



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



CAMILA JÉSSICA SAMPAIO DOS SANTOS

**AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM UM
SISTEMA CARGA-FREQUÊNCIA UTILIZANDO *TABU SEARCH***

JOÃO PESSOA – PB

2019

AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM UM SISTEMA CARGA-FREQUÊNCIA UTILIZANDO *TABU SEARCH*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cézar de Castro

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S231a Santos, Camila Jéssica Sampaio Dos.
Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em um
Sistema Carga-Frequência Utilizando Tabu Search /
Camila Jéssica Sampaio Dos Santos. - João Pessoa, 2019.
100 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Oscilações
eletromecânicas. 3. Tabu Search. I. Título

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM UM SISTEMA
CARGA-FREQUÊNCIA UTILIZANDO *TABU SEARCH*

Elaborado por

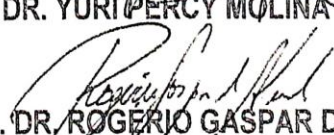
CAMILA JÉSSICA SAMPAIO DOS SANTOS

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO (Presidente)


PROF. DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ


PROF. DR. ROGERIO GASPARD DE ALMEIDA

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar presente em todos os momentos, abençoando os meus planos e mostrando o caminho para uma vida cada vez melhor.

A meus pais, Adenair Vera Sampaio dos Santos e Silamar Souza dos Santos, e às minhas irmãs que sempre me deram todo apoio necessário ao longo dessa jornada.

Ao Professor Alexandre por me orientar e ter concedido grande atenção, se dedicando a ajudar no que eu precisasse.

Agradeço também a todos os professores do colegiado de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, que contribuíram com o meu aprendizado, compartilhando conhecimentos e ideias.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, muito obrigada!

“Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar.”

Chico Science

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um controlador robusto tendo como objetivo principal o amortecimento de modos de oscilações eletromecânicas (MOE) em sistemas de potência de três áreas, buscando alcançar a estabilidade robusta do sistema. Técnicas de análise e projeto de controladores de sistemas multivariáveis no domínio de frequência são usadas para verificar a possibilidade de se obter controle robusto com controladores de ordem reduzida descentralizados. Para que os controladores atinjam a robustez é necessário que ocorra a seleção dos pares entrada-saída mais significativos para o sistema, para tal, foi aplicada técnicas de análise a um sistema carga-frequência de três áreas. O controlador é do tipo H_∞ e o método de otimização aplicado, para obter os parâmetros do controlador robusto, foi o *tabu search*.

Palavras-chaves: Sistema elétrico de potência, oscilações eletromecânicas, controle robusto, *tabu search*.

ABSTRACT

This work presents the design of a robust controller with the main objective of damping electromechanical oscillation modes (MOE) in power systems of three areas, seeking to achieve the robust stability of the system. Techniques for analysis and design of multivariate frequency domain controllers are used to verify the possibility of obtaining robust control with decentralized reduced-order controllers. In order for the controllers to achieve robustness, it is necessary to select the most significant input-output pairs for the system. For this purpose, analysis techniques were applied to a load-frequency system of three areas. The controller is of type H_∞ and the optimization method applied, to obtain the robust control of the system with uncertainties, was the tabu search.

Keywords: Electric power system, electromechanical oscillations modes, robust control, tabu search.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Sistema Estável.	26
Figura 2.2 - Sistema Instável Aperiódico.	26
Figura 2.3 - Sistema Instável Oscilatório.	26
Figura 2.4 - Malhas do controle automático de geração.	28
Figura 2.5 - Variação de Carga na Área i	29
Figura 2.6 - Diagrama de bloco da malha de controle do sistema de potência da área i	34
Figura 2.7 - Modelo completo do sistema carga-frequência de três áreas interligadas.	37
Figura 3.1 - Classificação dos diferentes tipos de estabilidade do sistema elétrico.	42
Figura 4.1 - Representação do sistema de potência com controladores.	49
Figura 5.1 - Configuração M- Δ do sistema.	58
Figura 5.2 - Diagrama de blocos do sistema de potência real.	59
Figura 5.3 - Transição no <i>Tabu search</i>	63
Figura 5.4 - Estrutura básica do algoritmo de memória de curto prazo do Tabu Search.	65
Figura 6.1 - Sistema de 3 áreas interligadas.	70
Figura 6.2 - Representação das 3 áreas interligadas com seus devidos parâmetros.	71
Figura 6.3 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$ e $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C2})$	74
Figura 6.4 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$, $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C3})$ e $(\Delta f2, \Delta P_{C2})$	75
Figura 6.5 - Valores de σ e σ de $G2(j\omega)$	77
Figura 6.6 - Função <i>Tabu Search</i>	78
Figura 6.7 - Parâmetros do Controlador gerados pela função “Tabu Search”.	82
Figura 6.8 - Gráficos de σ (T) para o controle proposto e de σ (H^{-1}/ω_0).	83
Figura 6.9 - Valores Singulares do Sistema com e sem controladores.	84
Figura 6.10 - Valores Singulares do sistema sem controlador, com controlador obtido por Algoritmos Genéticos e por Tabu search.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a_{ij} – Parâmetro que indica a parcela da potência de intercâmbio e o sentido.

b_{ij} – Elemento ji da matriz inversa de G .

d – distúrbios

D – Coeficiente de amortecimento da carga.

EC – Energia cinética da área.

ESP – Estabilizadores de sistemas de potência.

f – Frequência do sistema.

FACTS – *Flexible AC transmission systems*.

g_{ij} – Elemento ij da matriz G .

G – Matriz de funções de transferência.

G^H – Matriz conjugada e transposta de G .

H – Constante de inércia da unidade

H_∞ – H - infinito Controlador

K_D – Coeficiente de torque de amortecimento.

K_p – Ganho do gerador.

K_s – Coeficiente de torque de sincronismo.

LMI – *Linear Matrix Inequalities*.

m – massa da unidade girante

M – Modelo nominal do sistema/Constante de inércia do sistema equivalente.

MGR – Matriz de ganho relativo.

MFT_{trf} – Matriz de funções de transferência de respostas em frequência

MO – Modo de oscilação.

MOE – Modo de oscilação eletromecânico.

P_f – Potência ativa/frequência.

P_G – Potência gerada.

P_L – Potência da carga.

P_{max} – Capacidade de transmissão estática da linha.

P_r – Potência nominal total.

QV – Potência reativa/tensão.

R – Vetor de referência

RTS – *Reactive Tabu Search*

S – Matriz de sensibilidade.

SEP – Sistema elétrico de potência.

T – Matriz de malha fechada do sistema.

T_a – Torque de aceleração.

T_e – Torque elétrico.

T_{ik}^0 – Coeficiente de torque sincronizante.

T_m – Torque mecânico.

T_p – Constante de tempo do gerador.

T_R – Constante de tempo do regulador.

T_T – Constante de tempo da turbina a vapor.

TS – *Tabu search*.

U – Matriz das entradas do sistema

V_t – Tensão terminal da máquina.

W_0 – Representa os limites superiores das incertezas nos canais de controle

Y – Matriz das saídas do sistema

x_{ik} – Reatância equivalente entre as máquinas.

Δ – Incertezas do sistema.

Δf – Desvio da frequência.

ΔP_L – Variação da potência de carga (valor incremental).

ΔP_G – Variação da potência gerada (valor incremental).

ΔP_c – Variação da potência de controle (valor incremental).

ΔP_{tie} – Desvio da potência de intercambio / Variação da potência da linha (valor incremental).

ΔT_e – Variação do torque elétrico (valor incremental).

ΔT_s – Componente do torque de sincronismo.

ΔT_D – Componente do torque de amortecimento.

$\Delta \omega$ – Desvio da frequência angular.

$\Delta \delta$ – Desvio da diferença angular.

Λ – Matriz de ganhos relativos de G .

$\mu(M)$ – Valor singular estruturado de M .

λ_i – Autovalor i .

λ_{ij} – Elemento ij da matriz de ganhos relativos.

δ_i – Ângulo de torque do gerador i .

$\bar{\sigma}$ – Valor singular máximo.

$\underline{\sigma}$ – Valor singular mínimo.

σ_i – Valor singular i .

τ – Constante do sensor (referência).

ω – Velocidade angular.

ω_c – Frequência de corte.

γ – Número de condição.

ζ – Incerteza relativa no estado estacionário,

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação e justificativa.....	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Revisão da Literatura	19
1.4	Estrutura do Trabalho.....	22
2	ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	24
2.1	Introdução	24
2.2	O Problema da Estabilidade em Sistemas Elétricos	24
2.3	Modelagem de Sistemas em Carga-Frequência com Três Áreas Interligadas.....	27
2.3.1	Conceito de área	28
2.3.2	Obtenção do Modelo de uma Área de Controle do Sistema de Potência	29
2.3.3	Modelo de sistemas com as áreas interligadas.....	34
3	OSCILAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	40
3.1	Definição de estabilidade do sistema elétrico.....	40
3.2	Classificação da estabilidade do sistema de potência	41
3.3	Conceito de oscilações em sistemas elétricos	43
3.3.1	Modos locais	44
3.3.2	Modos inter-áreas	44
3.3.3	Modos intra-áreas	44
3.3.4	Modos intraplanta.....	44
3.4	Análise modal e controle em sistemas de potência.....	45
4	ANÁLISE DE SINAIS PARA CONTROLE DESCENTRALIZADO ...	48
4.1	Análise de Controlabilidade e Observabilidade	48
4.2	Interações no domínio da frequência	51
4.3	Descentralização	53
4.4	Seleção de entradas e saídas	54
5	PROJETO DE CONTROLADORES ROBUSTOS DESCENTRALIZADOS.....	57
5.1	Projeto de controladores considerando as incertezas do sistema.....	57
5.2	<i>Tabu search</i>	61
5.2.1	Memória de curto prazo.....	63
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM SISTEMA DE 3 ÁREAS.....	70

6.1	Método <i>Tabu Search</i>	70
7	CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8	REFERÊNCIAS.....	91
9	APÊNDICES	98
	APÊNDICE A - Matrizes A, B, C e D para o sistema original	98
	APÊNDICE B - Código para obtenção da MGR no estado estacionário	100
	APÊNDICE C - Código para obtenção da MGR em $w = 6$ rad/s	101

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e justificativa

Define-se um sistema elétrico de potência (SEP) como um conjunto de equipamentos que operam de forma coordenada para o fornecimento contínuo de energia elétrica, obedecendo a certos padrões de qualidade e confiabilidade, os quais exigem que o SEP trabalhe de forma segura para uma gama variada de pontos de operações, além de ser capaz de suportar eventos indesejáveis, como perturbação de carga, curto circuitos, entre outros.

Nos últimos anos a demanda por energia elétrica tem sido crescente, devido ao aumento do consumo, solicitando mais do setor elétrico. Para que o consumo possa ser satisfeito com uma elevada continuidade e qualidade de serviço as companhias e empresas investiram no sistema, tornando-o mais robusto e, conseqüentemente seu funcionamento mais complexo (Febres Tapia, 2013).

Devido ao crescimento do número de unidades geradoras e do sistema de transmissão surgiu um número de interligações cada vez maior. As interligações têm como principal objetivo diminuir a indisponibilidade de energia elétrica aos consumidores, permitindo a exportação ou importação de energia elétrica de regiões onde existe excesso ou déficit temporário de energia elétrica. Estas interligações aumentam cada vez mais a complexidade dos sistemas, e portanto, os sistemas de potência sofrem problemas operacionais causados por oscilações pouco amortecidas, as quais podem atingir regiões cada vez maiores do sistema e podem vir a ocasionar grandes *blackouts*, se não amortecidas devidamente.

Para que o funcionamento do SEP ocorra de forma confiável e segura, é necessário que o sistema opere com estabilidade, adequando a geração total com a demanda de carga (Kundur, 1994).

O motivo pelo qual o sistema tornava-se instável é a falta de sincronismo dos geradores, levando ao fenômeno das oscilações eletromecânicas (Rogers, 2000). Estas oscilações podem limitar a potência de transmissão, pois diminuem as margens de estabilidade do sistema de potência. Portanto, o amortecimento dessas oscilações tornou-se o pré-requisito para uma operação segura de um sistema elétrico e a preocupação de engenheiros e operadores (Castro, 2006).

É essencial o conhecimento e análise da natureza, tipos e frequências das oscilações, para que então se possa obter um controle eficaz dos MOE's (Modos de oscilação eletromecânicos). O projeto de controladores para o amortecimento dessas oscilações deve considerar as mudanças nas condições de operação, a transformação do sistema na presença de falhas, e a dinâmica do sistema, por isso ao utilizar técnicas lineares têm-se baixo desempenho dos controladores, devido a esses métodos não considerarem a dinâmica do sistema. (Silva Filha, 2012).

Considerando toda a complexidade inerente ao sistema, nas últimas décadas alguns pesquisadores passaram a utilizar técnicas de controle robusto que são baseadas no sistema representado no domínio do tempo (Doyle et al, 1989) ou no domínio de frequência (Kwakernaak, 1993).

A teoria de controle robusto é utilizada quando se deseja considerar a existência de incertezas ou erros entre a planta real e o seu modelo matemático no projeto do controlador. Esta teoria leva em consideração que o sistema físico a ser controlado e o ambiente onde irá operar não podem ser modelados com exatidão. Há também a possibilidade de diversos tipos de interferências, sejam elas por meio de ruídos em sensores ou perturbações imprevisíveis. Isso gera valores inesperados que o controlador deve ser capaz de tratar. Para o projeto de controladores altamente precisos mesmo na presença de consideráveis incertezas é conveniente recorrer a sistemas de controle robustos (Ogata, 2010).

Estes controladores devem satisfazer alguns requisitos de controle, como estabilidade do sistema, máximo amortecimento desejado para os modos eletromecânicos dominantes, tempo de resposta satisfatória e robustez diante das incertezas presentes na operação do sistema elétrico e a perturbações de carga (Bhattacharyya et al., 1995).

Assim, apesar da tecnologia existente em projeto de controladores, ainda são notáveis os problemas relacionados à estabilidade oscilatória de baixa frequência em sistemas elétricos, e uma das causas é a inoperância ou mau ajuste destes controladores, que são projetados por técnicas clássicas, que consideram modelos linearizados em torno de um ponto de operação sem considerar as incertezas presentes na operação do sistema, limitando a estabilidade do sistema e o desempenho robusto dos controladores (Rogers, 2000).

Por este motivo, esta pesquisa objetiva desenvolver um controlador robusto de baixa ordem para amortecer oscilações em baixa frequência produzida por pequenas perturbações, inerentes ao funcionamento do próprio sistema. A seleção prévia dos pares entrada-saída mais eficazes para aplicação dos controladores é feita a partir da MGR e valores singulares de acordo com o modelo já encontrado na literatura (Castro, 2006; Silva Filha, 2012).

O método de otimização escolhido para sintonizar o melhor controlador robusto foi o “*Tabu search*” (TS) que será implementado e apresentado neste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é sintonizar um controlador robusto de baixa ordem para amortecimento de oscilações em baixa frequência, produzida por pequenas perturbações, utilizando *Tabu search*.

Para se cumprir o objetivo geral, será necessário a realização dos seguintes objetivos específicos:

- Utilizar MGR e valor singular para para seleção dos pares entrada-saída mais eficazes para controle do sistema;
- Aplicar o controlador nos pares entrada-saída selecionados;
- Sintonizar o controlador robusto de ordem reduzida utilizando *Tabu search* modificado (restrição do espaço de busca) aplicado a um sistema carga-frequência de três áreas;
- Comparar o controlador proposto com o sintonizado utilizando algoritmos genéticos apresentado por Silva Filha (2012);

1.3 Revisão da Literatura

O sistema de potência pode ser levado a uma condição oscilatória devido às pequenas variações de cargas que ocorrem ao longo do tempo (comuns na operação normal do sistema), às faltas que eventualmente ocorram em seus componentes e, até mesmo, à retirada de algum equipamento para manutenção. Além disso, há surgimento de oscilações de pequena magnitude e baixa frequência devido às

características naturais do sistema de potência e devido a seus controladores automáticos, que atuam para manter as variáveis controladas dentro de limites especificados. Essas oscilações são indesejáveis ao funcionamento do sistema elétrico, limitando sua capacidade de transferência de potência e, em alguns casos, podendo levar o sistema a instabilidade.

Para solucionar esses problemas, sugere-se empregar equipamentos capazes de fornecer amortecimento ao sistema. A utilização de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) é uma das alternativas mais eficientes e baratas para amortecer oscilações eletromecânicas. Eles são compensadores descentralizados de avanço-atraso, comumente usados para amortecer as oscilações. Outras fontes de amortecimento empregadas ao sistema são os dispositivos *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS), onde a sua utilização no amortecimento de oscilações já vem sendo estudada e até implementada (Martins et al., 1994; Taranto e Chow, 1995; Larsen et al., 1995; Othman e Ängquist, 1995; Pal e Chaudhuri, 2005).

Devido o controle centralizado ter necessidade de trocar informações entre áreas de controle muito distantes entre si, mantendo a rapidez e confiabilidade da comunicação entre os diversos controladores, o seu custo torna-se elevado, por isso, em sistemas de grande dimensão, como o sistema elétrico de potência, comumente utilizam-se técnicas de controle descentralizado, pois a solução dos problemas com controle descentralizado mostrou-se mais eficaz e de fácil ajustagem (Castro e Araújo, 2004; Shayeghi et al., 2009).

Shayeghi e Shayanfar (2005) propuseram uma técnica de controle descentralizado que utiliza valores singulares estruturados. Em que cada controlador de área local foi concebido de forma independente, garantindo a estabilidade do sistema em malha fechada.

Outros artigos apresentam metodologias que envolvem controle de carga-frequência descentralizado, aplicado em sistemas de potência multiárea, que funcionam com êxito (Tan, 2011; Sudha e Santhi, 2011).

Castro e Araújo (2002) exibiram um método que aplica, em conjunto, valores singulares e MGR na análise de sinais para aplicação de controladores descentralizados. A combinação dessas técnicas foi movida pelos bons resultados

atingidos no desenvolvimento de técnicas multivariáveis baseadas em valores singulares. Os gráficos frequenciais dos valores singulares da matriz de funções de transferência de um sistema são intitulados, por definição, de Diagramas de Bode para sistemas multivariáveis. Nesses gráficos, os Modos de Oscilações Eletromecânicas pouco amortecidos equivalem a picos no gráfico do valor singular máximo, e os zeros de transmissão complexos, próximos do eixo complexo, aparecem no gráfico do valor singular mínimo como vales ou depressões (Cruz, 1996; Castro, 2006). Em Castro et al. (2011), seleciona-se as entradas e saídas mais significativas para o controle descentralizado em um sistema multimáquinas, por meio desta técnica.

O projeto adequado de controladores robustos de amortecimento, através dos quais são obtidos controladores que garantem formalmente a estabilidade e o desempenho do sistema para diferentes condições de operação, é fundamental para o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência nos sistemas elétricos de potência. Atualmente, deve-se ressaltar também, a presença de novos controladores de amortecimento, inseridos em unidades de geração alternativas, como unidades eólicas, e em dispositivos FACTS, distribuídos ao longo do sistema (Simões et al., 2009).

Em Castro (2006), foi desenvolvido um controlador que não precisa ter sua ordem reduzida e o mesmo foi aplicado em um sistema de potência de carga-frequência. Seus parâmetros foram ajustados a partir de técnicas diretas de otimização “*Pattern Search*” para achatar o gráfico do valor singular máximo de uma matriz das funções de transferência, com a finalidade de obter o controle robusto do sistema e amortecer as oscilações.

Ghoshal (2004), Sudha e Santhi (2011) e Boroujeni et al. (2011) utilizaram Lógica Fuzzy e Silva Filha (2012), utilizou Algoritmo Genético para projetar seus controladores robustos e aplicar em sistemas carga-frequência, capazes de encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização.

Silva (2005) utilizou uma ferramenta avançada do *Tabu search*, que é o *Reactive Tabu Search* (RTS), para alocação ótima de dispositivos de controle e proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica, em que a TSR apresentou um desempenho superior ao algoritmo genético.

A aplicação de TS (*Tabu search*) em problemas direcionados ao sistema elétrico já é uma realidade no meio científico como é o caso de Mori e Goto (2000) que

utilizaram este método de otimização para determinar a alocação ótima de dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência e se mostrou duas vezes mais rápido que algoritmos genéticos.

