002	0.0040	0.0007	0.0061
δ_{11}	0.0003	0.0000	0.0004	0.0000	0.0048	0.2145	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.0043	0.0009	0.0064
δ_{12}	0.0009	0.0000	0.0003	0.0000	0.0347	0.0048	0.0002	0.4004	0.0001	0.0003	0.0057	0.0001	0.0448	0.0063	0.0167
δ_{13}	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0005	0.0030	0.0000	0.0641	0.0000	0.0010	0.0041	0.0035	0.3872	0.0462	0.0815
δ_{14}	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0002	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	0.1288	0.0126	0.2170	0.1011
δ_{15}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3204	0.0073	0.0122	0.1198
δ_{16}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0005	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0001	0.0514	0.0518	0.2685	0.1176

Escolhe-se aleatoriamente a máquina 8 para ser foco deste estudo, então, observando a tabela 3, é possível verificar claramente que a variável de estado correspondente a essa máquina, δ_8 , possui grande participação no modo λ_{97} , mas também, no mesmo modo, a variável de estado correspondente à máquina 1, δ_1 , possui boa participação.

A localização de ambos os modos pode ser visualizada no gráfico 9, em que eles se encontram em destaque (em vermelho).

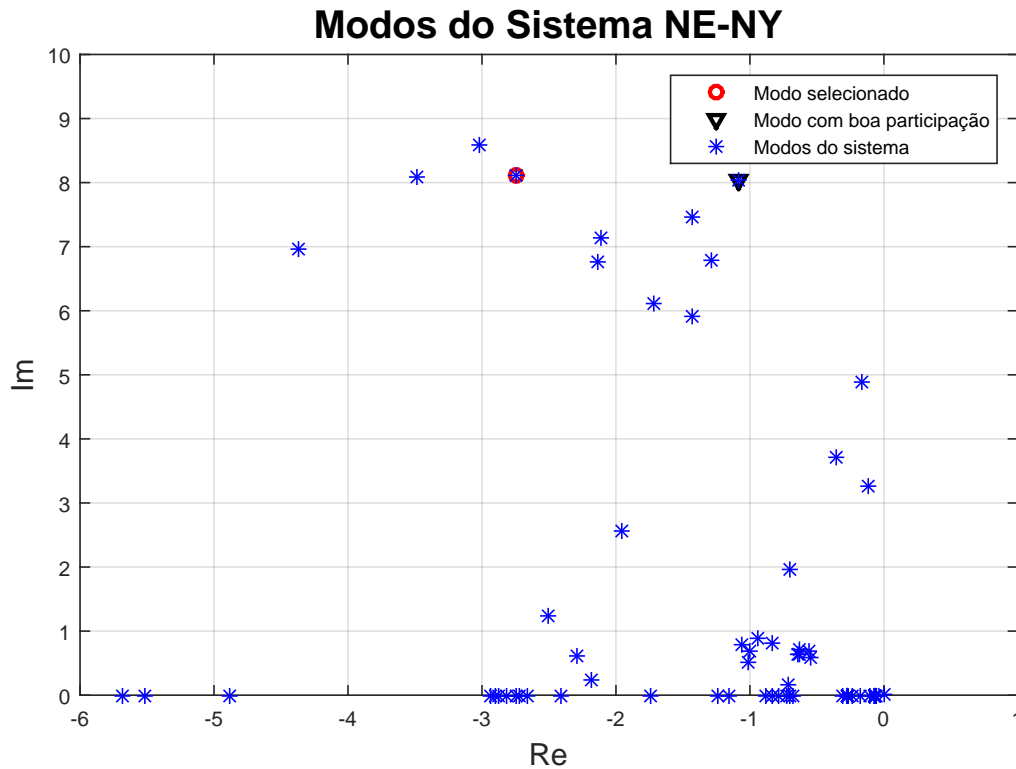


Figura 9: Localização do modo selecionado no gráfico de polos e zeros do sistema estudado.

Portanto, para esse trabalho, foi escolhido para estudo, o modo λ_{97} que corresponde, com maior intensidade, à variável δ_8 , da máquina 8. Assim, o PSS cuja variação de parâmetros será analisada, é o que corresponde a essa máquina.

Para confirmar essa afirmação, é possível verificar no gráfico 10, em que isola apenas os fatores de participação da variável δ_8 . Vê-se, claramente, que o modo λ_{97} é o mais presente, no entanto, a variável em questão, também está presente no modo λ_{93} .