Tabu search também foi utilizado em projetos de estabilizadores para sistemas elétricos de potência, aplicado a dois sistemas de energia diferentes com diferentes condições de carga e configurações, garantindo a robustez do sistema (Abido e Abdel-Magid, 2001).

1.4 Estrutura do Trabalho

O corpo desta obra é formado por 8 capítulos, o qual o primeiro apresenta a introdução do trabalho, justificando a sua importância, uma revisão da literatura, mostrando o estado da arte do controle de oscilações em sistemas elétricos, do controle descentralizado, do controle robusto e por fim, do método de otimização *tabu search*. O capítulo 2 aborda sobre estabilidade do SEP, apresentando posteriormente o modelo do sistema carga frequência com três áreas. O capítulo 3 evidencia pequenas oscilações que causam a instabilidade dinâmica no sistema de potência. O capítulo 4 expõe a seleção dos pares entrada-saída mais significativos do sistema através do uso de MGR e valores singulares. O capítulo 5 apresenta o projeto do controlador, o qual será aplicado no modelo do sistema carga frequência com três áreas. O capítulo 6 exibe os resultados do sistema após a seleção prévia das entradas e saídas mais significativas, o programa elaborado pela autora utilizando o método de otimização *Tabu search*, os parâmetros do controlador e por fim, os resultados da aplicação do controlador. No capítulo 7 realiza-se as considerações finais, assim como, dá-se sugestões para trabalhos futuros. E por fim no capítulo 8 e no capítulo 9 apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas para elaboração deste trabalho e os apêndices, respectivamente.

ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2 ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

O sistema elétrico é formado por diversos componentes, tais como máquinas síncronas, sistemas de excitação, reguladores automáticos de tensão, estabilizadores de sistema de potência, entre outros. A modelagem desse sistema é feita de acordo com a necessidade do estudo a ser realizado. No caso de estudo de estabilidade eletromecânica, é necessário apresentar a modelagem do sistema elétrico de forma mais detalhada e precisa, para que os estudos feitos apresentem resultados confiáveis, considerando o dinamismo do sistema.

Porém, devido as suas inúmeras interligações e dos inúmeros componentes do sistema elétrico, a modelagem do sistema se torna muito mais complexa, surgindo a necessidade de recorrer às aproximações matemáticas e às hipóteses consideradas simplificadoras, de forma que permita simplificar a modelagem do sistema elétrico, tornando-a mais próxima possível da modelagem real, e ainda se consiga representar de forma precisa sua dinâmica, proporcionando o estudo da estabilidade eletromecânica do sistema.

Assim, este capítulo apresenta inicialmente o problema da estabilidade em sistemas elétricos. Em seguida, apresentam-se as hipóteses consideradas simplificadoras e a modelagem sistema carga frequência com três áreas.

2.2 O Problema da Estabilidade em Sistemas Elétricos

A estabilidade do sistema elétrico de potência é a habilidade que o mesmo tem em desenvolver forças restauradoras iguais ou maiores do que as forças de aceleração ou desaceleração, em uma determinada condição operacional, para manter o estado de equilíbrio do sistema depois que este ficar sujeito a uma perturbação física, de forma a manter o sincronismo entre máquinas síncronas interconectadas (IEEE/CIGRE, 2004). No estado de regime permanente, existe um equilíbrio entre o torque mecânico e o torque elétrico em cada máquina síncrona, fazendo com que a velocidade do rotor permaneça constante. Quando o sistema é perturbado, esse equilíbrio é desfeito, surgindo torques de aceleração ($T_m > T_e$) ou desaceleração ($T_e > T_m$). A Equação (2.1) representa melhor esse conceito (Saadat, 2002).

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Onde T_a , T_m e T_e são, respectivamente, o torque de aceleração, o torque mecânico e o torque elétrico (em N.m), aplicados ao eixo da máquina síncrona. A falta de controle desses torques pode levar o sistema à instabilidade. Quando o rotor oscila em uma dada frequência, o torque elétrico tende a acompanhar essa oscilação na mesma frequência, se decompondo em duas componentes ortogonais: uma proporcional à variação angular e outra proporcional à variação da velocidade angular do rotor, conforme mostram as equações (2.2) à (2.4). Ressalta-se que essa decomposição é extremamente útil para caracterizar o fenômeno da estabilidade à pequenas perturbações.

$$\Delta T_e = \Delta T_S + \Delta T_D \quad (2.2)$$

$$\Delta T_S = K_S \Delta \delta \quad (2.3)$$

$$\Delta T_D = K_D \Delta \omega \quad (2.4)$$

Onde ΔT_e é a variação do torque elétrico. A parcela ΔT_S é a componente de torque de sincronismo, responsável pelo desvio instantâneo do torque elétrico em fase com o desvio do ângulo do rotor, sendo K_S , o coeficiente de torque de sincronismo. A parcela ΔT_D é a componente de torque de amortecimento, responsável pelo desvio do torque elétrico em fase com o desvio instantâneo da velocidade angular, sendo K_D , o coeficiente de torque de amortecimento.

A Equação (2.2) mostra que a estabilidade do sistema depende da existência de suficientes torques de sincronismo e de amortecimento para manter o equilíbrio do sistema após ocorrer uma perturbação, ou seja, um sistema de potência é estável quando $\Delta T_S > 0$, para que se possa garantir a manutenção do sincronismo entre as máquinas do sistema, e também quando $\Delta T_D > 0$, para que se possa assegurar um

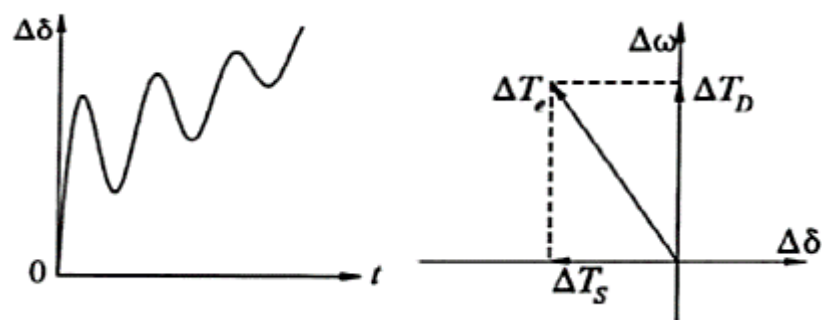
amortecimento adequado das oscilações eletromecânicas dos rotores das máquinas síncronas, conforme ilustra a Figura 2.1.

Figura 2.1 - Sistema Estável.

Fonte: Adaptado de Kundur, 1994

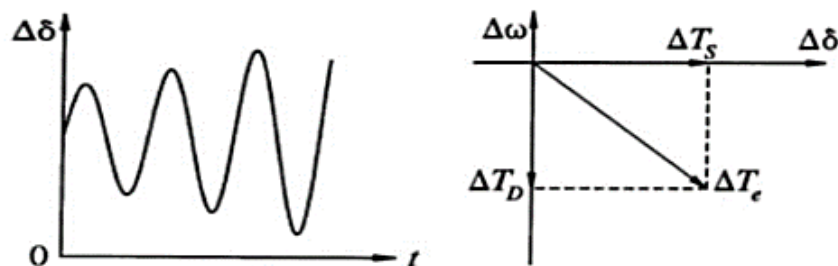
A insuficiência de qualquer um desses torques tornaria instável a operação do sistema. A falta de torque de sincronismo resultaria em uma instabilidade manifestada através de um desvio aperiódico e progressivo do ângulo do rotor, conforme ilustrado na Figura 2.2. Por outro lado, a ausência de torque de amortecimento resultaria em instabilidade do tipo oscilatória (Kundur, 1994), como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.2 - Sistema Instável Aperiódico.



Fonte: Kundur, 1994

Figura 2.3 - Sistema Instável Oscilatório.



Fonte: Kundur, 1994

Devido a máquina estar operando com sistema de excitação de campo constante e por isso não consegue ajustar a tensão terminal da máquina, ocorre então a insuficiência de torque de sincronismo. Neste contexto, surge o sistema de excitação

com alta velocidade de resposta e ganho elevado, capaz de suprir e ajustar automaticamente a corrente de campo do gerador, mantendo a tensão terminal da máquina em um valor de ajuste adequado quando possíveis perturbações ocorrem, melhorando o coeficiente de torque de sincronismo. No entanto, o ganho elevado do sistema de excitação implica na redução do amortecimento natural da máquina, provocando oscilações no sistema elétrico.

Neste contexto, nota-se que a estabilidade do sistema elétrico é um fenômeno que envolve o estudo das oscilações eletromecânicas, podendo ser de pequena ou de grande amplitude e ter efeito de curta ou longa duração sobre o sistema, além de possuir uma modelagem bastante complexa com a severidade das perturbações.

2.3 Modelagem de Sistemas em Carga-Frequência com Três Áreas Interligadas

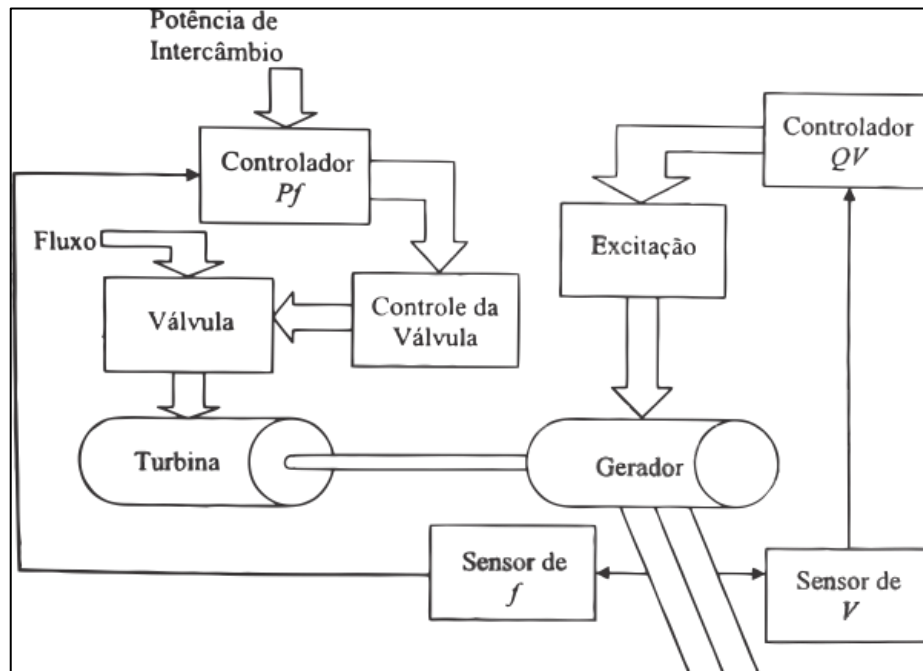
O controle automático de geração de um sistema de potência é formado por dois canais de controle, Carga-Frequência (Pf) e Potência Reativa-Tensão (QV). O principal objetivo do controle QV é manter a tensão terminal do gerador constante, enquanto do controle Pf são manter a potência gerada igual à demanda de potência elétrica (controle primário); manter a frequência do sistema constante e igual à frequência padrão e manter as potências de intercâmbio constantes e iguais às programadas (controle suplementar) (Mota, 2006).

O controle da potência ativa e da frequência não é independente do controle de potência reativa e da tensão nos geradores. Porém, pode-se obter uma visão melhor da operação do sistema considerando o controle da potência ativa P e da frequência f independente do sistema de excitação da máquina, ou seja, do controle da tensão e dos reativos no gerador.

Neste trabalho, o foco é o controle Pf , o qual será aplicado a um modelo de sistemas de potência com três áreas.

As malhas de Controle Automático de Geração podem ser verificadas na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Malhas do controle automático de geração.



Fonte: Mota, 2006

2.3.1 Conceito de área

Área de controle é uma parte de um sistema de potência na qual os grupos de unidades geradores são responsáveis pelo suprimento das variações da carga contida nesta parte do sistema. As fronteiras de uma área de controle coincidem com as fronteiras elétricas de uma concessionária que possua uma razoável capacidade de geração e carga significativa.

A área pode ser representada por uma única companhia respondendo às suas próprias variações de carga, parte de uma companhia respondendo às variações que ocorrem em uma determinada parte da rede ou um grupo de companhias responsáveis por absorver variações de carga que ocorram em qualquer lugar dentro dos limites da mesma. O controle Pf , ao contrário do controle QV , é feito coletivamente atuando sobre todas as unidades geradoras em uma designada área de controle (Elgerd, 1976).

Espera-se que as áreas de controle sejam balanceadas em termos de carga-geração, de modo que operem em paralelo com os outros sistemas de controle, para não causar problemas de oscilação entre as áreas ou de instabilidade. Que as linhas de interligação entre áreas trabalhem com folga suficientes para assegurar

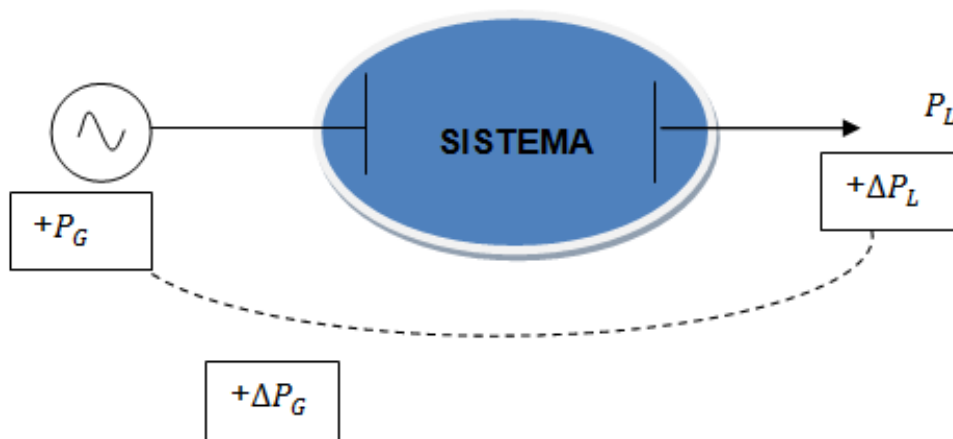
intercâmbios de auxílio, emergência e contingência. E que as unidades geradoras de uma área sejam tão coerentes quanto possível, do ponto de vista dinâmico.

No caso das máquinas que compõem uma área serem suficientemente coerentes, ou seja, oscilarem com a mesma velocidade angular e tensões terminais em uma relação complexa constante (Mota, 2006), o modelo de uma unidade geradora pode ser empregado na representação de uma área.

2.3.2 Obtenção do Modelo de uma Área de Controle do Sistema de Potência

Considerando que na área i , a qual operava em equilíbrio, subitamente tenha se verificado um aumento de carga ΔP_{Li} , conforme a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Variação de Carga na Área i .



Fonte: Adaptado de Filho (1984)

Devido à ação de controle primário das unidades geradoras, haverá um acréscimo de geração ΔP_{Gi} , que inicialmente não corresponderá exatamente ΔP_{Li} .

Haverá, então, instantaneamente, um desequilíbrio de potência neste sistema, caracterizado por:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li} \quad (2.5)$$

Este desequilíbrio de potência é absorvido pelo sistema de potência, para este caso, de duas formas distintas:

- Variação da energia cinética do sistema (EC_i), a uma taxa de $\frac{d}{dt}(EC_i)$;
- Variação do consumo de cargas, pois a frequência se eleva acima da nominal e, $D = \frac{\partial P_L}{\partial f}$.
- Variação de potência de intercambio entre áreas distintas $\Delta P_{tie,i}$;

Isto pode ser traduzido matematicamente pela Equação:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li} = \frac{d}{dt}(EC_i) + D\Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (2.6)$$

O 1º termo desta Equação, $\frac{d}{dt}(EC_i)$, poderá ser escrito de outra forma, se levar em conta que a energia cinética inicial no sistema é:

$$EC_{inicial,i} = \frac{1}{2} m f_0^2 \quad (2.7)$$

Após o aumento da frequência a energia cinética torna-se:

$$EC_i = \frac{1}{2} m f_i^2 \quad (2.8)$$

$$\frac{EC_i}{EC_{inicial,i}} = \left(\frac{f_i}{f_0}\right)^2 \quad (2.9)$$

Onde f_0 é a frequência nominal e f_i a frequência instantânea da área de controle.
Sendo:

$$f_i = f_0 + \Delta f_i \quad (2.10)$$

Assim:

$$f_i^2 = f_0^2 + 2f_0\Delta f_i + \Delta f_i^2 \quad (2.11)$$

Se Δf_i é pequeno, pode-se dizer:

$$f_i^2 \cong f_0^2 + 2f_0\Delta f_i \quad (2.12)$$

Logo:

$$\frac{EC_i}{EC_{inicial,i}} = \left(\frac{f_i}{f_0}\right)^2 = \frac{f_0^2 + 2f_0\Delta f_i}{f_0^2} = 1 + 2\frac{\Delta f_i}{f_0}$$

$$EC_i = \left(1 + 2\frac{\Delta f_i}{f_0}\right) EC_{inicial,i} \quad (2.13)$$

Portanto:

$$\frac{d}{dt}(EC_i) = \frac{2EC_{inicial,i}}{f_0} \frac{d}{dt} \Delta f_i \quad (2.14)$$

O segundo termo da Equação 2.6 é obtido empiricamente, pois, considerando cargas compostas, que é a maioria dos sistemas reais, pode-se observar na prática que a carga varia, dependendo da frequência e da velocidade.

O terceiro termo da Equação 2.6 é a potência incremental da linha de ligação, $\Delta P_{tie,i}$, exportada da área i , que é igual à soma de todas as potências incrementais que saem dessa área e migram para áreas vizinhas através das linhas de transmissão. Considerando, por exemplo, as linhas que ligam a área i a área k ,

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_k \Delta P_{tie,ik} \quad (2.15)$$

Se as perdas das linhas de transmissão forem desprezadas, as potências incrementais individuais em função do coeficiente de sincronização podem ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta P_{tie,ik} = T_{ik}^0 (\Delta \delta_i - \Delta \delta_k) \quad (2.16)$$

Sabendo que T é:

$$T_{ik}^0 = P_{max,ik} \cos(\delta_i^0 - \delta_k^0) \quad (2.17)$$

$P_{max,ik}$ é a capacidade de transmissão estática da linha em questão. Se essa capacidade for pequena em comparação com a potência nominal total da área considerada, pode-se dizer que essa linha é fraca.