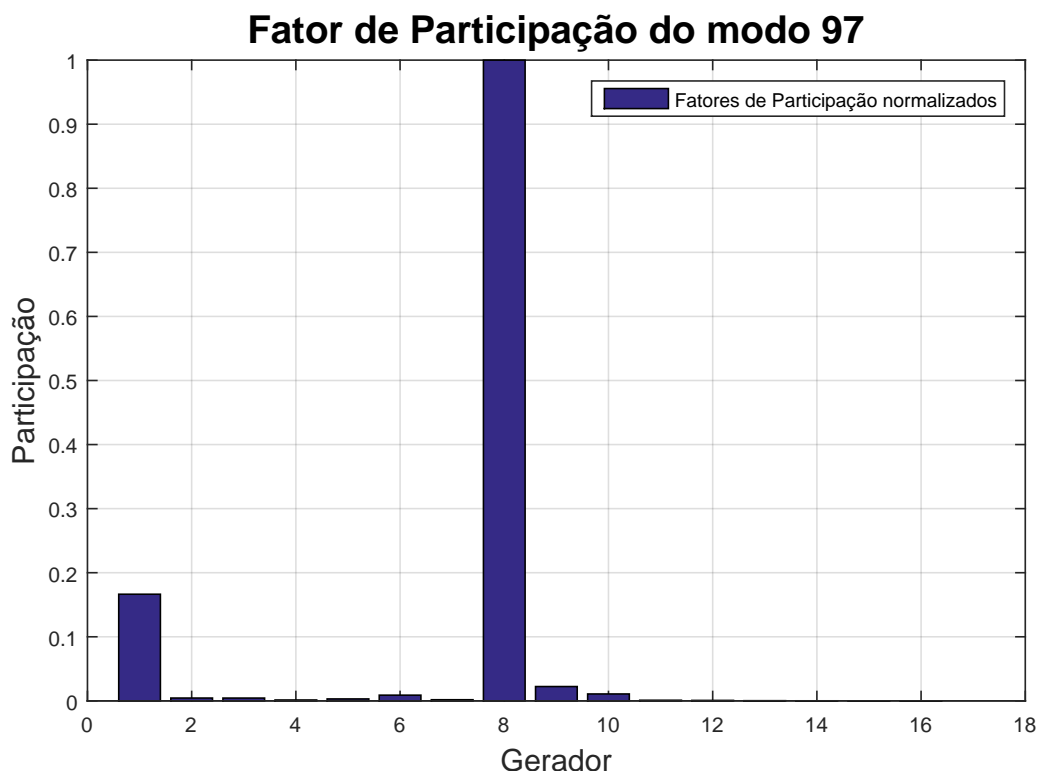


Figura 10: Fator de participação normalizado para a variável de estado selecionada.

4.3 Estudo do sistema considerando alteração do ganho

De acordo com o método exposto na seção 3.3, foi obtida de forma empírica, a amplitude de variação para o estudo desse trabalho. Após várias simulações, foi encontrado que a melhor amplitude é de $\pm 50\%$, que corresponde a ganhos entre 10 e 30, considerando 21 pontos distintos (resultando em variações unitárias do ganho).

Lançando mão do *software* PacDyn[®], foi obtido o gráfico 11 como a variação do polo selecionado conforme se altera o ganho seguindo os limites estipulados e a quantidade de passos considerados.

Observa-se, na figura 11 que os polos selecionados anteriormente (mostrados na figura 9), foram os que mais se deslocaram pelo diagrama de polos e zeros. Isso ocorreu pois, como alterou-se os parâmetros do PSS alocado na máquina correspondente a esses polos, os mesmos tendem a alterar.

Em relação a esse polo, é possível afirmar que, conforme se aumenta o ganho, ele tende a se deslocar para o semi-plano esquerdo, se tornando mais estável. Ou seja, para este polo, em específico, ainda existe margem de ganho para o PSS. No entanto, quando se observa o polo λ_{93} (segundo mais afetado pelo PSS da máquina 8), vê-se que ele tende ao semi-plano direito conforme se aumenta o ganho em questão, o que indica uma diminuição

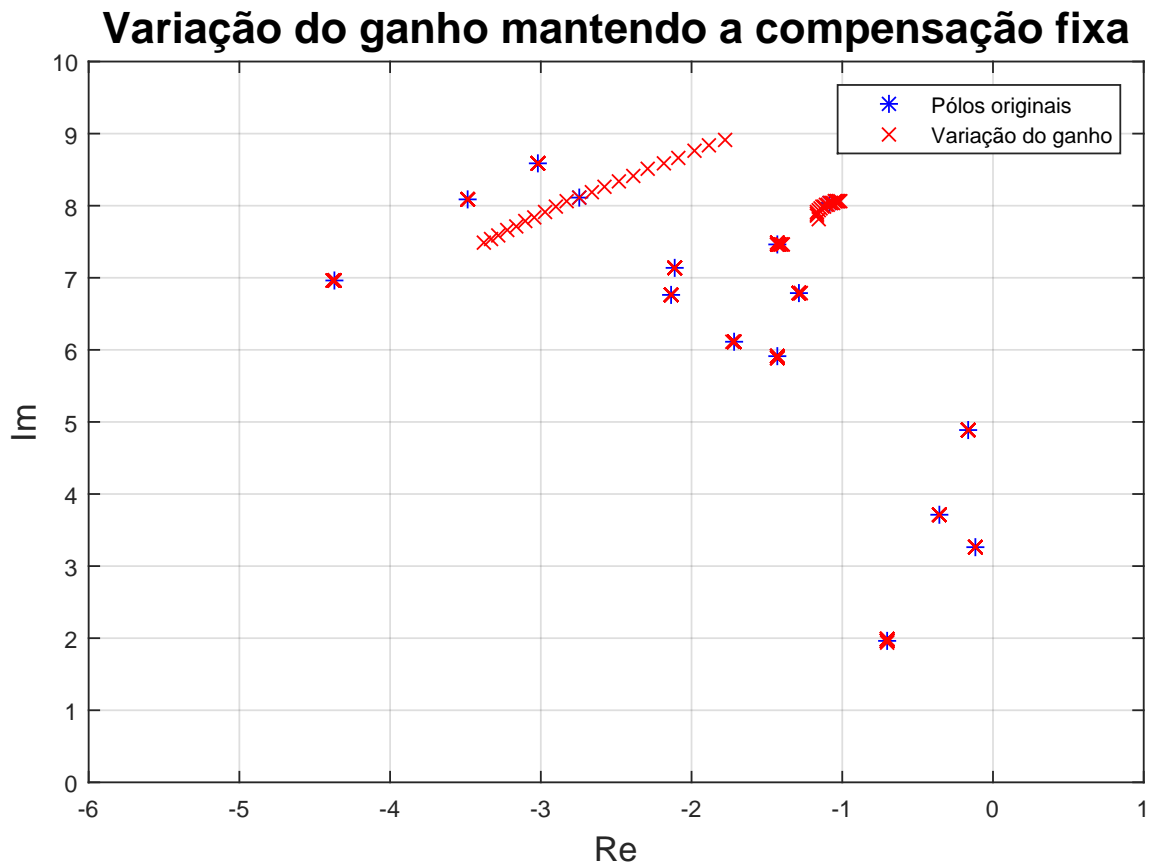


Figura 11: Polos eletromecânicos do sistema considerando a variação do ganho.

no amortecimento do sistema.

Sabe-se que quando o carregamento do sistema se altera (considerando uma curva diária como mostrada na figura 3), os polos tendem a se deslocar para o semi-plano direito, não sendo diferente, nesse caso. Então, um ajuste no PSS na máquina 8 para reaver o amortecimento do polo λ_{97} (mais presente da máquina 8) pode ajudar a instabilizar o sistema, tendo em vista o polo λ_{93} .

Observando o sistema como um todo, não se percebe grandes alterações a menos dos dois polos citados anteriormente, como era esperado, tendo em vista os fatores de participação da variável de estado δ_8 . Porém, claramente houveram modificações em todos os modos eletromecânicos, explicitando um grande problema no ajuste de um único PSS: A influência do mesmo nos outros modos.

Tal afirmação se torna clara ao se observar que as alterações feitas no PSS da máquina 8 influencia, também, com intensidade que não pode ser desprezada, o modo regido pelo PSS da máquina 1.

$T_{lead} = 0.075$, o polo apresenta amortecimento significativamente reduzido e frequência alterada, sendo isso um problema, porém, com $T_{lead} \approx 0.158$, levemente maior que o nominal, este se encontra com seu amortecimento mais adequado, considerando esse carregamento. Esse comportamento se reflete tanto para o modo λ_{97} quanto para o λ_{93} .

Já foi explicado que a alteração em um único PSS afeta todo o sistema (visto na seção 4.3), então, observando, o sistema completo, é possível verificar que a alteração na compensação de fase do controlador provocou maiores variações nos outros polos que a variação no ganho, inclusive nos modos interáreas, tornando esse tipo de alteração mais delicada.