Além disso, pode-se reescrever a Equação 2.16 em função da frequência incremental, Δf_i , pois esta está relacionada com as variações de fase das tensões, assim:

$$\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta \delta_i \quad (2.18)$$

$$\Delta P_{tie,ik} = 2\pi T_{ik}^0 \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_k dt \right) \quad (2.19)$$

Logo, a potência incremental total da linha que sai da área i , será:

$$\Delta P_{tie,i} = 2\pi \sum_k T_{ik}^0 \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_k dt \right) \quad (2.20)$$

A energia cinética inicial, quando colocada em p.u. da potência base (P_{ri}), pode ser chamada de H , então ao dividir todos os termos da Equação 2.6 por P_{ri} que é a potência nominal total, em MW, da área i , e considerando a Equação 2.14, terá:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li} = \frac{2H_i}{f_0} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,t} \quad (2.21)$$

Empregando a transformada de Laplace na Equação 2.21,

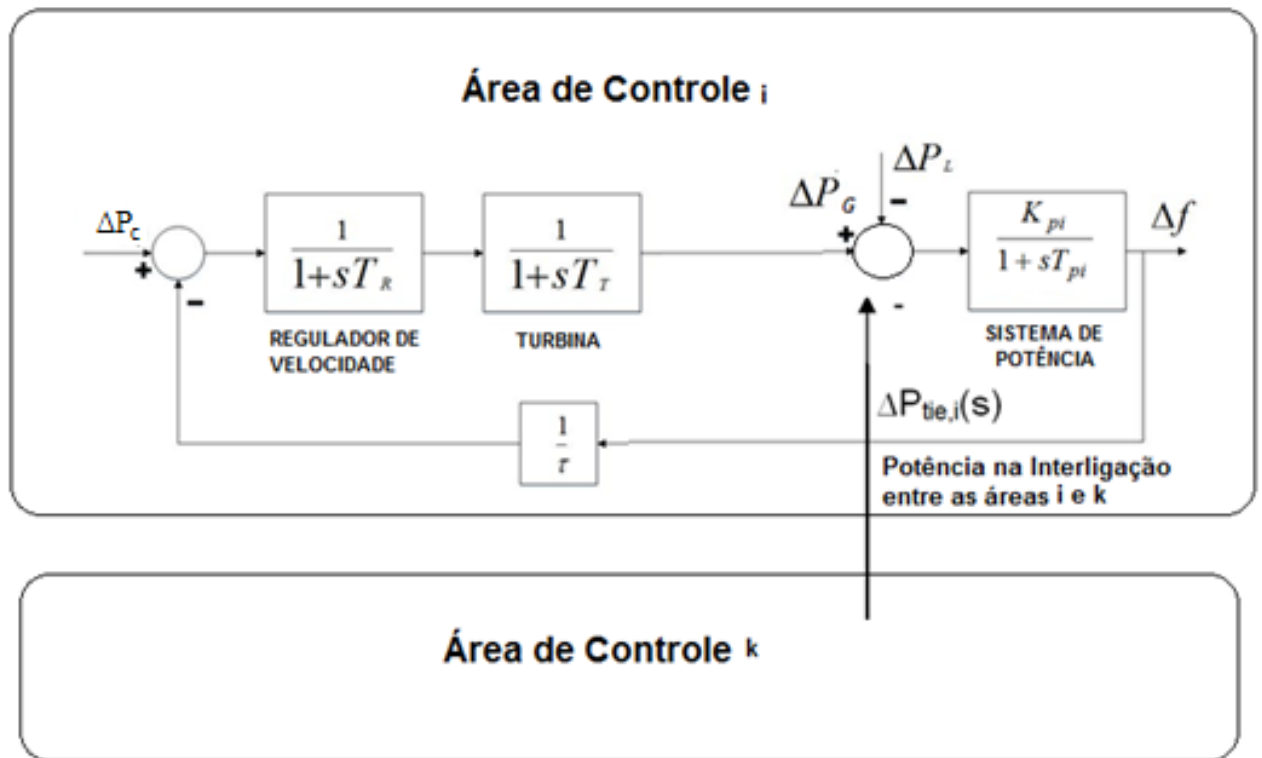
$$\Delta F_i(s) = [\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Li}(s) - \Delta P_{tie,i}(s)] \frac{K_{pi}}{1 + sT_{pi}} \quad (2.22)$$

Em que:

$K_{pi} = \frac{1}{D}$ = Constante inerente do sistema devido à variação de sua carga com frequência.

$T_{pi} = \frac{2H}{f_0 D}$ = Constante de tempo da resposta do sistema, que varia com a sua inércia e com a resposta da carga com a frequência.

Dessa forma, pode-se agora representar toda a malha de controle deste sistema de potência único, da seguinte forma (supondo, por exemplo, o modelo de turbina mais simples):

Figura 2.6 - Diagrama de bloco da malha de controle do sistema de potência da área i .

Fonte: Adaptado de Filho (1984)

Sendo as variáveis incrementais ΔP_L , Δf e ΔP_G , respectivamente, a variação da potência em pu requerida pela carga elétrica, a variação da frequência em Hz e a variação da potência gerada em p.u. .

O regulador de velocidade atua no sistema para que a potência gerada seja igual à potência da carga. Ressaltando que ΔP_c é a entrada do controle do regulador de velocidade da área, e que a regulação de velocidade em estado de equilíbrio é representada por $1/\tau$ dada em porcentagem.

2.3.3 Modelo de sistemas com as áreas interligadas

Uma área se comporta como uma grande unidade geradora, aproximadamente. Portanto, para o caso de duas áreas ou mais, interligadas, poderá seguir o mesmo raciocínio utilizado para o caso de duas ou mais, máquinas síncronas, operando em paralelo e interligadas através de uma reatância mutua.

Ao considerar-se duas áreas, a troca de potência entre as máquinas é dada por:

$$P_{12} = \frac{|V_{t1}||V_{t2}|}{x_{12}} \sin \delta_{12} \quad (2.23)$$

Em que:

$V_{t1} = |V_{t1}| \angle \delta_1$ = tensão terminal da máquina 1;

$V_{t2} = |V_{t2}| \angle \delta_2$ = tensão terminal da máquina 2;

x_{12} = reatância equivalente entre as máquinas 1 e 2.

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2.$$

Considerando pequenas perturbações, pode-se adotar o modelo linearizado da Equação 2.23, que é mostrado na Equação 2.24.

$$\Delta P_{tie} = T_{12}^0 \Delta \delta_{12} \quad (2.24)$$

Em que:

ΔP_{tie} = desvio da potência de intercambio, em p.u.;

$\Delta \delta_{12}$ = desvio da diferença angular, em rad;

$T_{12}^0 = \frac{|V_{t1}||V_{t2}|}{x_{12}} \cos \delta_{12(0)}$ = coeficiente de torque sincronizante em p.u.

Porém, o δ não é uma variável de estado do modelo de controle em estudo, portanto, não pode utilizá-la diretamente, então:

Sabe-se que $\Delta \omega = 2\pi f = \frac{d\Delta \delta}{dt}$. Assim, $\Delta \delta = 2\pi \int_0^t \Delta f dt$.

A partir da transformada de Laplace, tem-se: $\Delta\delta = 2\pi \frac{\Delta f}{s}$. Assim, a Equação 2.24 torna-se:

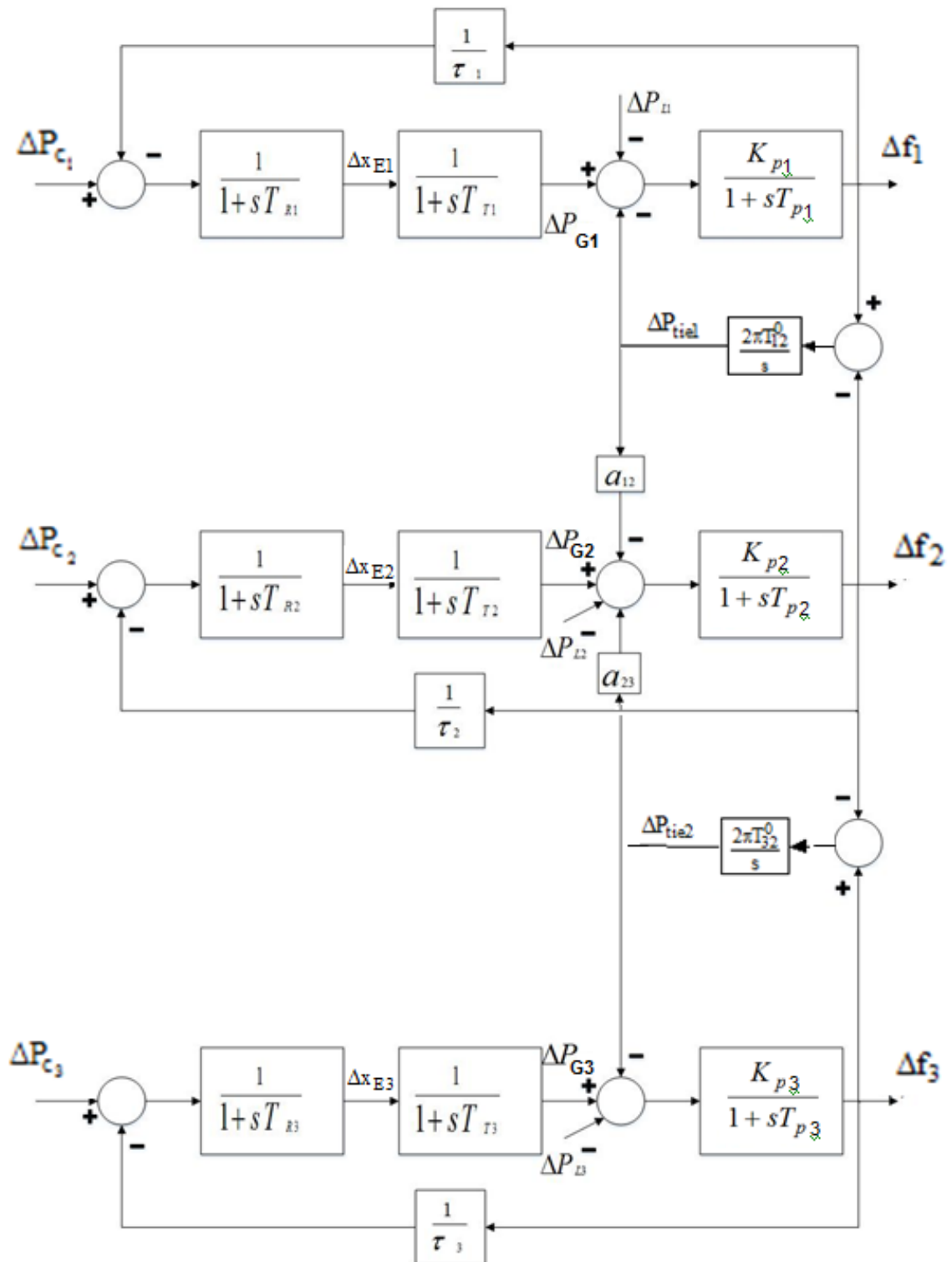
$$\Delta P_{tie,1} = \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (2.25)$$

Estendendo este modelo para o caso de três áreas, será acrescentado a Equação de intercambio de potencia entre as áreas 2 e 3, que é dada por:

$$\Delta P_{tie,2} = \frac{2\pi T_{32}^0}{s} (\Delta f_3 - \Delta f_2) \quad (2.26)$$

O diagrama de blocos para um sistema de 3 áreas é mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Modelo completo do sistema carga-frequência de três áreas interligadas.



Fonte: Silva Filha, 2012.

Na Figura 2.7 o sinal negativo indica que a área i fornece energia, enquanto que os valores positivos indicam que essa área recebe energia. As variáveis, a_{ij} , indicam a parte e o sentido da potência de intercâmbio. Nesse modelo, a interligação entre duas áreas é feita através de uma linha de transmissão, focando apenas as potências de intercâmbio e desconsiderando as características elétricas da linha. (Elgerd, 1976).

Por fim, esta modelagem representa o sistema de três áreas, a qual serão aplicados os controladores.

OSCILAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3 OSCILAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os sistemas de geração de energia elétrica se tornavam instáveis devido à falta de sincronismo dos geradores. Com o crescimento do SEP e consequente crescimento das potências de intercâmbio, a estabilidade dos sistemas elétricos tornou-se vulnerável por causa das oscilações, que podem limitar a potência transmitida além de aumentar o risco da ocorrência de paradas não programadas de oferta de energia (Castro, 2006).

3.1 Definição de estabilidade do sistema elétrico

De acordo com IEEE/CIGRE (2004) a estabilidade de um sistema elétrico de potência é a habilidade do sistema, para uma determinada condição de operação, de atingir um estado de equilíbrio após estar sujeito a alguma perturbação física com a maioria de suas variáveis limitadas, isto é, dentro de limites operacionais, de tal forma que praticamente todo o sistema permaneça intacto.

O sistema elétrico está sujeito a diversas perturbações: pequenas e grandes. Pequenas, na forma de alteração da carga continuamente, e grandes, como um curto-circuito uma linha de transmissão ou a saída de operação de um grande gerador. O sistema deve ser capaz de se ajustar as condições de mudança e operar satisfatoriamente, mesmo na ocorrência de mudanças estruturais devido a um grande distúrbio.

A instabilidade transitória tem sido o centro da atenção de boa parte da indústria de energia elétrica em relação à estabilidade do sistema. Devido a evolução do sistema, foram desenvolvidos novas tecnologias e formas de controles, surgindo diferentes formas de instabilidade, assim, a estabilidade de tensão, de frequência e oscilações interárea requerem mais atenção que antes (IEEE/CIGRE, 2004).

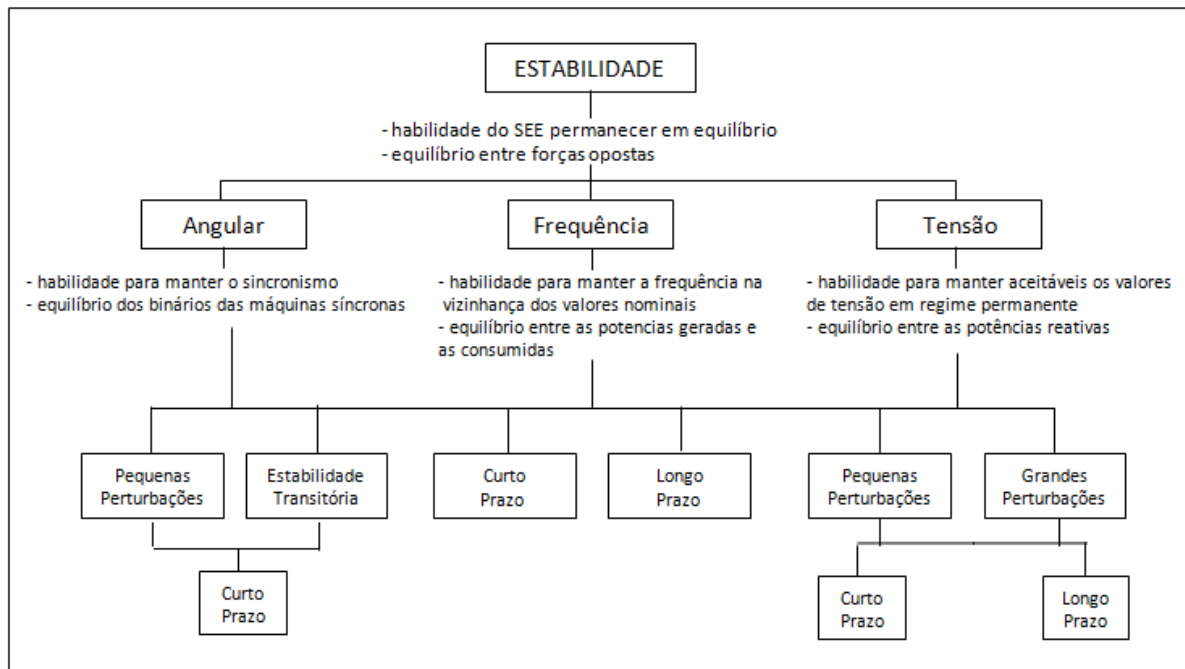
O sistema pode ser estável para uma certa perturbação e instável para outra, pois é impraticável e antieconômico projetar sistemas de potência para ser estável para todos os tipos de distúrbios possíveis, portanto as contingências de projeto são selecionadas baseada na probabilidade de ocorrência elevada, assim, a estabilidade para uma grande perturbação sempre se refere a um cenário especificado, logo, um conjunto de equilíbrio estável tem uma região finita de possibilidades.

3.2 Classificação da estabilidade do sistema de potência

O estudo da estabilidade de um SEP divide-se em três grandes classes: Estabilidade Angular, Estabilidade de Frequência e Estabilidade de tensão, conforme se mostra na Figura 3.1. Esta classificação tem por base os seguintes fatores: o fenômeno que caracteriza o tipo de instabilidade e as causas físicas que conduzem à sua ocorrência. Assim, para o desenvolvimento de métodos de análise e dos respectivos algoritmos é necessária a segmentação do problema em estudo de acordo com o tipo e a amplitude da perturbação, as variáveis necessárias, as ferramentas matemáticas, o período de tempo sob análise e as ações de controle corretivo a implementar. A classificação de estabilidade proposta é baseada nas seguintes considerações (IEEE/CIGRE, 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 o método de cálculo e previsão da estabilidade;
- Os componentes, processos e a duração que devem ser considerados para verificar a instabilidade;

Figura 3.1 - Classificação dos diferentes tipos de estabilidade do sistema elétrico.



Fonte: Adaptado de IEEE/CIGRE (2004)

A de estabilidade angular ou rotórica refere-se à habilidade das máquinas síncronas, de um sistema de energia interligado, permanecerem em sincronismo após uma perturbação. Depende da habilidade de manter/restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada máquina síncrona do sistema. A instabilidade pode ocorrer na forma de um crescimento das oscilações para alguns dos geradores síncronos, levando a uma perda de sincronismo com os restantes alternadores.

A estabilidade angular do sistema para pequenas perturbações depende da existência do componente de torque de sincronismo e de amortecimento. A falta de torque de sincronismo resulta em instabilidade aperiódica ou não oscilatória, ao passo que a falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória. O problema de instabilidade aperiódica tem sido largamente eliminado com a utilização de reguladores de tensão de atuação contínua nos geradores. Já a instabilidade transitória pode ser de natureza local ou global, os problemas locais envolvem uma pequena parte do sistema, como uma única usina, contra todo o resto do sistema, enquanto que os problemas globais são causados por interações entre grandes

grupos geradores, como um grupo de geradores de uma área contra um de outra área (IEEE, 1995).

A estabilidade de tensão refere-se à habilidade do sistema para manter as tensões em todos os barramentos, após a ocorrência de uma perturbação, para dadas condições iniciais de funcionamento. Dependerá da habilidade para manter/restabelecer um equilíbrio entre a procura e carga fornecida pelo sistema. (Cutsem e Vournas, 1998).

Semelhante à estabilidade angular, a estabilidade de tensão também é dividida em pequena perturbação, tais como alterações incrementais na carga do sistema e de grande perturbação, como distúrbios causados por falhas do sistema, perda de geração ou contingências de circuito.

A estabilidade de frequência refere-se à habilidade de um sistema de potência manter a frequência após a ocorrência de um incidente severo, resultando num desequilíbrio entre a produção e a carga. Dependerá da habilidade do sistema para manter/restaurar o equilíbrio entre a produção e a carga, com o mínimo de deslastre de cargas. Geralmente, os problemas de estabilidade de frequência estão associados com inadequações nas respostas dos equipamentos, má coordenação dos equipamentos de controle e proteção, ou reserva de geração insuficiente. A estabilidade de frequência pode ser um fenômeno de curto ou de longo prazo (IEEE/CIGRE, 2004).

3.3 Conceito de oscilações em sistemas elétricos

As oscilações relacionadas as equações de oscilação do sistema são chamadas “oscilações eletromecânicas” e os modos de oscilação associados a estas são denominados “modos de oscilações eletromecânicos” (MOE) (Castro, 2006).

Os MOE se tornaram críticos devido a interligação das centrais geradores de energia elétrica a fim de permitir uma maior disponibilidade de potência e confiabilidade ao sistema interligado. Os quatro principais tipos são os modos locais, os modos inter-área, os modos intra-área e os modos intraplantas, cada um com sua particularidade como pode ser visto a seguir (Kundur, 1994;).

3.3.1 Modos locais

São devidos às oscilações que podem ocorrer quando os geradores são ligados a um sistema de potência relativamente grande através de linhas de transmissão fracas. A frequência natural de um destes modos é tipicamente entre 0,8-1,8 Hz. Um modo local é, usualmente, fortemente controlável e fortemente observável em um único gerador. O termo local é utilizado devido as oscilações ocorrerem em uma estação ou em uma pequena parte do sistema.

3.3.2 Modos inter-áreas

Esse modo ocorre devido à oscilação de muitas máquinas em uma parte do sistema (área) contra máquinas em outra parte (área). São causados por dois ou mais grupos geradores estreitamente interligados, interligação esta que ocorre por linhas fracas, significando que possuem capacidade muito inferior a capacidade do sistema que elas conectam. A frequência natural de oscilação desses modos, geralmente, é na faixa de 0,1-0,8 Hz. Um modo inter-área pode ser moderadamente observável e controlável em diferentes áreas ou fracamente observável e fortemente controlável em uma área, mas fortemente observável e fracamente controlável em outra área (Yang e Feliachi, 1994).

3.3.3 Modos intra-áreas

São devidos às respostas dos geradores oscilando uns contra os outros numa mesma área. Um modo intra-área tem frequência natural no mesmo intervalo de frequências dos modos locais. Assim, são usualmente tratados como modos locais, embora tenham características específicas de controlabilidade e observabilidade (Castro e Araújo, 1998).

3.3.4 Modos intraplanta

São modos de frequência superior a 1 Hz, que surgem devido à interação entre geradores numa mesma central de geração. Apesar de serem suficientemente amortecidos em situações normais, esse amortecimento pode deteriorar com a

aplicação de ESP, necessitando de uma realimentação através de uma combinação de sinais por meio do próprio ESP (Schleif et al., 1979; Crenshaw et al., 1983; Araújo e Castro, 1995). Para o estudo de sistema de potência de grande porte, não se considera esses modos, pois cada central de geração é representada por um gerador equivalente.

Existem outros modos críticos, como o modo de excitação que é associado aos sistemas de excitação dos geradores. E também os modos torcionais que ocorrem devido às vibrações do eixo do grupo turbina-gerador. Esse problema só aparece em geradores acionados por turbinas térmicas, pois giram com velocidade maior que as hidráulicas (Rogers, 2000; Castro, 2006).