4.5 Estudo do sistema considerando alteração em ambos os parâmetros

Seguindo o método apresentado na seção 3.5, foi simulado o sistema-teste desse trabalho variando o ganho e a compensação de fase do PSS presente na máquina 8 considerando a mesma faixa de variação usada nas simulações anteriores.

Desse modo, foram selecionados alguns resultados dentre os 100 obtidos, como se pode verificar nas imagens 13, 14 e 15.

Nas imagens citadas anteriormente, verifica-se quais foram as simulações selecionadas assim como o o comportamento do sistema isoladamente, para cada situação.

Na imagem 16, é verificado como se comportou o sistema com as mudanças nos parâmetros, em um único gráfico. Os polos apresentados nessa imagem, são os mesmos que os mostrados individualmente.

Na tabela 4, encontram-se os valores obtidos a partir de simulações de Monte Carlo, utilizados no gráfico de posicionamento dos modos.

Tabela 4: Parâmetros obtidos a partir de Monte Carlo utilizados para obtenção dos gráficos

Ganho	T_{lead}
27.5803	0.1246
29.7782	0.2098
10.0104	0.0927
27.3088	0.2233
22.2513	0.1560
29.7990	0.1810
20.5536	0.2249
19.5905	0.1182
26.0270	0.1372
14.5569	0.1447
19.9619	0.1896
28.0170	0.1977

Nesse caso, observa-se um comportamento que reúne as duas situações anteriores, citadas e explicadas nas seções 4.3 e 4.4. Os modos λ_{93} e λ_{97} foram os mais afetados dentre o sistema completo e, algumas vezes, se encontraram bastante próximos do limite de estabilidade, mas em nenhum deles foi instável. Em muitas vezes, o amortecimento do polo referente à máquina 8, diminuiu em muito, mas não para valores críticos.

O sistema, em termos gerais, se manteve como era, visto que a participação da variável δ_8 é pequena nos outros modos. Porém, deve-se observar o modos interáreas que