3.4 Análise modal e controle em sistemas de potência

É imprescindível a análise dos modos de oscilação críticos em sistemas de potência, para que se possa conhecer a que geradores estão associados e para o correto amortecimento dessas oscilações (Castro, 2006). Como foi visto, os modos mais críticos nesse tipo de sistema são os MOE. Os que estão associados às equações de oscilação pouco dependem do modelo do gerador, todavia os seus amortecimentos se modificam com a inserção do sistema de excitação, das equações de amortecimento do gerador e outros parâmetros no modelo.

A análise prévia da controlabilidade e observabilidade dos MOEs e das suas interações são indispensáveis para uma seleção mais efetiva dos geradores onde serão aplicados os controladores. Esta análise prévia é importante para garantir confiabilidade, estabilidade e segurança ao sistema. A confiabilidade é o objetivo geral no projeto e operação do sistema. Para ser confiável, ele deve ser seguro pela maior parte do tempo. Para ser seguro, ele deve ser estável, mas também deve ser seguro para outras contingências que não são classificadas como problemas de estabilidade, como danos a equipamentos, quedas de torres devido a sabotagem (IEEE/CIGRE, 2004).

A estabilidade oscilatória está ligada ao equilíbrio dos torques, que por sua vez, depende do amortecimento dos MOE. Essas taxas de amortecimento são baixas: por volta de 10% já é considerado um bom amortecimento (Wang e Swift, 1996; Cai e

Erlich, 2003). Um controlador aplicado num gerador pode afetar vários MOEs. A falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória, ou seja, em oscilações com amplitudes crescentes no tempo. A ação de se introduzir sinais estabilizantes na referência dos reguladores automáticos de tensão é exercida através do ESP (estabilizador de sistema de potência), que corresponde ao método mais prático de amortecer os MOE (Rogers, 2000).

O ato de introduzir-se sinais estabilizantes na referência dos reguladores automáticos de tensão é exercido através do estabilizador do sistema de potência. Este possibilita um aumento da componente de amortecimento do torque elétrico através da modulação da tensão de referência do sistema de excitação do gerador (Ayres, 2005). Além dos modelos clássicos, algumas técnicas de controle têm sido propostas para o projeto de ESP, como por exemplo, técnicas de controle robusto utilizando otimização H_∞ e LMI (Doyle et al., 1989; Taranto e Chow, 1995; Ramos et al., 2004; Ramos et al., 2005).

**ANÁLISE DE SINAIS PARA CONTROLE
DESCENTRALIZADO**

4 ANÁLISE DE SINAIS PARA CONTROLE DESCENTRALIZADO

Neste capítulo será exposta a seleção dos pares entrada-saída mais significativos do sistema através do uso de MGR e valores singulares, pois é a única forma de evitar zeros indesejáveis para aplicação dos controladores.

4.1 Análise de Controlabilidade e Observabilidade

Van de Wal e De Jager (2001) definiram controlabilidade de um MO como a capacidade do sistema para amortecer-lo e alcançar um desempenho aceitável com entradas e saídas limitadas. Da mesma forma, é possível elucidar a observabilidade de um MO como a contribuição dele na resposta do sistema. A controlabilidade e observabilidade de um modo é diretamente influenciado pelos zeros do sistema, além do projeto dos controladores (Skogestad e Postlethwaite, 2005).

Seja um sistema de potência geral com n unidades, m entradas de controle e r sinais de saída. A descrição entrada-saída do sistema é dada por:

$$Y(j\omega) = G(j\omega).U(j\omega) \quad (4.1)$$

Onde $G(j\omega)$ é a matriz de funções de transferência de respostas em frequência (MFTfr).

Para análise de controlabilidade e observabilidade modais em sistemas multivariáveis no domínio da frequência são empregados valores singulares da MFTfr, que para a matriz $G(j\omega)$, são definidos na Equação 4.2.

$$\sigma_i(\mathbf{G}) = \sqrt{\lambda_i(\mathbf{G}^H \mathbf{G})} = \sqrt{\lambda_i(\mathbf{G} \mathbf{G}^H)}, i = 1, \dots, k \quad (4.2)$$

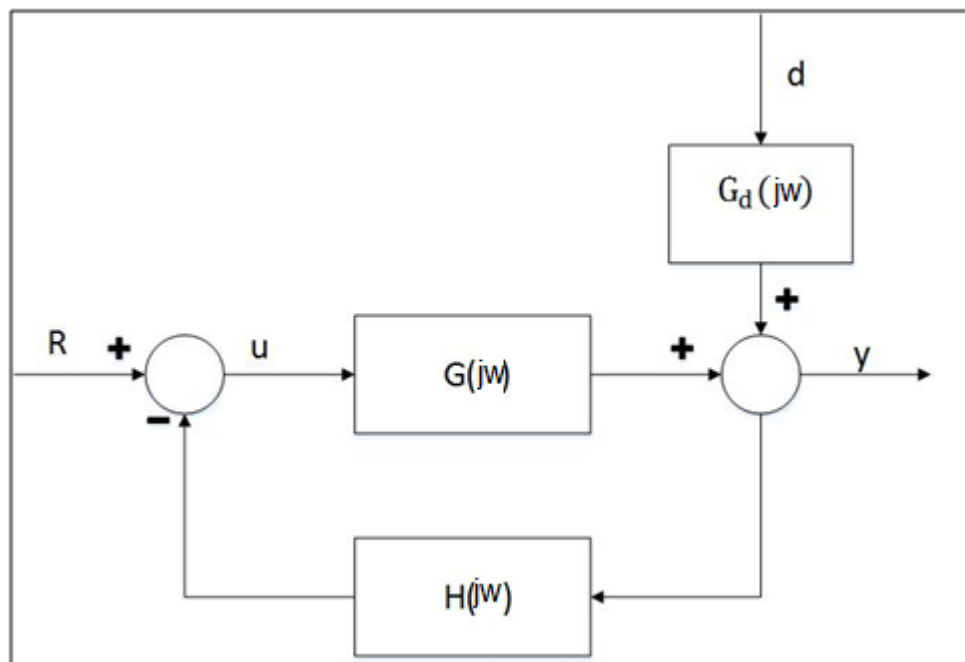
em que λ_i é o i -ésimo autovalor da matriz $\mathbf{G}^H \mathbf{G}$ ou $\mathbf{G} \mathbf{G}^H$, \mathbf{G}^H é a matriz conjugada e transposta de \mathbf{G} e $k = \min(m, r)$, sendo m e r o número de linhas e colunas da matriz \mathbf{G} , respectivamente. Os valores singulares são reais e não negativos. Definindo $\bar{\sigma}$ como o maior valor singular, $\underline{\sigma}$ como o menor e a relação $\gamma = \bar{\sigma} / \underline{\sigma}$ como o número

de condição, as seguintes propriedades de interesse são descritas (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 2005)

- $\bar{\sigma}$ na frequência de um MO descreve o grau de observabilidade do modo na resposta do sistema e $\underline{\sigma}$ corresponde ao grau de controlabilidade do modo. MO pouco amortecidos e fortemente observáveis apresentam grandes picos no gráfico de $\bar{\sigma}$, picos esses que estão associados a robustez do sistema. Sistemas robustos apresentam pequenos picos de $\bar{\sigma}$;
- Um achatamento no gráfico de $\underline{\sigma}$, conforme a Figura 6.5, aponta a presença de um zero influente na referida frequência;
- Número de condição elevado ($\gamma > 10$) aponta dificuldade de controle, principalmente se $\underline{\sigma} \ll 1$, já que $\underline{\sigma} \gg 1$ aponta que o MOE é fortemente controlável;
- A norma I_2 de \mathbf{G} é $\bar{\sigma}(\mathbf{G})$. Também $\|\mathbf{G}^{-1}\| = \frac{1}{\underline{\sigma}(\mathbf{G})}$.

A Figura 4.1 mostra o sistema de potência, $G(j\omega)$, com controladores na realimentação $H(j\omega)$, entrada de referência R e distúrbios d .

Figura 4.1 - Representação do sistema de potência com controladores.



Fonte: Adaptado de Castro (2006)

Através da Figura 4.1 obtem-se a relação da Equação 4.3.

$$y = \frac{G \cdot R}{(I + GH)} + \frac{G_d \cdot d}{(I + GH)} \quad (4.3)$$

Em que a Equação 4.3 representa a matriz de sensibilidade e $T = SG$ é a matriz de funções de transferência de malha fechada do sistema. Essas matrizes são usadas para análise do desempenho do sistema controlado.

Considerando uma variação do vetor de referência R , e assumindo $d = 0$. A Equação 4.3 resulta em:

$$\frac{\|y\|}{\|R\|} = \bar{\sigma}(T) \leq \frac{\bar{\sigma}(G)}{\underline{\sigma}(I + GH)} \quad (4.4)$$

Sabendo que:

$$\underline{\sigma}(I + GH) \geq \underline{\sigma}(GH) - 1 \quad (4.5)$$

E que:

$$\underline{\sigma}(GH) \geq \underline{\sigma}(G)\underline{\sigma}(H) \quad (4.6)$$

A Equação 4.4 resulta em:

$$\frac{\|y\|}{\|R\|} = \bar{\sigma}(T) \leq \frac{\bar{\sigma}(G)}{\underline{\sigma}(G)\underline{\sigma}(H) - 1} \quad (4.7)$$

Do mesmo modo, considerando somente o efeito do distúrbio na saída, verifica-se que:

$$\frac{\|y\|}{\|d\|} \leq \frac{\bar{\sigma}(G_d)\bar{\sigma}(H)}{\underline{\sigma}(G)\underline{\sigma}(H) - 1} \quad (4.8)$$

Pode-se concluir que $\underline{\sigma}(G)$, que depende da seleção das entradas e saídas, deve ser grande para reduzir os picos de $\overline{\sigma}(T)$, que geralmente são grandes nas frequências do MOE, facilitando a ação do controlador. Para o caso de $\underline{\sigma}(G) \ll 1$ na faixa de frequência dos MO, será quase impossível o controle robusto do sistema através do controle descentralizado. Isso explica porque $\underline{\sigma}(G)$ é considerado como o grau de controlabilidade do sistema.

4.2 Interações no domínio da frequência

A matriz de ganhos relativos (MGR) é uma importante ferramenta de análise de interações em sistemas multivariáveis e será utilizada para uma seleção prévia das entradas e saídas mais significativas para o controle descentralizado. Ela é definida, para $G(m \times m)$, ou seja, $r = m$, por:

$$\Lambda(G(j\omega)) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{r1} & \cdots & \lambda_{rm} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

em que $\lambda_{ij} = g_{ij}b_{ij}$, $g_{ij} = \left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{u_k=0, k \neq j}$ é o elemento ij de G e $b_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j}\right)_{y_k=0, k \neq i}$ é o elemento ji da matriz inversa generalizada de G (G^+), definida por $G^+ = (G^H G)^{-1} G^H$.

Para $r \neq m$, $B = G^+$. Neste caso, considera-se:

$B = (G^H G)^{-1} G^H$ para $m \leq r$ e $\text{Posto}(G) = m$.

$B = G^H (G G^H)^{-1}$ para $r \leq m$ e $\text{Posto}(G) = r$.

Isso mostra que λ_{ij} é a relação entre (a saída i com a entrada j , considerando todas as outras entradas constantes) / (a entrada j com a saída i , considerando todas as outras saídas constantes).

Bristol (1966) define λ_{ij} como uma medida de interação entre a entrada j e a saída i , onde usou MGR apenas em estado estacionário, $\omega = 0$. Todavia, sabe-se que em muitos casos a MGR em frequências próximas do cruzamento de ganho, ($\bar{\sigma} = 1$), é também muito importante. A MGR pode ser também importante na análise de MO (Skogestad e Postlethwaite, 2005).

A MGR tem muitas propriedades, entre elas, citam-se:

- A soma dos elementos de uma linha ou de uma coluna de Λ é igual à unidade, no caso de $r = m$. Se $r \neq m$, resulta $\sum_{i=1}^r \lambda_{ij} = 1$, se $\text{Posto}(G) = m$ e $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} = 1$, se $\text{Posto}(G) = r$.
- A MGR é independente da escala (valores de base) das entradas e saídas, se $r = m$. Se $r \neq m$, então, Λ é independente das escalas das saídas se $\text{Posto}(G) = r$ e é independente das escalas das entradas se $\text{Posto}(G) = m$.
- Qualquer permutação de linhas e colunas de G resulta na mesma permutação em Λ .
- A norma $\|\Lambda\|_{\text{soma}}$ tem um valor aproximado do número de condição mínimo γ^* . Isso significa que sistemas onde Λ resulta com elementos de grandes valores absolutos são sempre mal condicionados e de difícil controle.
- Se qualquer elemento de Λ muda de sinal entre $\omega = 0$ e $\omega = \infty$, então existe algum zero no semiplano complexo à direita do eixo imaginário.

Como uma eficiente ferramenta de verificação de interações entre entradas e saídas, a matriz Λ pode ser utilizada na seleção de entradas para aplicação de controladores e de sinais de saída para serem realimentados através desses controladores. Pela definição do elemento λ_{ij} e pelas propriedades da MGR, algumas regras utilizadas na seleção de entradas e saídas para o controle descentralizado do sistema podem ser enumeradas:

- Para evitar instabilidade por interações em baixa frequência, não se deve utilizar o par saída-entrada correspondente a λ_{ij} negativo no estado estacionário ($\omega = 0$).
- Preferir pares correspondentes a um MGR pequeno na região da frequência de cruzamento. Pares correspondentes a MGR grandes devem ser evitados.
- Zeros multivariáveis no semiplano complexo à direita do eixo imaginário podem ser um fator limitante para aplicação de controladores. Eles têm um grande efeito nos picos de resposta, ultrapassagens, largura de faixa, sensibilidade e robustez do sistema (Middleton, 1991; Castro e Araújo, 1998). Na realidade uma má distribuição de zeros na proximidade do eixo imaginário pode causar uma grande dificuldade em controlar os MO. Sendo assim, deve-se evitar pares de entradas e saídas que resultem em zeros no semiplano complexo à direita e sobretudo próximos do eixo imaginário.

Milanovic e Duque (2001) utilizaram as propriedades da MGR para selecionar os pares entrada-saída mais efetivos no sistema. Apesar disso, a aplicação isolada da MGR nessa seleção possui certas limitações, como a impossibilidade de selecionar a saída mais eficaz entre sinais de uma mesma unidade de geração, tendo como exemplo, a velocidade e potência elétrica em um gerador, ou sinais quaisquer que possuam alguma relação entre si.

Em Castro e Araújo (2002) foi proposta uma técnica que combina MGR e valores singulares na seleção dos pares entrada-saída mais efetivos para aplicação de controladores descentralizados. Essa técnica se mostra muito eficiente e confiável para seleção de sinais.

4.3 Descentralização

Para que um controle descentralizado em SEP seja possível e prático, primeiramente é necessário que cada par entrada-saída para controle seja da mesma unidade e não tenham modos instáveis, além de não controláveis; não possuam zeros

à direita do plano complexo até a frequência de corte e nem próximos da origem e, por último, que não haja interação com qualquer outro controlador de outra unidade (Castro, 2006).

Um conjunto de entradas e saídas é completamente descentralizado se $\Lambda(\mathbf{G}) = \mathbf{I}$. Entretanto, essa igualdade só ocorre se a matriz \mathbf{G} for triangular, que não é o caso de sistemas de potência. Todavia, pode-se aceitar como descentralizado o conjunto que resultar $\Lambda(\mathbf{G}(j\omega)) \cong \mathbf{I}$ para $\omega = \omega_c$ (Skogestad e Postlethwaite, 2005). Define-se a “frequência de corte”, ω_c , como a frequência em que $\bar{\sigma} = 1$, quando $\bar{\sigma}$ está decrescendo.

A proximidade da matriz $\Lambda(\mathbf{G}(j\omega))$ com a matriz identidade mostra a independência dos pares entradas-saídas, significando que quanto mais próximo, menos interações ocorrerão entre os controladores.

4.4 Seleção de entradas e saídas

A seleção dos pares entradas-saídas mais significativos para aplicação de controladores descentralizados é realizada de acordo com o método apresentado por Castro e Araújo (2002).

Inicialmente utiliza-se, a MFTfr completa. Considerando $\mathbf{G}(r \times m)$, $r \geq m$, $\text{Posto}(\mathbf{G}) = m$. e todas as entradas e sinais de saída são usadas para determinação da MGR na frequência $\omega = 0$. Assim, determina-se a matriz $\Lambda(0)$ (estado estacionário), considerando todas as entradas e saídas de todas as unidades. Então, desconsidera-se para seleção todos os pares para os quais $\lambda_{ij} < 0$ e para cada unidade desconsidera-se a(s) saída(s) com $e \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \ll 1$. Posteriormente analisa-se as saídas com valores maiores de $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij}$ e os pares com valores grandes de $\lambda_{ij} > 0$. Com essa matriz eliminam-se os sinais e entradas pouco efetivos ou que provoquem interações indesejáveis.

A seguir, considerando que p controladores são suficientes para amortecer os modos de oscilação com controle robusto do sistema, formam-se todos os conjuntos com p entradas e p saídas. Então esses conjuntos são testados para verificação da

descentralização na frequência $\omega = \omega_c$. Conjuntos com fortes interações entre unidades (fraca descentralização) são descartados.

Por último, os conjuntos restantes são comparados através dos valores singulares, para eleger o conjunto com boa descentralização e com a maior controlabilidade (σ maior) na faixa dos modos de oscilação. Esse conjunto é então, escolhido para aplicação de controladores descentralizados.

**PROJETO DE CONTROLADORES ROBUSTOS
DESCENTRALIZADO**

5 PROJETO DE CONTROLADORES ROBUSTOS DESCENTRALIZADOS

A utilização de controladores robustos para estabilizadores do sistema de potência se deu na década de 1990 (Folly et al., 1998). Resultando em controladores centralizados e de ordens elevadas.

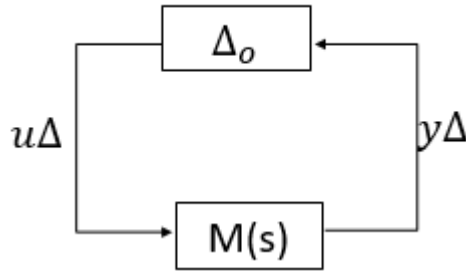
Os controladores são projetados levando em consideração os erros de modelagem, também chamados de incertezas. Este Capítulo apresenta o projeto do controlador robusto descentralizado, o qual será aplicado no modelo do sistema carga frequência com três áreas.

5.1 Projeto de controladores considerando as incertezas do sistema

O termo incertezas refere-se às diferenças ou erros entre os modelos e a realidade e qualquer mecanismo usado para expressar esses erros é chamado de representação de incertezas. As incertezas podem ter várias origens:

- Possibilidade de haver parâmetros do modelo linear que são conhecidos apenas aproximadamente ou com erro;
- Variação dos parâmetros devido à não-linearidade ou mudança do ponto de operação;
- Imperfeições nos sensores;
- Em altas frequências, a estrutura e a ordem do modelo são desconhecidos;
- Mesmo quando um modelo bastante detalhado está disponível, pode-se optar em utilizar um modelo mais simples, porém tratável computacionalmente. As dinâmicas negligenciadas então são representadas como incertezas.

Introduzindo as incertezas no diagrama de blocos do sistema $G(j\omega)$ com controladores $H(j\omega)$, visto no capítulo anterior (Figura 5.1) e arranjando-os para separar o blocos da incertezas, nesse caso representado por Δ_0 , resultando no diagrama mostrado na Figura 5.1, em que $M(s) = -W_0(s)T(s)H(s)$. Sabendo que T é o produto da matriz de sensibilidade pelo sistema.

Figura 5.1 - Configuração M- Δ do sistema.


Fonte: Skogestad e Postlethwaite, 2005.

Assumindo que a matriz $M(s)$ e as perturbações representadas por Δ sejam estáveis, então o sistema $M - \Delta$ é estável para todas as incertezas com $\overline{\sigma}(\Delta) \leq 1 \forall \omega$ se e somente se (Skogestad e Postlethwaite, 2005):

$$\mu(M(j\omega)) < 1, \forall \omega \quad (5.1)$$

em que $\mu(M)$ é o valor singular estruturado de M .

Sabendo que $\mu(M) \leq \overline{\sigma}(M)$, e que a igualdade ocorre para o caso da matriz de incertezas, Δ , ser cheia que verifica-se devido aos erros de modelagem e exclusão da dinâmica dos geradores e das redes de transmissão. Então, a condição necessária e suficiente para estabilidade robusta do sistema, com $\overline{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, é (Skogestad e Postlethwaite, 2005):

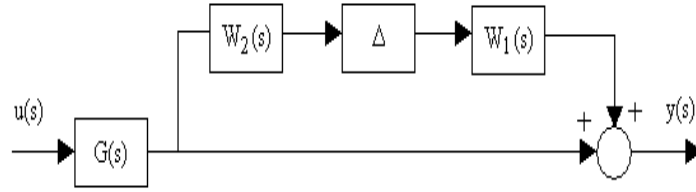
$$\overline{\sigma}(M(j\omega)) \leq 1, \forall \omega \quad (5.2)$$

Empregando as incertezas multiplicativas refletidas na saída, como pode ser visto na Figura 5.2 (Cruz, 1996) em que:

$$\Delta_0 W_0(s) = (G' - G)G^{-1} \quad (5.3)$$

é a matriz de incertezas relativas e G' é a matriz de transferência do sistema real. A matriz diagonal $W_0(s)$ representa os limites superiores das incertezas nos canais de controle que correspondem a W_2 e W_1 .

Figura 5.2 - Diagrama de blocos do sistema de potência real.



Fonte: Silva Filha, 2012

O objetivo é projetar controladores para estabilizar não somente a planta nominal, $G(s)$, mas o conjunto de todas as plantas definido por:

$$G'(s) = (I + \Delta_0 W_0)G(s) \quad (5.4)$$

Tendo conhecimento que $S' = (I + G'H)^{-1}$ é a matriz de sensibilidade do sistema real. Então,

$$S' = [I + (I + \Delta_0 W_0)GH]^{-1}[I + GH]S \quad (5.5)$$

Considerando que no intervalo de frequência de maior interesse ocorre $\underline{\sigma}(GH) \gg 1$, resultando em:

$$\overline{\sigma}(S') \leq \frac{\gamma(G)\gamma(H)}{\underline{\sigma}(I + \Delta_0 W_0)} \overline{\sigma}(S) \quad (5.6)$$

Considerando a Equação 5.6 pode-se concluir que o controle descentralizado não influenciará na deterioração da sensibilidade do sistema se $\gamma(H) = 1$, isto é, para o caso de empregar controladores idênticos nos diversos canais do sistema. Obtém-se resultado semelhante para incertezas na entrada, representando uma maior robustez do sistema para falhas nos controladores, quando estes são idênticos.

A matriz $W_0(s)$, geralmente, é representada por $\omega_0(s)I$, em que ω_0 é um peso, considerando apenas um limite superior para o pior caso, associado a todos os canais de controle (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 2005). Esse peso é descrito na Equação 5.7:

$$\omega_0(s) = \frac{\zeta s + \zeta_0}{\left(\frac{\zeta}{\zeta_\infty}\right)s + 1} \quad (5.7)$$

em que ζ_0 é a incerteza relativa no estado estacionário, $1/\zeta$ é aproximadamente a frequência onde a incerteza relativa atinge 100% e ζ_∞ é a grandeza do peso em altas frequências.

Considerando que o controlador é de estrutura conhecida, ou melhor, descentralizado e de ordem reduzida. Então, $H(s)$ será da seguinte forma:

$$H(s) = \begin{pmatrix} h_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & h_p(s) \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Existem na literatura diversas estruturas para representar cada $h_i(s)$, nesse trabalho será considerado a seguinte:

$$h_i(s) = K_0 \frac{(1 + T_1 s)}{(1 + T_2 s)} \quad (5.9)$$

$$0,1 < \frac{T_{2j-1}}{T_{2j}} < 10 \quad (5.10)$$

Onde a Equação 5.10 é uma restrição prática.

Para atingir a robustez deve-se ajustar os parâmetros dos controladores $h_i(s)$ para a solução do problema de otimização representado na Equação 5.11:

$$\min \left[\sup \left(\bar{\sigma}(M(j\omega)) \right) \right] \quad (5.11)$$

sujeito a $\gamma(H) = 1$.

É importante salientar que $\sup \left(\bar{\sigma}(M(j\omega)) \right)$ significa o valor superior ou pico máximo de $\bar{\sigma}(M(j\omega))$.

Sabendo que $H(s)$ não faz parte de M , não é necessário tomar medidas em relação a restrição de γ , pois ela já é atendida pela constituição do problema que considera

todos os controladores iguais. Contudo, deve-se prestar atenção às limitações impostas às grandezas dos parâmetros do controlador. Nesse trabalho, os parâmetros são sempre positivos e a relação deles, nos estágios avanço-atraso, deverão satisfazer os parâmetros da Equação 5.10.

Desprezando o sinal negativo de M por não afetar o resultado. A Equação 5.2 será:

$$\bar{\sigma}(M) = \bar{\sigma}(\omega_0 TH) \leq \bar{\sigma}(\omega_0 H) \bar{\sigma}(T) < 1 \quad (5.12)$$

A partir da última igualdade da Equação 5.12 obtém-se:

$$\bar{\sigma}(T) < \frac{1}{\bar{\sigma}(\omega_0 H)}, \forall \omega \quad (5.13)$$

Reescrevendo a Equação 5.13, temos:

$$\bar{\sigma}(T) < \bar{\sigma}\left(\frac{H^{-1}}{\omega_0}\right), \forall \omega \quad (5.14)$$

Desse modo, o propósito é otimizar a função objetivo (M), encontrando as grandezas dos parâmetros do controlador, T_1 , T_2 e K , de tal forma que seja satisfeita a condição de robustez, descrita pela Equação 5.14. O valor singular máximo de M está diretamente relacionado aos modos de oscilação, ou seja, ao minimiza-lo será minimizado também os picos relacionados aos MOE, resultando em uma maior estabilidade do sistema.

Sabendo que a função M não é uma função explícita dos parâmetros do controlador, necessita-se de métodos de otimização que não utilizem derivadas da função em seu algoritmo.

5.2 *Tabu search*

Tabu search é um procedimento heurístico de mais alto nível para resolver problemas de otimização, inventado por Fred Glover na década de 1980 a partir de

um conjunto de princípios (funções) que, de forma integrada, permitem resolver um problema de forma mais inteligente. Uma de suas características, é a capacidade de iniciar o procedimento com uma implementação simples que pode ser atualizada ao longo do tempo, incorporando elementos mais avançados ou especializados (Glover, 1990).

Tabu search pode ser utilizado para guiar qualquer processo que empregue um conjunto de movimentos para transformar uma solução (ou estado de soluções) em outra e que providencie uma função de avaliação para medir a atratividade desses movimentos. A forma de orientação desse método é altamente flexível e, com frequência motiva a criação de novos tipos de movimentos e critérios de avaliação para tirar vantagens de sua capacidade de adaptação para diferentes estruturas de problemas e metas estratégicas. Os dois elementos básicos da metaheurística TS são as definições de espaço de busca e estrutura da vizinhança.

O espaço de busca são todas as soluções possíveis do problema em estudo, que podem ser visitadas durante o processo de busca. Em grande parte das aplicações não é uma estratégia boa restringir o espaço de busca apenas às soluções factíveis. É interessante permitir o movimento da busca para soluções infactíveis, pois considerar todas as restrições do problema na definição do espaço de busca pode restringir muito o espaço de busca e levar a soluções de qualidades inferiores.

Relaxação das restrições é uma técnica atraente, visto que cria um vasto espaço de busca, principalmente quando esse espaço pode ser explorado com facilidade pela estrutura de vizinhança. A relaxação das restrições é de fácil implementação, ao não considerar algumas restrições no espaço de busca do problema e adicionar à função objetivo penalizações ponderadas para cada restrição violada.

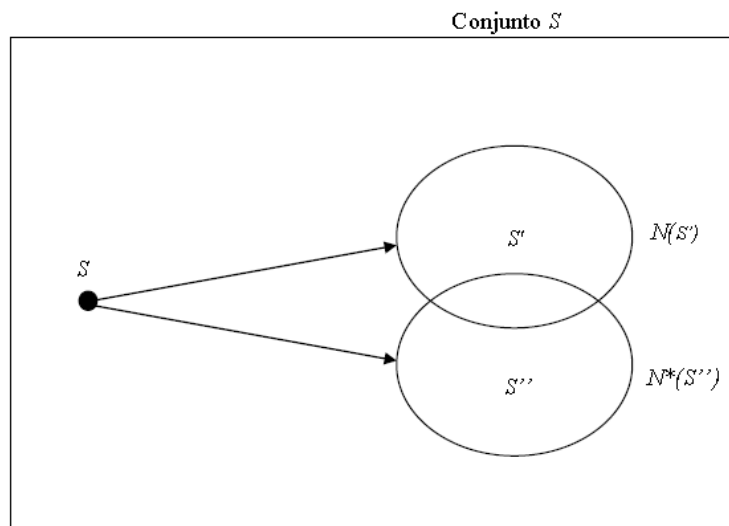
A estrutura de vizinhança está relacionada com o espaço de busca. A cada interação do método as transformações locais que podem ser aplicadas a solução corrente definida por S , definem o conjunto de soluções vizinhas ao espaço, representado por $N(S)$ (vizinhança de S). Isto é:

$$N(S) = \{\text{Soluções obtidas pela aplicação de uma transformação local a } S\} \quad (5.15)$$

O processo de busca inicial do TS é igual aos demais métodos heurísticos. A partir de uma solução S , TS efetua transições pelos arredores de S , $N(S)$. No algoritmo de

busca local, ao encontrar o melhor valor da função objetivo (minimizar ou maximizar), o procedimento de busca pára, indicando que foi encontrado um ótimo local. Já *TS* é diferente pelo fato de, a partir da configuração corrente, ser possível mudar para a melhor ou menos pior configuração vizinha, indicando que é permitido uma degradação da qualidade da função objetivo. Além de a característica do conjunto de vizinhos de S não se comportar de maneira estática, definindo então, para esse caso, uma nova estrutura de vizinhança $N^*(S)$ que varia dinamicamente em estrutura e dimensão durante todo o processo, permitindo uma busca eficiente como pode ser visto na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Transição no *Tabu search*.



Fonte: Silva, 2005

5.2.1 Memória de curto prazo

Uma ferramenta do TS, que é a mais elementar, é a memória de curto prazo, que constitui uma forma de exploração agressiva que busca tornar possível o melhor movimento, sujeito a exigir escolhas disponíveis para satisfazer as restrições. Restrições essas que são incorporadas nas restrições tabu para evitar a reversão ou a repetição de certos movimentos ao tornar os atributos selecionados como proibidos,

podendo se mostrar um problema já que algumas configurações de excelente qualidade podem estar temporariamente proibidas.

O objetivo principal dessa restrição é permitir que o método vá além de pontos ótimos locais, fazendo movimentos de alta qualidade em cada etapa. Em geral, busca-se prevenir o comportamento de ciclagem e, de um modo mais amplo, induzir a busca a seguir uma nova trajetória caso ocorra a ciclagem num sentido mais restrito.

A memória de curto prazo usa basicamente a informação de atributos de configurações que foram modificados recentemente, um critério de aspiração e um critério de parada. Na Figura 5.4 é mostrado um diagrama básico mostrando todas as etapas dessa ferramenta.

para evitar que a busca refaça os mesmos caminhos de onde ela foi iniciada, que é a declaração como tabu dos movimentos que possam anular os efeitos de movimentos recentes do processo como sendo tabus. Esses movimentos também são úteis para assessorar o processo de busca para partes não visitadas e permitir uma exploração mais abrangente deste espaço.

Esses atributos são guardados na memória de curto prazo. Essa memória armazena as informações do passado recente do processo de busca, ou seja, deve-se armazenar as informações das últimas k transições. A forma mais elementar de guardar essas informações seria armazenar as informações completas das configurações visitadas. Mas, para isso, seria necessário um grande espaço de memória além de um esforço computacional elevado para analisar todas as informações armazenadas.

Diante do exposto, a proposta mais viável consiste em armazenar os atributos das configurações visitadas no passado para evitar voltar a visita-las. Dessa forma, é necessário um pequeno espaço de memória para armazenamento, além da facilidade em manipular e verificar essas informações. Os atributos tabus mais comumente utilizados envolvem armazenar as últimas poucas transformações executadas na solução corrente e proibindo transformações reversas; outras são baseadas nas características chaves das próprias soluções ou movimentos.

A utilização simultânea de múltiplas listas tabu em alguns casos é recomendável. Listas tabu padrões são correntemente implementadas como listas do tipo *first in first out* (FIFO) de comprimento fixo.

5.2.1.2 Critério de aspiração

As proibições são fundamentais para o algoritmo de TS, mas para alguns casos são muito poderosas. Apresentam a vantagem de que um atributo proibido evita retornar a uma configuração já visitada, mas também impede que seja percorrido um conjunto de configurações que compartilham atributos proibidos com configurações já visitadas. Este fato é uma limitação, visto que algumas configurações de excelente qualidade (inclusive a ótima global) podem estar temporariamente proibidas, uma vez que compartilham atributos proibidos com configurações já visitadas. Por outro lado, as proibições também podem provocar uma estagnação geral no processo de busca.

Estes problemas são contornados de duas maneiras, eliminando a proibição após k transições, mas criando um novo problema, tornando possível o fenômeno de ciclagem, visitando novamente configurações já visitadas; E usando uma nova função ou estratégia TS chamada de critério de aspiração. Esta estratégia simplesmente estipula que se uma configuração vizinha é encontrada acionando um atributo proibido, mas essa configuração vizinha é de excelente qualidade então, deve-se eliminar a proibição. É de competência do pesquisador, com base nas propriedades físicas do problema sob análise, especificar o que significa configuração de excelente qualidade. Como exemplo, pode ser considerada uma configuração vizinha de excelente qualidade quando: apresenta uma função objetivo melhor que a incumbente do processo TS; apresenta uma função objetivo melhor que as encontradas no processo TS com memória de curto prazo; apresenta uma função objetivo de melhor qualidade dentre as últimas k_1 transições; ou a função objetivo foi reduzida em um valor previamente especificado. Cada estratégia escolhida leva, obviamente, a processos de busca diferentes.

5.2.1.3 Critério de parada

Sob o aspecto teórico o algoritmo de *Tabu search* poderia prosseguir no processo de busca indefinidamente, uma vez que a solução ótima do problema sob análise não é conhecida, em alguns casos, previamente. Na prática, obviamente, o procedimento de busca deve ser interrompido de forma correta, dependendo do problema sob análise.

Os padrões de parada geralmente utilizados em implementações de TS são:

- Após um número fixo de iterações e/ou tempo de processamento (tempo de CPU);
- Após um número preestabelecido de iterações que a solução incumbente não apresenta melhorias – este critério é utilizado na maioria das implementações de TS;
- Depois que a função objetivo alcançar um valor preestabelecido.

Em esquemas complexos de implementação de TS, a busca é normalmente interrompida depois de completar uma seqüência de fases, e a duração de cada fase é determinada por algum desses critérios.

Por fim este é o método de otimização que será utilizado para encontrar os parâmetros do controlador que serão aplicados nas três áreas, com o intuito de amortecer as oscilações

APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM SISTEMA DE 3 ÁREAS

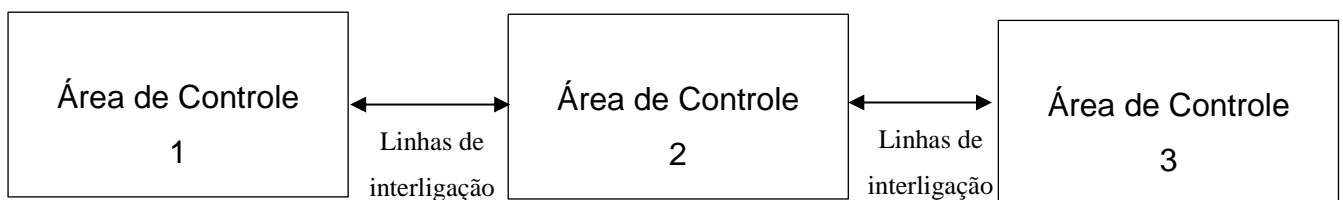
6 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM SISTEMA DE 3 ÁREAS

Neste capítulo serão apresentados os resultados do sistema após a seleção prévia das entradas e saídas mais significativas, o programa elaborado pela autora utilizando o método de otimização *Tabu search*, os parâmetros do controlador e por fim, os resultados da aplicação do controlador.

6.1 Método *Tabu Search*

O sistema de potência de controle de carga-frequência de três áreas equivalentes interligadas, as quais funcionam como três grandes unidades geradoras, mostrado no capítulo 2, é utilizado para ilustração (Figura 6.1). Antes de aplicar o controlador ao sistema de potência, deve-se selecionar os pares de entrada e saída mais efetivos utilizando os métodos de análise de sinais descritos no capítulo 4.

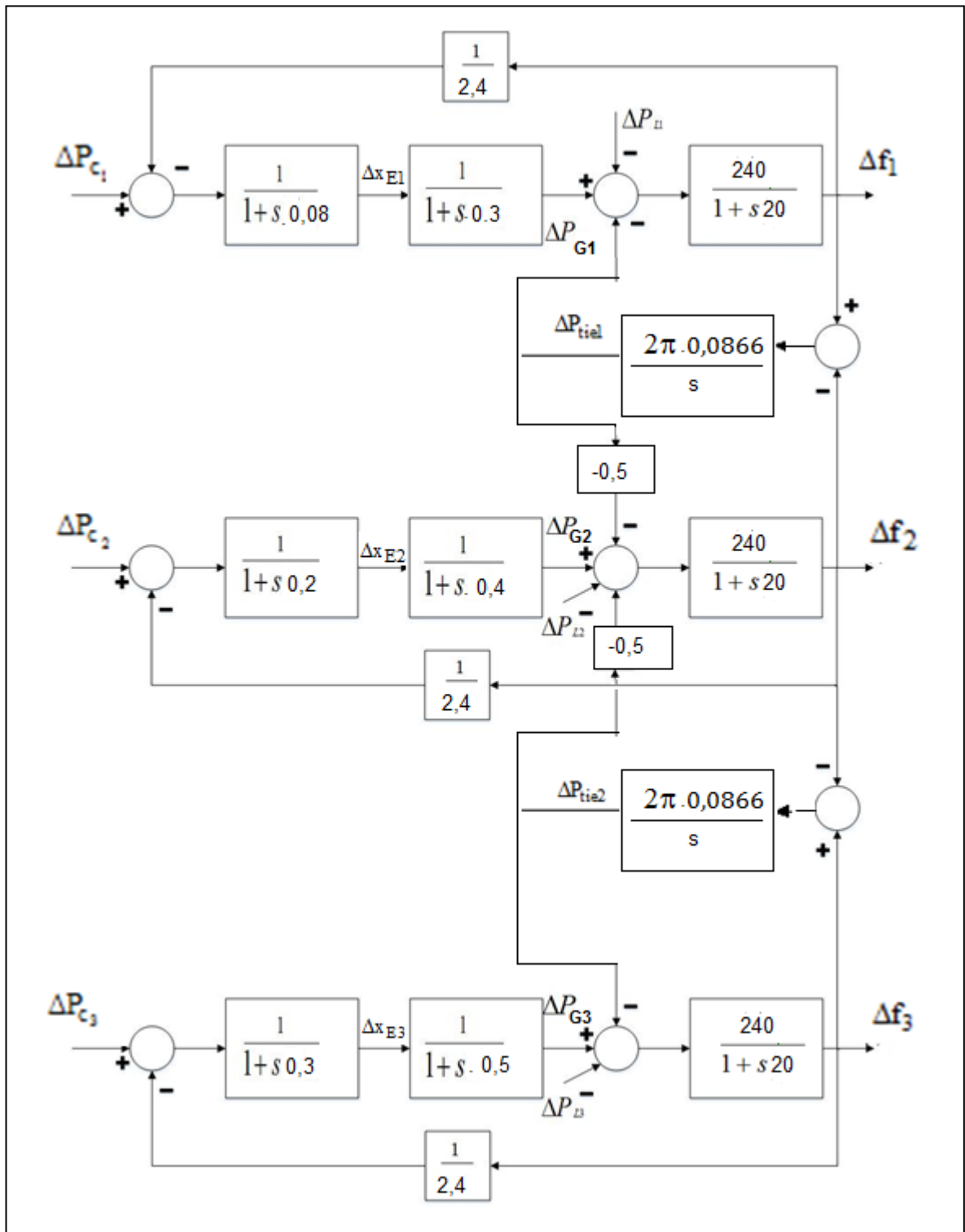
Figura 6.1 - Sistema de 3 áreas interligadas.