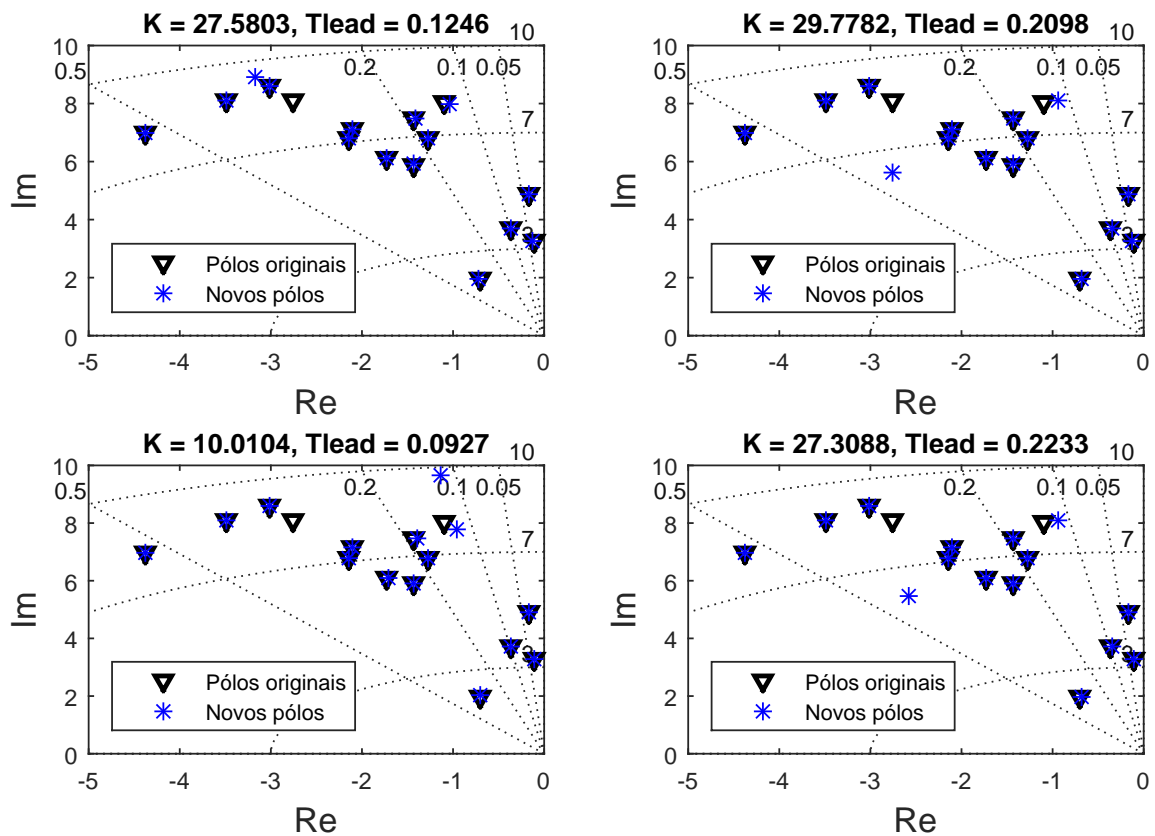


Figura 13: Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.

tiveram grande variação, em especial, nos casos em que o parâmetro T_{lead} é maior, pois o modo teve seu amortecimento prejudicado, apresentando um valor bem abaixo do esperado para uma operação segura do SEP.

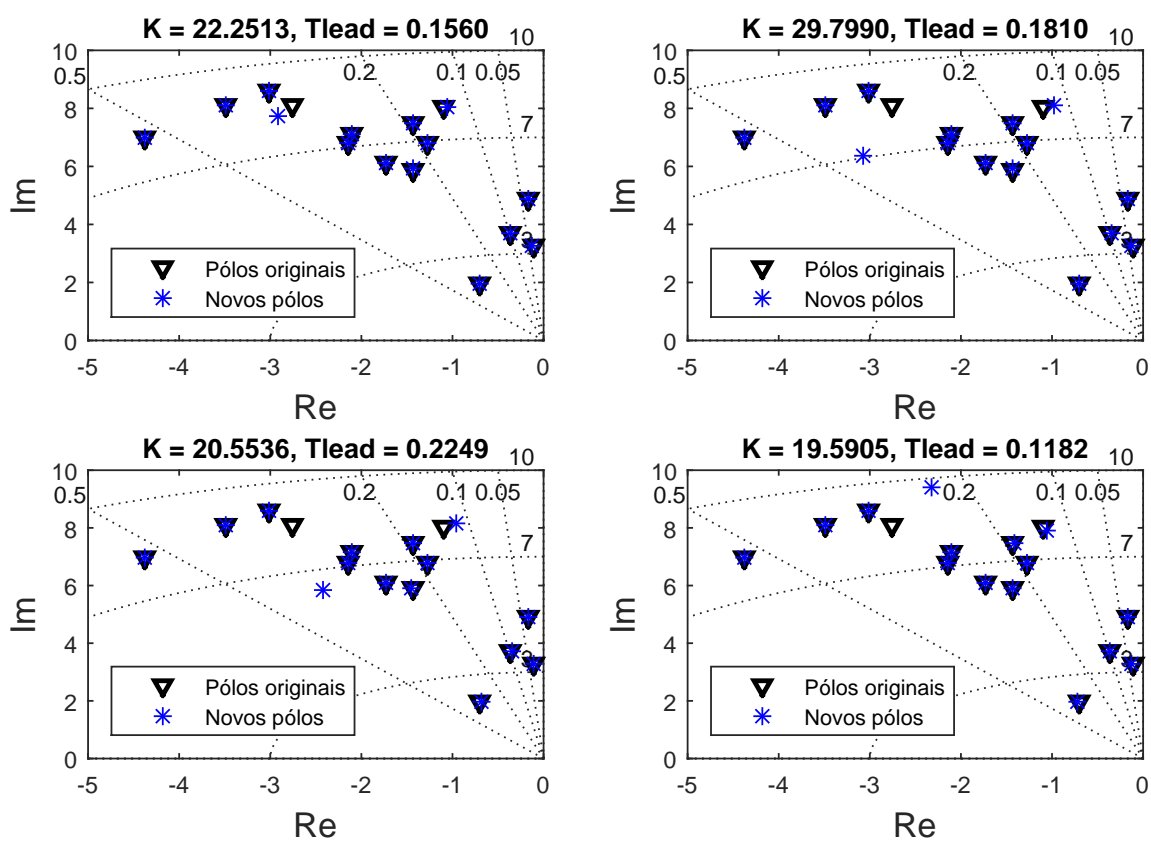


Figura 14: Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.