Fonte: Elaborado pela autora

Segundo o exemplo utilizado em trabalhos como Calvert e Titli (1989), Castro (2006) e Silva Filha (2012), os parâmetros do sistema representado na Figura 6.2 são:

Figura 6.2 - Representação das 3 áreas interligadas com seus devidos parâmetros



Fonte: Elaborado pela autora

- $T_{p1} = T_{p2} = T_{p3} = 20 \text{ s};$
- $K_{p1} = K_{p2} = K_{p3} = 240 \text{ Hz/pu MW};$
- $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 2,4 \text{ Hz/pu MW};$
- $T_{12}^0 = T_{32}^0 = 0,0866 \text{ pu. MW};$
- $a_{12} = a_{32} = -0,5;$
- $T_{R1} = 0,08 \text{ s};$
- $T_{T1} = 0,3 \text{ s};$
- $T_{R2} = 0,2 \text{ s};$
- $T_{T2} = 0,4 \text{ s};$
- $T_{R3} = 0,3 \text{ s};$
- $T_{T3} = 0,5 \text{ s}.$

A representação do modelo do sistema é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_t x + B_t u \\ y = C_t x \end{cases} \quad (6.1)$$

Onde o desenvolvimento das matrizes do sistema, podem ser vistos no Apendice A. Em que:

$$\text{variáveis de estado} = x^T \quad (6.2)$$

$$= |\Delta f_1 \Delta x_{E1} \Delta P_{G1} \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta x_{E3} \Delta P_{G3} \Delta P_{tie2} \Delta f_2 \Delta x_{E2} \Delta P_{G2}|$$

$$\text{entradas} = u^T = |\Delta P_{C1} \Delta P_{C3} \Delta P_{C2}| \quad (6.3)$$

$$\text{saidas} = y^T = |\Delta f_1 \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta P_{tie2} \Delta f_2| \quad (6.4)$$

Os parâmetros, f_i , x_{Ei} , P_{Gi} , P_{tiei} e P_{Ci} mostrados nas Equações 6.2, 6.3 e 6.4 são, respectivamente, a frequência, o sinal de saída do regulador, a potência da turbina, a potência de intercâmbio do turbogerador equivalente a área i e por último, a entrada do controle do regulador de velocidade da área i , em valores incrementais (Castro e Araújo, 2002).

Segundo Castro e Araújo (2002), este sistema tem três modos do tipo inter-área, o que implica na utilização de controladores nas três áreas para amortecer esses modos. Os autovalores associados a esses modos são: $\lambda_1 = -0,1759 \pm j3,0010 \text{ s}^{-1}$; $\lambda_2 = -0,1199 \pm j4,0102 \text{ s}^{-1}$; e $\lambda_3 = -0,1893 \pm j4,6410 \text{ s}^{-1}$.

Considerando apenas entradas e saídas que podem ser usadas para controle, acompanhada da soma de cada uma das linhas, resultou-se:

$$\begin{array}{c}
 \text{Entradas} \\
 \rightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{ccc}
 \Delta P_{C1} & \Delta P_{C3} & \Delta P_{C2}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \\
 \downarrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Saídas} \\
 \downarrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \Delta P_{tie1} \\
 \Delta P_{tie2}
 \end{array}
 \quad (6.5)$$

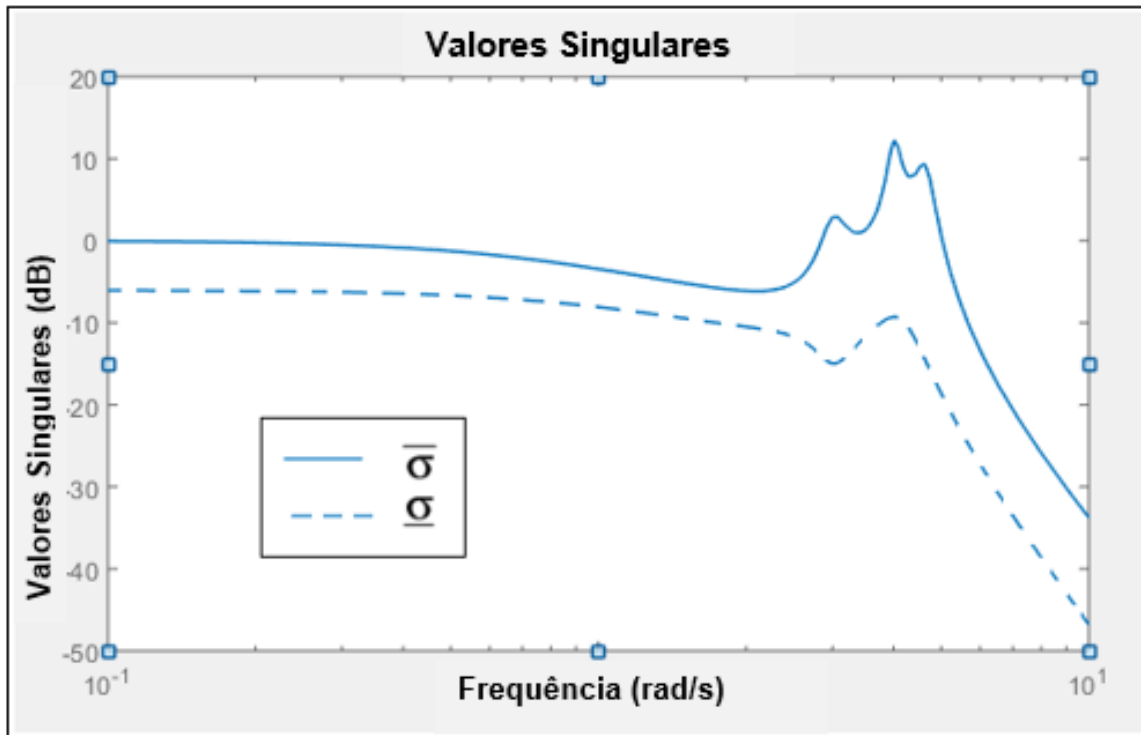
$$\Lambda(0) = \begin{bmatrix}
 0,0833 & 0,0833 & 0,1667 \\
 0,7500 & -0 & 0,2500 \\
 0,0834 & 0,0833 & 0,1667 \\
 -0 & 0,7500 & 0,2500 \\
 0,0833 & 0,0833 & 0,1667
 \end{bmatrix}
 \begin{array}{c}
 0,3333 \\
 1 \\
 0,3333 \\
 1 \\
 0,3333
 \end{array}$$

A partir da análise de $\Lambda(0)$ é perceptível que todos os elementos da matriz são menores que um, indicando que provavelmente o sistema de controle não será difícil de ser alcançado. Constata-se também que $\Delta P_{tie1} - \Delta P_{C1}$ e $\Delta P_{tie2} - \Delta P_{C3}$ são os conjuntos entradas-saídas mais efetivos do sistema para aplicação de controladores. Além de ser possível verificar também que os pares entrada-saída completamente ineficazes a esse sistema são: $\Delta P_{tie1} - \Delta P_{C3}$ e $\Delta P_{tie2} - \Delta P_{C1}$. Essa consideração também é válida para $\omega \neq 0$.

Conforme visto no Capítulo 4, em alguns casos a MGR não é suficiente para avaliar o desempenho dos pares entrada-saída do sistema. Por isso, calcula-se os valores singulares da matriz de transferência. Para esse caso, os valores singulares de $G(0)$, são $\bar{\sigma} = 2,539$ e $\underline{\sigma} = 0,811$, resultando em $\gamma = \frac{2,539}{0,811} = 3,13$, confirmando a previsão que o controle do sistema será simples de ser realizado.

Calculando-se através da ferramenta computacional – MATLAB, utilizando a função sigma, os valores singulares para os pares entrada-saída selecionados anteriormente são mostrados na Figura 6.3.

Figura 6.3 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$ e $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C2})$.



Fonte: Adaptado de Castro e Araújo (2002)

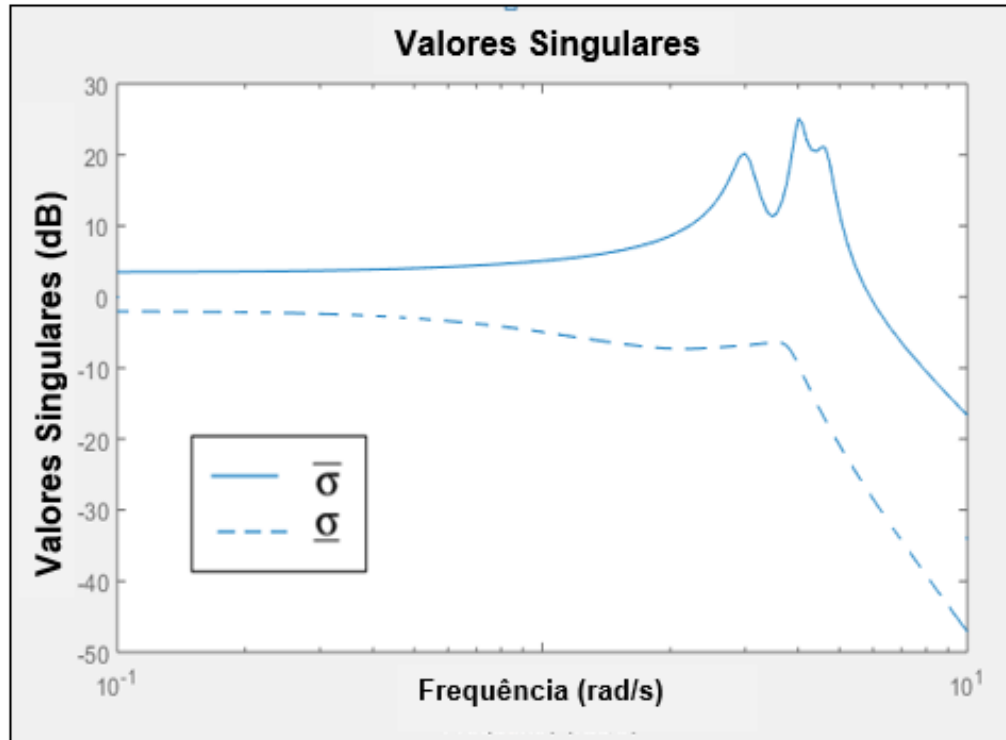
Na Figura 6.3 é observável que os três modos são influentes devido aos picos de $\bar{\sigma}$. Todavia, o MO 1 é praticamente não controlável nesse caso, por causa de um zero, $z = -0,2755 \pm j2,9905$ que, embora não esteja localizado no semiplano direito, está muito próximo dele além de estar com a mesma frequência desse modo, influenciando-o negativamente.

Por causa dessa restrição, foi preciso acrescentar um novo par entrada-saída para o controle do sistema, nesse caso foi o par $\Delta f_2 - \Delta P_{C2}$, como pode ser observado na Equação 6.6.

$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{\text{Entradas}} \quad \Delta P_{C1} \quad \Delta P_{C3} \quad \Delta P_{C2} \\
 \\
 \Lambda(0) = \begin{bmatrix} 0,0833 & -0,0833 & 0,1667 \\ 0,7500 & -0 & 0,2500 \\ 0,0834 & 0,0833 & \boxed{0,1667} \\ -0 & 0,7500 & 0,2500 \\ 0,0833 & 0,0833 & 0,1667 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{c} 3 \\ \sum_{j=1} \lambda_{ij} \\ 0,3333 \\ 1 \\ 0,3333 \\ 1 \\ 0,3333 \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{Saídas} \\ \downarrow \\ \Delta P_{tie1} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie2} \end{array}
 \end{array} \quad (6.6)$$

A Figura 6.4 mostra os valores singulares do sistema para os três pares entrada-saída selecionados na Equação 6.6.

Figura 6.4 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$, $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C3})$ e $(\Delta f_2, \Delta P_{C2})$.



Fonte: Adaptado de Castro e Araújo (2002)

Para esse caso, o valor singular $\underline{\sigma}$ é maior em toda a faixa de frequência de maior interesse, apontando para uma maior controlabilidade do sistema. Para melhorar a descentralização do controlador, foi considerado a representação do sistema com sinais compostos de saída, que são recursos utilizados na prática e podem ser vistos na Equação 6.7.

$$y_2^T = |P_{tie1} + Bf_1 \quad P_{tie2} + Bf_3 \quad -P_{tie2} + Bf_2| \quad (6.7)$$

O termo B da Equação 6.7 representa o fator de polarização, também chamado de fator “bias”, em MW/Hz. Geralmente tem-se B maior que zero e menor que um. A relação $P_{tiei} + Bf_i$, com variáveis incrementais, é denominada erro de controle de

área (ECA). O sinal de erro pode ser positivo (indicando que a área deve diminuir a geração), negativo (indicando que a área deve aumentar a geração) ou nulo que é o estado de equilíbrio desejado. Esses dois parâmetros são largamente empregados na literatura como operadores do controle da frequência e do intercambio em sistemas de potência. Tradicionalmente, procura-se tomar o fator de polarização igual a característica natural combinada da área, ou seja, $B_i = \frac{1}{\tau_i} + D_i$ (Elgerd, 1976; Castro et al., 1988; Mota, 2006). Dessa forma, considera-se o valor dominante $B_1 = B_2 = B = 0,417 \text{ MW/Hz}$.

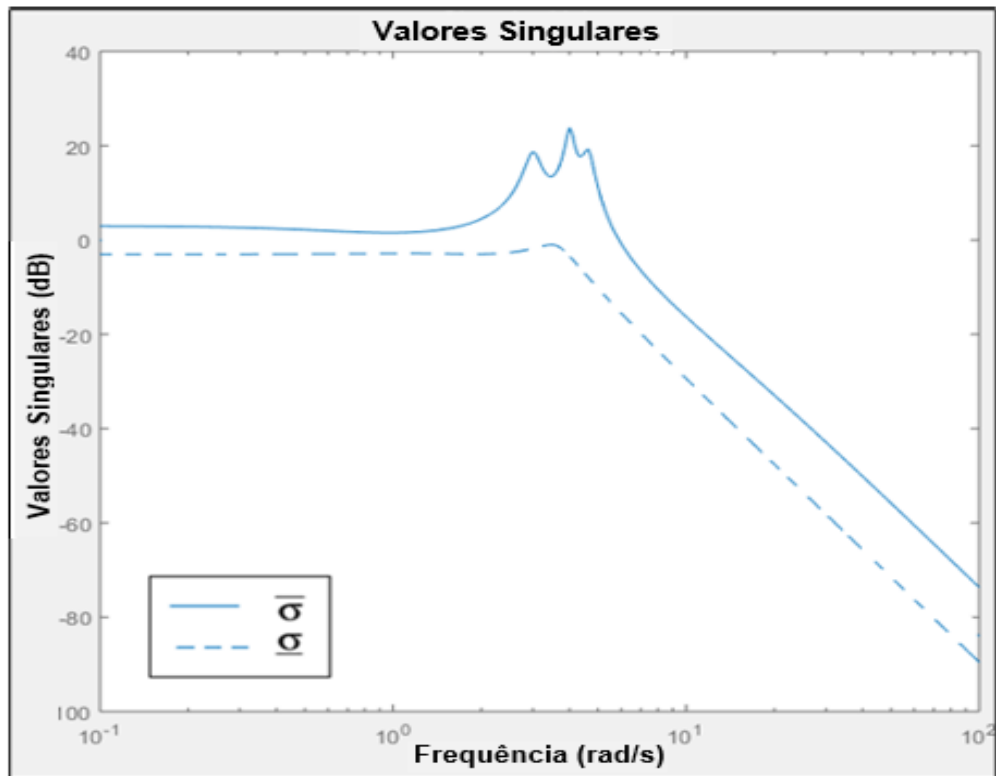
A MGR em $\omega_c = 6 \text{ rad/s}$ (frequência de corte, frequência em que $\bar{\sigma} = 1$, quando $\bar{\sigma}$ está decrescendo), foi obtida a partir do MATLAB conforme o apêndice C.

A Equação 6.8 mostra a MGR em $\omega_c = 6 \text{ rad/s}$:

RGAW	1.0637 - 0.0380i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0637 + 0.0380i
	-0.0048 - 0.0030i	0.9999 - 0.1118i	0.0049 + 0.1148i
	-0.0589 + 0.0410i	0.0001 + 0.1118i	1.0588 - 0.1527i

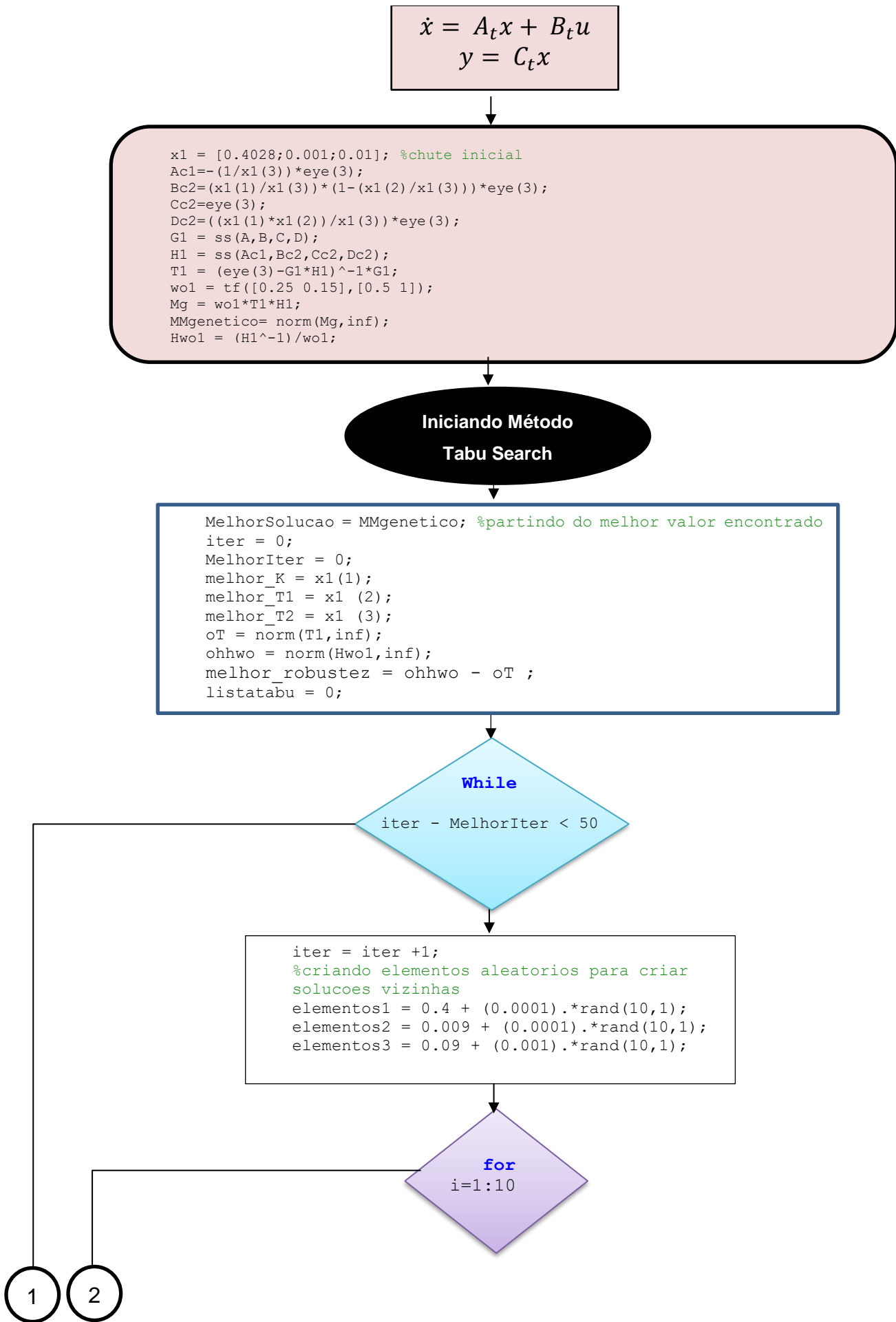
(6.8)

Verifica-se, então, que os sinais de y_2 com as entradas, u , resultam em pares com uma descentralização muito boa, pois $\Lambda(\mathbf{G}(j\omega)) \cong \mathbf{I}$. Os gráficos de $\bar{\sigma}$ e $\underline{\sigma}$ da descrição $\mathbf{y}_2 = \mathbf{G}_2(j\omega)\mathbf{u}$ são apresentados na Figura 6.5.