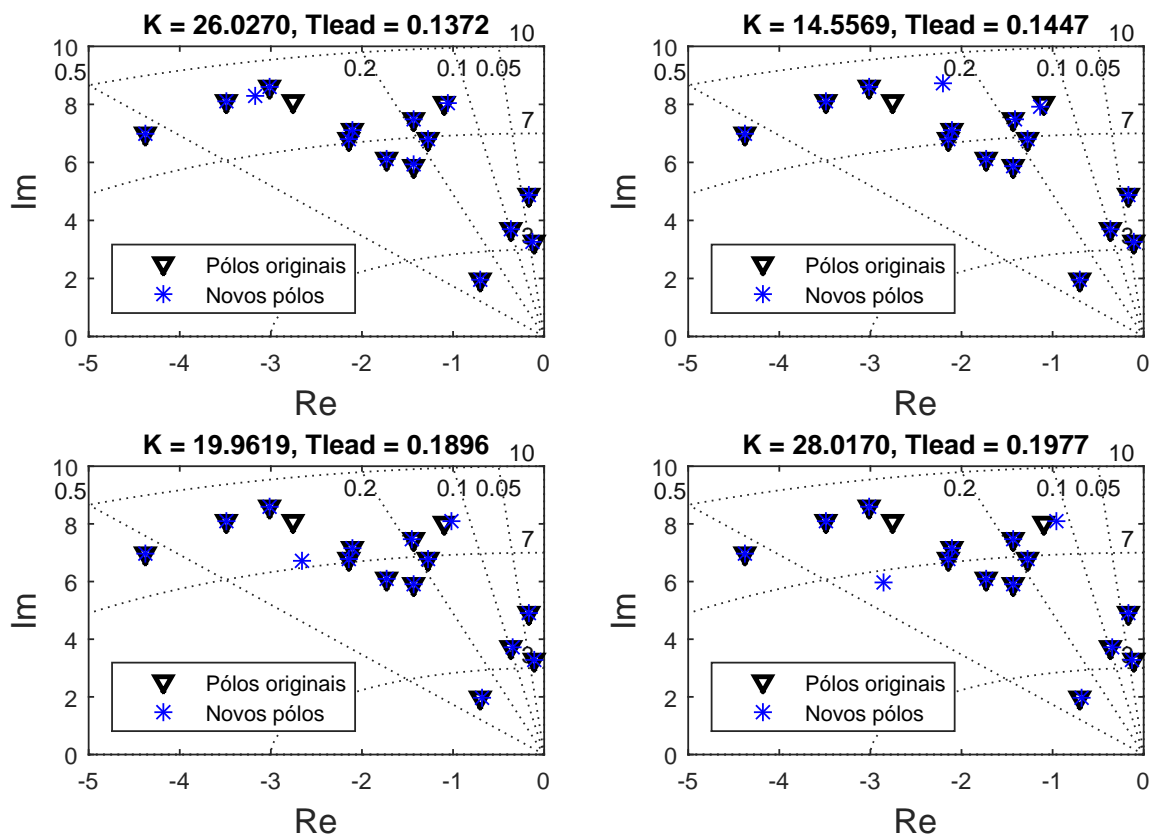


Figura 15: Simulações selecionadas para o caso de variação do ganho e da fase simultaneamente.

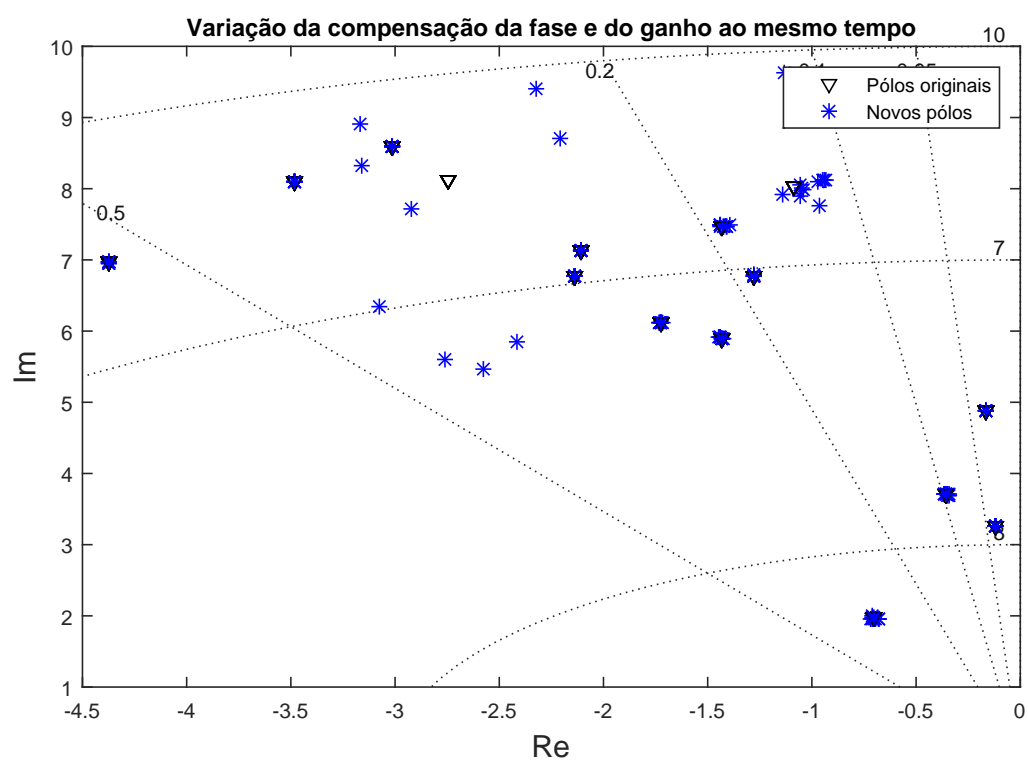


Figura 16: Gráfico resumando todos as situações selecionadas

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi verificar como se comporta o modo eletromecânico relacionado a variável de estado analisada após a alteração dos parâmetros do PSS escolhido assim como o comportamento de todos os modos do sistema estudado.

Para tal, foi utilizado um sistema-teste presente no *benchmark* da IEEE, conhecido como *New England - New York* de 68 barras, 16 geradores, sendo 4 equivalentes de áreas.

Os resultados confirmaram que cada PSS influencia no sistema como um todo e não apenas no modo em que a variável de estado está presente, no entanto, mostraram, também, que a variação afeta de maneira distinta cada polo, podendo levar o sistema a se tornar mais estável e bem amortecido mas, por outro lado, levar o sistema a instabilidade.

Além disso, verificou-se que a mudanças na compensação de fase dos controladores provocam alterações mais severas em todos os modos eletromecânicos, inclusive nos modos interáreas, deixando-os mais instáveis e mal-amortecidos. Sendo assim, é preciso de um estudo prévio mais completo para se alterar tais parâmetros.

Já em relação ao ganho, as mudanças são mais sutis e pontuais, estando muito presentes nos modos que possuem maiores fatores de participação e muito pouco presentes nos outros modos. Isso possibilita um ajuste do ganho para a melhora no amortecimento dos polos, de acordo com a carga diária.

Sendo assim, é possível concluir que o ajuste do PSS de forma individual e localizada causa efeitos colaterais no sistema prejudicando o ajuste dos outros controladores e podendo levar até a instabilidade do sistema, considerando tanto alterações no ganho quanto na fase, sendo essa última, mais severa que a primeira. Portanto, deve-se considerar ajustes coordenados dos controladores, levando em conta os que já estão presentes para que eles se complementem e não se atrapalhem.

REFERÊNCIAS

- DEMELLO, F. P. et al. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. **IEEE Transactions on Apparatus and Systems**, 1969.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7.
- LARSEN, E.; SWANN, D. Applying power system stabilizers part i: General concepts. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 6, p. 3017–3024, 1981.
- _____. Applying power system stabilizers part ii: Performance objectives and tuning concepts. **IEEE Power Engineering Review**, IEEE, n. 6, p. 63–63, 1981.
- _____. Applying power system stabilizers part iii: Practical considerations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 6, p. 3034–3046, 1981.
- MORACO, A. G. M. Utilização de fatores de participação estendidos na detecção de flutuações de tensão em sistemas com geração síncrona distribuída.
- OGATA, K.; YANG, Y. Modern control engineering. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 2002.
- PAULA, R. R. d. et al. Método de monte carlo e aplicações. Volta Redonda, 2017.
- PÉREZ-ARRIAGA, I. J.; VERGHESE, G. C.; SCHWEPPE, F. C. Selective modal analysis with applications to electric power systems, part i: Heuristic introduction. **ieee transactions on power apparatus and systems**, IEEE, n. 9, p. 3117–3125, 1982.
- RAMOS, R. A. et al. Ieee pes task force on benchmark systems for stability controls. 2014.
- ULAM, S.; RICHTMYER, R.; NEUMANN, J. V. Statistical methods in neutron diffusion. **LAMS-551, Los Alamos National Laboratory**, p. 1–22, 1947.
- ZANI, S. L. **Álgebra linear**. [S.l.: s.n.], 2011.