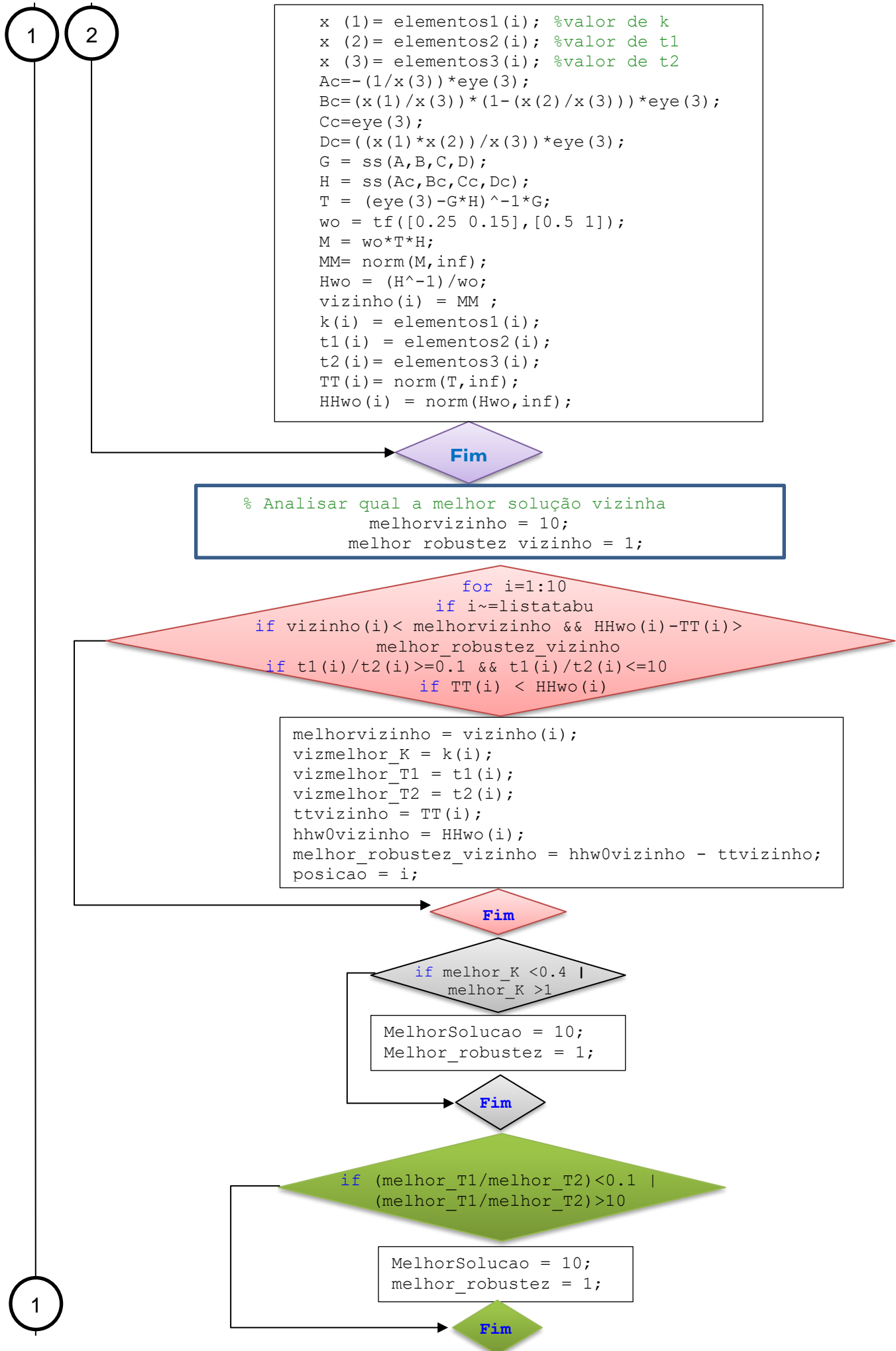
Figura 6.5 - Valores de $\bar{\sigma}$ e $\underline{\sigma}$ de $G_2(j\omega)$.


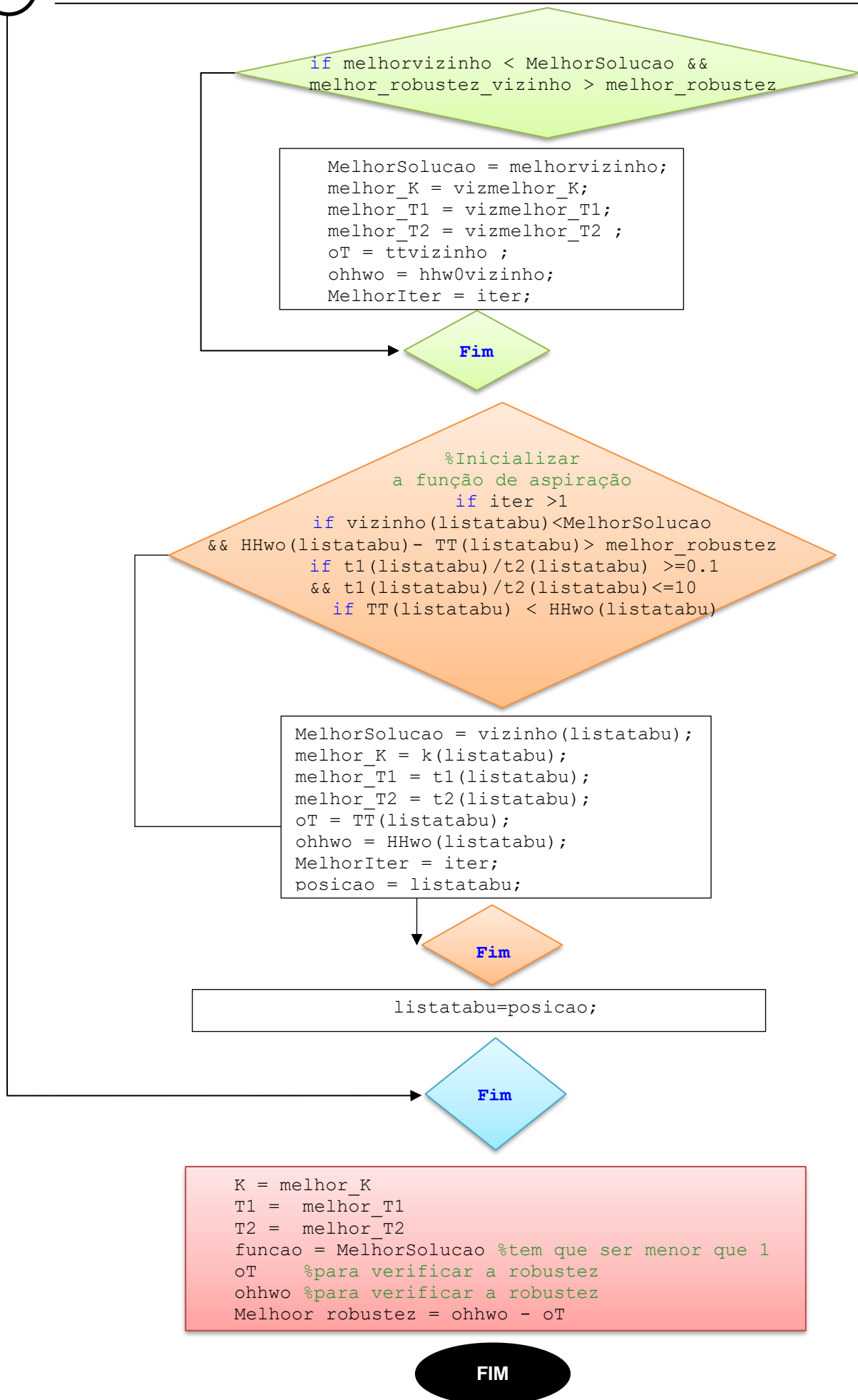
Fonte: Adaptado de Castro e Araújo (2002)

As três áreas são um tanto parecidas, justificando a utilização de controladores idênticos. Assim, sugere-se a aplicação de controladores idênticos do tipo $h_i(s) = K_0 \frac{(1+T_1s)}{(1+T_2s)}$ em cada área. Os parâmetros dos controladores são ajustados para minimizar a função M , diminuindo também, por consequência, o $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$. Neste problema foi utilizado uma função elaborada pela autora, a qual utiliza o método de otimização *Tabu search*. A função “*Tabu search*” elaborada pela autora, a qual utiliza o software matlab, funciona conforme a Figura 6.6.

Figura 6.6 - Função *Tabu Search*

APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM SISTEMA DE 3 ÁREAS





Inicialmente utiliza-se as matrizes A, B, C e D que representam o sistema mais descentralizado, considerando as entradas e saídas mais significativas do sistema, nas quais serão aplicadas os controladores. Para iniciar o Método *Tabu search* é necessário partir de um “chute inicial”, parâmetros iniciais para o controlador, que neste caso, para encontrar o melhor resultado, partiu do melhor valor que já havia sido encontrado na literatura, ou seja, pelo método de otimização Algoritmos Genéticos (Silva filha, 2012).

A partir deste valor inicial, é calculado $\bar{\sigma}(M(j\omega))$, utilizando a função do Matlab chamada “norm”, e então considera-se tanto os parâmetros do chute inicial, quanto a solução gerada a partir destes, como: Melhor_k, Melhor_T1, Melhor_T2, Melhor solução e Melhor Robustez.

O método *Tabu search* segue analisando soluções vizinhas, e armazena o menor valor de $\bar{\sigma}(M(j\omega))$ e uma maior robustez (maior valor de: $\bar{\sigma}\left(\frac{H^{-1}}{\omega_0}\right) - \bar{\sigma}(T)$), mesmo que esta solução seja pior do que a gerada pelo chute inicial. A posição em que se encontra a melhor solução vizinha também é armazenada, e será considerada como lista tabu.

Após encontrar a melhor solução vizinha verifica-se se a mesma apresenta uma melhora tanto na Melhor solução, quanto na Melhor Robustez. Se apresentar esta melhora, o programa armazena esta como a nova Melhor Solução e a partir desses novos parâmetros encontrados para o controlador, encontra-se e armazena-se a nova Melhor Robustez. Caso não haja uma melhora, permanece os valores que estavam armazenados.

Posteriormente, é verificado se a solução armazenada na lista tabu apresenta simultaneamente o menor valor de $\bar{\sigma}(M(j\omega))$ e uma maior robustez, caso apresente, entra o critério de aspiração, onde é aceito utilizar o valor armazenado na posição tabu, uma vez que o mesmo apresenta um melhor resultado.

Por fim, armazena-se novamente a nova posição tabu e então ocorre uma nova iteração. O programa encerra a partir do critério de parada adotado, que neste caso foi: while iter - Melhoriter < 50, isto significa que se forem realizadas 50 iterações sem uma melhora da função objetivo assim como da robustez, deve-se encerrar o programa e mostrar na tela o melhor resultado encontrado.

A Figura 6.7 apresenta 10 parâmetros diferentes (k , T_1 e T_2) encontrados pela função “*Tabu search*”, considerando chutes iniciais variados, e mostra a relação entre os parâmetros T_1 e T_2 do controlador, os quais possuem restrição prática, onde T_1/T_2 deve ser maior ou igual a 0,1 e menor ou igual a 10. Apresenta também o maior valor singular da função objetivo M a partir dos parâmetros encontrados e por fim verifica a robustez do sistema.

Figura 6.7 - Parâmetros do Controlador gerados pela função “Tabu Search”

Método Tabu Search: Valores encontrados a partir do programa desenvolvido											
Tentativas	Parâmetros do Controlador: chute inicial			Parâmetros do Controlador: Valores encontrados			Restrição Prática	Resultados			Maior Robustez = Maior Amortecimento
	k	T1	T2	k	T1	T2	T1/T2 >=0,1 T1/T2<=10	ϕ(M)	Garantindo a robustez ϕ(T) < ϕ(H^-1/wo)		robustez = ϕ(H^-1/wo)-ϕ(T)
									ϕ(T)	ϕ(H^-1/wo)	
Encontrados pelo metodo GA				0,4028	0,001	0,01	0,1	0,8165	4,7055	49,6524	44,9469
1	0,4028	0,001	0,01	0,4000	0,009	0,09	0,1	0,6561	3,8395	50	46,1605
2	9	21	5	0,4000	0,0091	0,0909	0,1001	0,6551	3,8381	49,9451	46,107
3	0,3	0,4	0,5	0,4001	0,0091	0,091	0,1000	0,6551	3,8373	49,9326	46,0953
4	0,2	10	0,5	0,4000	0,0091	0,0909	0,1001	0,6551	3,8381	49,9451	46,107
5	0,3	3	3	0,4001	0,0092	0,091	0,1011	0,655	3,8371	49,9875	46,1504
6	2	3	3	0,4000	0,0091	0,0909	0,1001	0,6551	3,8381	49,9451	46,107
7	0,5	5	1	0,4001	0,0091	0,0909	0,1001	0,6551	3,8381	49,9451	46,107
8	0,3	4	2	0,4000	0,009	0,09	0,1	0,6551	3,8373	49,9326	46,0953
9	0,4028	0,001	0,01	0,4000	0,009	0,09	0,1000	0,6561	3,8395	50	46,1605
10	0,4090	0,0091	0,0907	0,4000	0,009	0,09	0,1	0,6561	3,8395	50	46,1605

Fonte: Elaborado pela autora

Devido a uma restrição do espaço de busca, para valores que realmente melhoram a função objetivo, a maioria das tentativas apresentou os mesmos parâmetros, ou seja, com essa restrição, garantiu-se uma maior repetitividade dos resultados.

Após análise dos resultados de cada parâmetro encontrado, pode-se perceber que os parâmetros encontrados que apresentam o menor valor da Função Objetivo M juntamente com uma maior robustez do sistema, obedecendo ao mesmo tempo as restrições práticas, pois $T_1/T_2 = 0,1$, são:

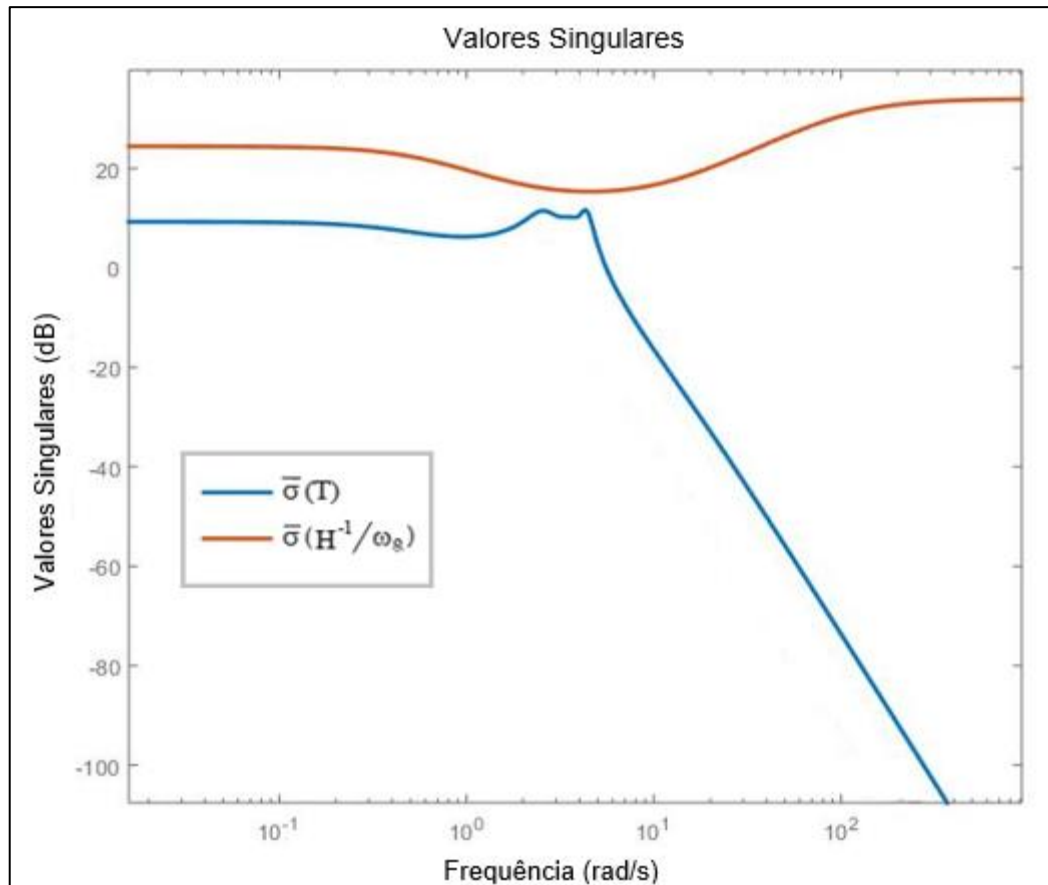
$$K=0,4$$

$$T_1=0,009s$$

$$T_2=0,09s$$

Os gráficos de $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$ com o controlador obtido e de $\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1}/\omega_0)$ para $\omega_{01}=(0,25s+0,15)/(0,5s+1)$ são apresentados na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Gráficos de $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$ para o controle proposto e de $\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1}/\omega_0)$

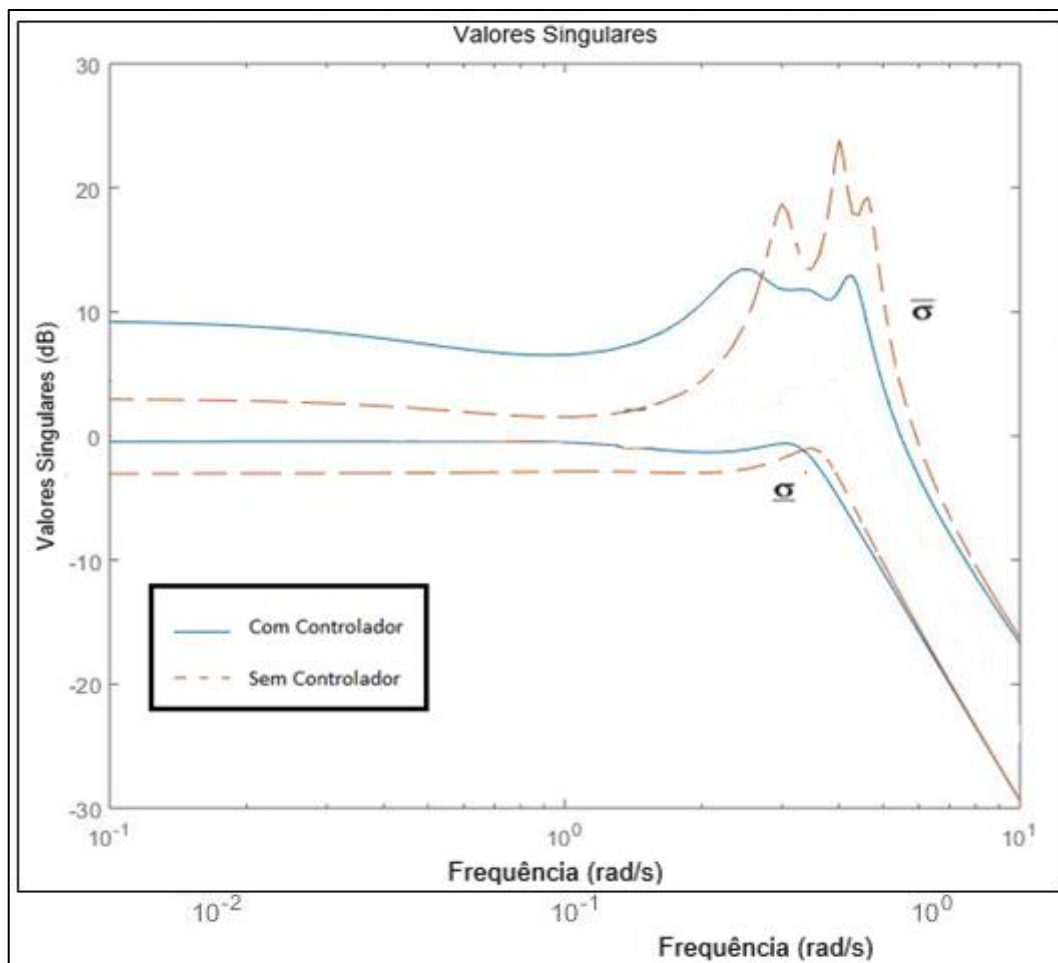


Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 6.8 confirma que foi obtido o controle robusto do sistema usando controladores descentralizados de 1ª ordem, uma vez que $\bar{\sigma}(T) < \bar{\sigma}(H^{-1}/\omega_0)$.