Anexos

ANEXO A – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND - NEW YORK

A.1 Características das barras

Tabela 5: Características das barras do sistema estudado.

Adaptado de (RAMOS et al., 2014)

Número	Tipo da Barra	P_g (kW)	Q_g (kVAr)	P_c (kW)	Q_c (kVAr)
1	Geração	250	0	0	0
2	Geração	545	0	0	0
3	Geração	650	0	0	0
4	Geração	632	0	0	0
5	Geração	505	0	0	0
6	Geração	700	0	0	0
7	Geração	560	0	0	0
8	Geração	540	0	0	0
9	Geração	800	0	0	0
10	Geração	500	0	0	0
11	Geração	1000	0	0	1
12	Geração	1350	0	0	1
13	Geração	3591	0	0	1
14	Geração	1785	0	0	3
15	Geração	1000	0	0	4
16	Referência	4000	0	0	5
17	Carga	0	0	6000	300
18	Carga	0	0	2470	123
19	Carga	0	0	0	0
20	Carga	0	0	680	103
21	Carga	0	0	274	115
22	Carga	0	0	0	0
23	Carga	0	0	248	85
24	Carga	0	0	309	-92

Tabela 5 – Continua na próxima página.

Tabela 5 – Continuação da página anterior.

25	Carga	0	0	224	47
26	Carga	0	0	139	17
27	Carga	0	0	281	76
28	Carga	0	0	206	28
29	Carga	0	0	284	27
30	Carga	0	0	0	0
31	Carga	0	0	0	0
32	Carga	0	0	0	0
33	Carga	0	0	112	0
34	Carga	0	0	0	0
35	Carga	0	0	0	0
36	Carga	0	0	102	-19.5
37	Carga	0	0	0	0
38	Carga	0	0	0	0
39	Carga	0	0	267	12.6
40	Carga	0	0	65.63	23.53
41	Carga	0	0	1000	250
42	Carga	0	0	1150	250
43	Carga	0	0	0	0
44	Carga	0	0	267.6	4.84
45	Carga	0	0	208	21
46	Carga	0	0	150.7	28.5
47	Carga	0	0	203.1	32.59
48	Carga	0	0	241.2	2.2
49	Carga	0	0	164	29
50	Carga	0	0	100	-147
51	Carga	0	0	337	-122
52	Carga	0	0	158	30
53	Carga	0	0	252.7	118.6
54	Carga	0	0	0	0

Tabela 5 – Continua na próxima página.

Tabela 5 – Continuação da página anterior.

55	Carga	0	0	322	2
56	Carga	0	0	200	73.6
57	Carga	0	0	0	0
58	Carga	0	0	0	0
59	Carga	0	0	234	84
60	Carga	0	0	208.8	70.8
61	Carga	0	0	104	125
62	Carga	0	0	0	0
63	Carga	0	0	0	0
64	Carga	0	0	9	88
65	Carga	0	0	0	0
66	Carga	0	0	0	0
67	Carga	0	0	320	153
68	Carga	0	0	329	32

A.2 Dados do AVR

Na tabela 6, estão descritos os parâmetros do AVR implementados no sistema *New England - New York*.

Tabela 6: Parâmetros do AVR usados nos geradores do sistema estudado. Adaptado de (RAMOS et al., 2014).

Modelo	T_R (s)	K_P	K_1	K_D	K_A	T_A (s)	T_D (s)	V_{RMIN} (V)	V_{EMIN} (V)	V_{RMIN} (V)	V_{EMIN} (V)	K_E	T_E (s)	K_F	T_F (s)	B_{ex}	A_{ex}
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
ST1A	0.01	-	-	-	200	-	-	-5	5	-	-	-	-	-	-	-	-
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05
DC4B	0.01	200	50	50	1	0.02	0.01	-10	10	10	10	1	0.785	0.03	1	1.959	3.19E-05

A.3 Dados do PSS

Na tabela 7, estão descritos os parâmetros do PSS implementados no sistema *New England - New York*.

Tabela 7: Parâmetros do PSS usado nos geradores do sistema estudado. Adaptado de (RAMOS et al., 2014).

Gerador	K_{PSS}	T_W (s)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	T_4 (s)	T_5 (s)	T_6 (s)	V_{MIN} (V)	V_{MAX} (V)
1	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
2	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
3	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
4	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
5	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
6	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
7	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
8	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
9	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
10	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
11	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2
12	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04	-0.05	0.2