Observando os valores singulares do sistema com e sem controlador, os picos no gráfico de valor singular máximo de T são menores no sistema com controlador, mostrando que houve amortecimento dos MOEs. Isso pode ser comprovado, sobrepondo os dois gráficos, como mostra a Figura 6.9.

Figura 6.9 - Valores Singulares do Sistema com e sem controladores.



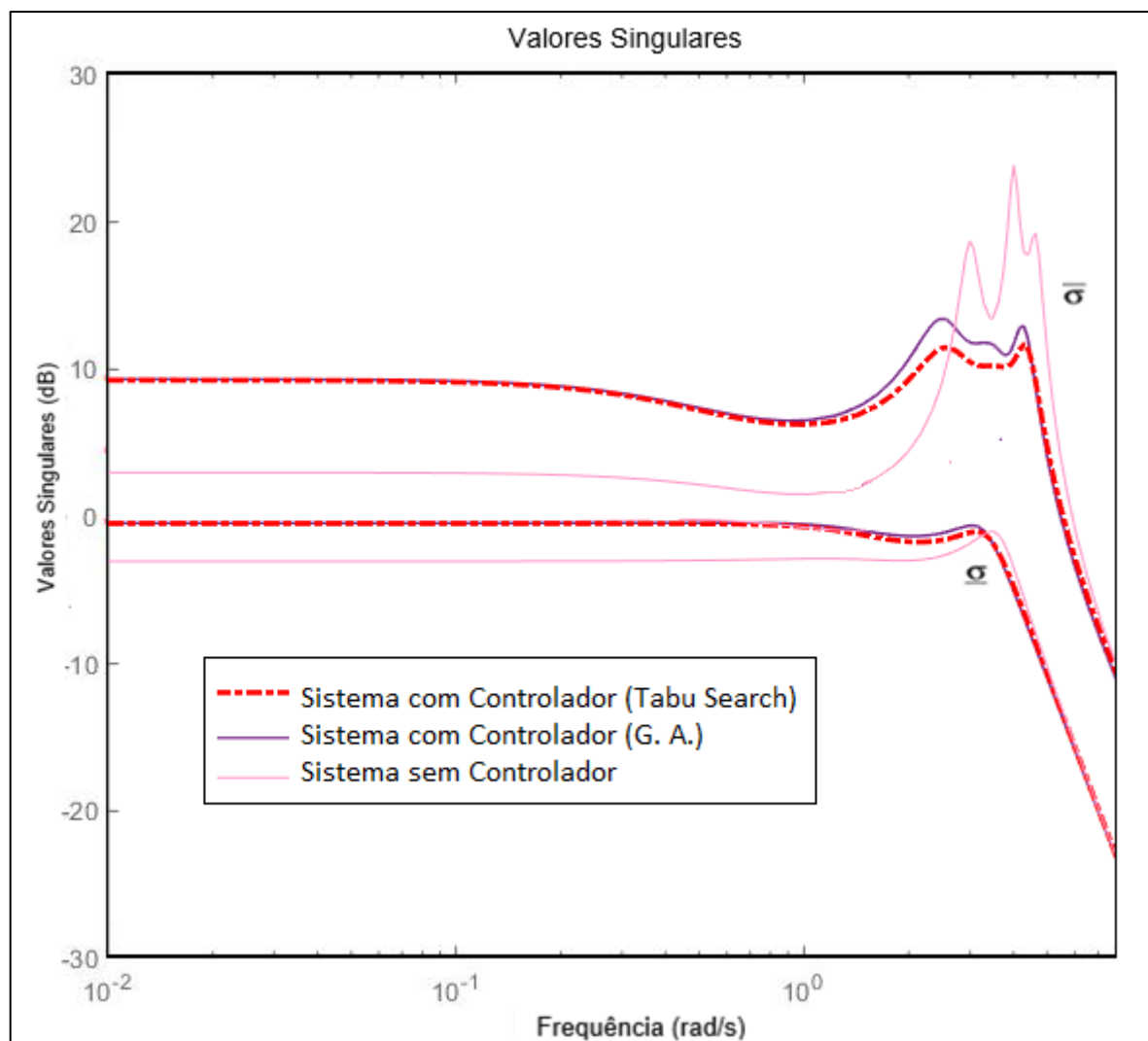
Fonte: Elaborado pela autora

Portanto, pode-se confirmar que o procedimento proposto, utilizando MGR para pré-seleção de saídas e entradas, deixando a seleção final para ser realizada com o uso de valores singulares é adequado e eficiente para aplicação no sistema de

carga-frequência escolhido, e foi fundamental para facilitar a escolha eficiente de um controlador de baixa ordem e descentralizado.

Analisando a Figura 6.10 pode-se concluir que, o método de otimização utilizado apresentou um ótimo resultado, além de, garantir um maior amortecimento do sistema, quando comparado ao resultado obtido pelo método “Algoritmos Genéticos” em Silva Filha (2012).

Figura 6.10 - Valores Singulares do sistema sem controlador, com controlador obtido por Algoritmos Genéticos e por Tabu search.



Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, seguindo todas as etapas propostas nesse trabalho, conclui-se então que o controlador funciona adequadamente para o sistema proposto, além de ter a robustez necessária para esse sistema.

CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7 CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho utilizou-se o método *Tabu search* modificado, ou seja, com restrição do espaço de busca, pois assim garantiu-se uma maior repetitividade dos resultados, para o desenvolvimento de um projeto de controladores robustos, descentralizados e de pequena ordem, e foi aplicado em um sistema de carga-frequência.

Inicialmente, utilizou-se de valores singulares, os quais permitem aplicar técnicas frequenciais em sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas. A matriz MGR indica o grau de interação entre as entradas e saídas do sistema, indicando o quanto o controlador pode ser descentralizado. O uso das duas técnicas permite selecionar simultaneamente todos os pares de entrada e saída mais efetivos, visando amortecer os modos de oscilações eletromecânicos mais críticos e obter um controlador descentralizado. Essa metodologia pode ser aplicada em qualquer sistema, independente do tamanho.

Esta técnica se sobressai em relação às técnicas tradicionais de controle robusto H_∞ , principalmente em sistemas de grande porte, por resultar em um controlador de baixa ordem, aplicado diretamente no sistema sem nenhuma redução do modelo, ao passo que nos métodos tradicionais o controlador resultante é centralizado e de ordem superior à ordem do sistema, sendo necessária a redução do modelo do sistema original e posteriormente a redução do próprio controlador.

Após a seleção das entradas e saídas mais significativas, assim como a definição do tipo de controlador, utilizou-se o método de otimização *tabu search* para encontrar os seus parâmetros, visando um maior amortecimento. Este método apresentou resultados bastantes satisfatórios, encontrando ótimos parâmetros para os controladores, e demonstrando uma melhora, quando comparado aos resultados existentes na literatura.

Considerando que esse é um campo de estudo bastante amplo, sugere-se, para trabalhos futuros, a aplicação deste método em modelos de sistemas diferentes do utilizado aqui, acrescentando mais áreas. Outros métodos de otimização também

poderão ser utilizados, tais como, recozimento simulado e colônia de abelhas, com o objetivo de agilizar o processo de obtenção dos parâmetros otimizados do controlador.

REFERÊNCIAS

8 REFERÊNCIAS

- Abido, M. A., "Power system stability enhancement using facts controllers: a review". The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 34, Number 1B, 2009.
- Abido, M. A., Abdel-Magid, Y. L., "Robust design of electrical power based stabilizers using tabu search". In: IEEE power eng society summer meeting, vol. 3; 15–19 July, p. 1573–78, 2001.
- Alden, R. T. H., Nolan, P. J., Bayne, J. P., "Shaft Dynamics in Closely Coupled Identical Generators", IEEE Transactions, v. PAS-96, pp. 721-728, 1977.
- Alrifai, M. T., Hassan, M. F., Zribi, M., "Decentralized load frequency controller for a multi-area interconnected power system". Electrical Power and Energy Systems, N° 33. pp. 198–209, 2011.
- Araújo, C. S., Castro, J. C., "Frequency Domain Technique for Designing Stabilisers for a Power Plant with Identical Generators", IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, v. 142, pp. 330-336, 1995
- Ayres, H. M., "Aplicação do Controlador UPFC para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2005.
- Bhattacharyya, S. P., Chapellat, H., e Keel, L. H., "Robust Control: The Parametric Approach". Vol.1, 1995.
- Boroujeni, S. M. S., Hemmati, R. e Boroujeni, H. F., "Load frequency control in multi area electric power system using genetic scaled fuzzy logic". International Journal of the Physical Sciences, Vol. 6(3), 377-385, 2011.
- Bristol, E. H., "On a New Measure of Interactions for Multivariable Process Control", IEEE Transactions on Automatic Control, v.AC-11, pp. 133-134, 1966.
- Cai, L. J, Erlich, i., "Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS controller for damping power system oscillations in multi-machine systems," IEEE Power Tech Conference Proceedings, vol. 2, pp. 136–141, 2003.
- Calvert, J. L.,Titli, A., "Overlapping vs Partitioning in Bloc - Iteration Methods: Application in Large-Scale Theory". Automatica, 25, 137-145, 1989.
- Castro, A. C., "Projeto de controladores robustos descentralizados de ordem reduzida para amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência". Tese apresentada à Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2006.
- Castro, J. C., Araújo, C. S., "Frequency Domain Analysis of Oscillatory Modes in Decentralized Control Systems", AUTOMATICA, v. 34, pp. 1647-1649, 1998

Castro, A. C., Araújo, C. S., "Análise de Sinais para Controle Descentralizado em Sistemas de Potência". In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1188-1193, Natal, 2002.

Castro, A. C., Araújo, C. S., "Um Estudo sobre Robustez de Controladores Descentralizados em Sistemas de Potência". In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, 2004.

Castro, A. C., Araujo, C. S., Araujo, J. M., Santos, E. T. F., "Robust H-infinity Control with Selection of Sites for Application of Decentralized Controllers in Power Systems". International Journal of Innovative Computing, Information & Control, v. 9, p. 139-152, 2013.

Castro, A. C., Araujo, J. M., Santos, E. T. F., Silva, F. G. S. e Araújo, C. S., "A novel technique for designing decentralized stabilizers for robust control in power systems using an H criterion". International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol 7, nº 3. pp. 1387-1396, 2011.

Coelho, L. dos S., "Busca tabu aplicada à otimização de banco de capacitores em sistemas secundários de distribuição de energia elétrica". Simpósio Brasileiro de Inteligência Computacional – SBIC, 2007.

Crenshaw, M. L., Cutler, J. M., Wright, G. F., et al., "Power System Stabilizer Application In a Two-Unit Plant Analytical Studies and Field Tests", IEEE Transactions, v. PAS-102, pp. 267-274, 1983.

Cruz, J. J., "Controle Robusto Multivariável", São Paulo, Editora Universidade de São Paulo, 1996.

Cunha, L. B., "Projeto de um Controlador Amortecedor Robusto Aplicado a Um Sistema de Potência Sujeito a Incertezas Parâmetros", Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2016.

Cutsem, T., and Vournas, C., "Voltage Stability of Electric Power Systems". Norwell, MA: Kluwer, 1998.

Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P., et al., "State-Space Solutions to Standard H2 and Control Problems", IEEE Transactions on Automatic Control, v. AC-34, pp. 831-847, 1989.

Elgerd, O. I., "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", 1ª ed., São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976.

Febres Tapia, C. A., "Análise do amortecimento de modos inter-áreas com o método de imposição de polos". C.A. Febres Tapia – versão corr. São Paulo, 112p, 2013.

Filho, X. V., "Operação de Sistema de Potencia com controle automático de Geração". Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 1984.

- Fischman, A., Bazanella, A.S., Silva, A. S., et al., "*Application of Linear Matrix Inequalities Techniques to the Design of Robust Coordinated Controllers for Power Systems*". In: Proceedings of the 3th IFAC Conference on System Structure and Control, Bucureste, Romênia, 1997.
- Folly, K.A., Yorino, N., Sasaki, H., "*Improving The Robustness of H^∞ -PSSs Using The Polynomial Approach*", IEEE Transactions on Power Systems, v.13, pp. 1359-1364, 1998.
- Glover, "Tabu search: A tutorial", Interfaces 20 - 74, 1990.
- Ghoshal S.P., "*Application of GA/GA-SA based fuzzy automatic generation control of a multi-area thermal generating system*". Elect. Power. Syst. Res. 70:115–27, 2004.
- IEEE/CIGRE, Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "*Definition and classification of power system stability*," IEEE Transactions on Power System, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401., May 2004
- IEEE, PES Working Group on System Oscillations, "*Power System Oscillations*". IEEE Special Publication 95-TP-101, 1995.
- Khodabakhshian, A., Edrisi, M., "A new robust PID load frequency controller". Control Eng. Pract.;16:1069–1080, 2008.
- Kothari, D. P., Nagrath, I. J., "*Modern power system analysis*". 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill; 2003.
- Kundur, P., "*Power System Stability and Control*". McGraw-Hill, 1994.
- Kundur, P., Klein, M., Rogers, G. J., et al., "*Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability*", IEEE Transactions on Power Systems, v.4, pp. 614-626, 1989.
- Kwakernaak, H., "*Robust Control and H^∞ Optimization-Tutorial Paper*", AUTOMATICA, v.29, pp. 255-273, 1993.
- Larsen, E. V., Sanchez-Gasca, J. J., Chow, J. H., "*Concepts for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings*", IEEE Transactions on Power Systems, v.10, pp. 948-956, 1995.
- Lawson, R. A., Swann, D. A., Wright, G. F., "*Minimization of Power System Stabilizer Torsional Interaction on Large Steam Turbine-Generators*", IEEE Transactions v.PAS-97, pp. 183-190, 1978.
- Martins, N., Pinto, H. J. C. P., Bianco, A., et al., "*TCSC Control Structures on Line Power Scheduling and Methods to Determine Their Location and Tuning to Damp*
- Martins, N., Pinto, H. J. C. P., Lima, L.T.G., "*Efficient Methods for Finding Transfer Function Zeros on Power Systems*", IEEE Transactions on Power Systems, v.7, pp.1350-1361, 1992.

- Middleton, R. H., "Trade-offs in Linear Control System Design". AUTOMATICA, 27, 281-292, 1991.
- Milanovic, J. V., Duque, A. C. S., "The Use of Relative Gain Array for Optimal Placement of PSS". IEEE Transactions on Power Systems, v.16, pp. 992-996, 2001.
- Mori, H. Goto, Y., "Parallel tabu search based method for determining optimal allocation of FACTS in power systems.", Proc. PowerCon on Power System Technology, pp. 1077-1082, 2000.
- Mota, W. S., "Simulação de transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência". Ed. EPGRAF. Campina Grande-PB. Brasil, 2006.
- Ogata, K., "Engenharia de Controle Moderno", Pearson. 5ed. 824p. 2010.
- Osman, I. H., "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem". Ann. Oper. Res., 41, 421-451, 1993.
- Othman, H. A., Ängquist, L., "Analytical Modeling of Thyristor Controlled Series Capacitors for SSR Studies", IEEE Winter Meeting, Paper 95 WM 171-9 PWRs, 1995.
- Pal, B., e Chaudhuri, B., "Robust Control in Power Systems". Ed. Springer, 2005.
- Paserba, J., "Recent Power Electronics/FACTS Installations to Improve Power System Dynamic Performance". Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007.
- Pereira Júnior, B. R., Cossi, A. M., Mantovani, J. R. S., "Proposta de uma metodologia baseada em busca tabu para restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica." in Anais do Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 19., Campina Grande: [s.n.], pp. 1204-1211, 2012.
- Ramos, R. A., Alberto, L. F. C., Bretas, N. G., "A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, pp. 444-454, 2004.
- Ramos, R. A., Martins, A. C. P., Bretas, N. G., "An improved methodology for the design of power system damping controllers". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, pp. 1938-1945, 2005.
- Rogers, G., "Power System Oscillation", 1 ed. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- SAADAT, Hadi. Power System Analysis. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc, 2002.
- Scavone, F. E., Silva, A. S., Trofino Neto, A., et al., "Projeto Robusto de Controladores para Sistemas de Potência Usando Técnicas LMI". In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, 1998.
- Schleif, F. R., Feeley, R. K., Philips, W. H., et al., "A Power System Stabilizer Application with Local Mode Cancellation", IEEE Transactions, v.PAS-98, pp. 1054-1059, 1979.

Shayeghi H., Shayanfar A., Jalili A., "Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher", *Energy Conversion and Management*, v.50, pp. 344–353, 2009.

Shayeghi, H., Shayanfar, H. A., "Design of decentralized robust LFC in a competitive electricity environment". *J Electron Eng*;56(9–10): 225–36, 2005.

Silva, L. G. W., "Desenvolvimento de uma metodologia integrada para alocação ótima de dispositivos de controle e proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica". Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP, 2005.

Silva Filha, B. G., "Projeto de controladores robustos para amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistemas carga-frequência". Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA, 2012.

Simões, A. M. et al., "Robust design of a TCSC oscillation damping controller in a weak 500-kV interconnection considering multiple power flow scenarios and external disturbances". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, p. 226-236, 2009.

Skogestad, S., Postlethwaite, I., "Multivariable Feedback Control Analysis and Design". John Wiley & Sons, 2005.

Sudha, K. R., Santhi, R. V., "Robust decentralized load frequency control of interconnected power system with Generation Rate Constraint using Type-2 fuzzy approach". *Electrical Power and Energy Systems*, nº 33, pp. 699–707, 2011.

System Oscillations". In: IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Foz do Iguaçu, Brazil, 1994.

Tan, W., "Decentralized load frequency controller analysis and tuning for multi-area power systems". *Energy Conversion and Management*, Nº 52, pp. 2015–2023, 2011.

Tan, W., Xu, Z., "Robust analysis and design of load frequency controller for power systems". *Elect. Power Syst. Res.*;79(5):846–53, 2009.

Taranto, G. N., Chow, J. H., "A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers", *IEEE Transactions on Power Systems*, v.10, pp. 1219-1225, 1995.

Tse, C. T., Tso, S. K., "Approach to the Study of Small-Perturbation Stability of Multimachine Systems". *IEE Proceedings C.*, v.5, pp. 396-405, 1988.

Wal, M. V, De Jager, B., "A Review of Methods for Input/Output Selection." *Automatica*, 37, 487-510, 2001.

Wang, Y., Hill, D. J., Guo, G., "Robust Decentralized Control for Multimachine Power Systems", *IEEE Transactions on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications*, v.45, pp. 271-279, 1998.

Wang, S. H., Swift, F. J., "*Capability of the static var compensator in damping power system oscillations*," IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, vol. 143, no. 4, pp. 353–358, 1996.

Yang, X., Feliachi, A., "*Stabilization of Inter-area Oscillation Modes through Excitation Systems*", IEEE Winter Meeting, Paper 93 WM 206-3 PWRS, 1993.

Zhang, C. Y., Li, P., Gun, Z. e Rao, Y., "*A tabu search algorithm with a new neighborhood structure for the job shop scheduling problem*". Computers & Operations Research 34: p 3229-3242, 2007.

Zhao, Q., Jiang, J., "*Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping*", IEEE Winter Meeting, Paper 95 WM 172-7 PWRS, 1995.

APÊNDICES

9 APÊNDICES

APÊNDICE A - Matrizes A, B, C e D para o sistema original

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} = & \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc}
 -\frac{1}{T_{p1}} & 0 & \frac{K_{p1}}{T_{p1}} & -\frac{K_{p1}}{T_{p1}} & & & & & & \\
 -\frac{1}{\tau_1 T_{R1}} - \frac{1}{T_{R1}} & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\
 0 & \frac{1}{T_{T1}} - \frac{1}{T_{T1}} & 0 & 0 & & & & & & \\
 2\pi T_{12}^0 & 0 & 0 & 0 & & & -2\pi T_{12}^0 & 0 & 0 & \\
 \hline
 & & & & -\frac{1}{T_{p3}} & \frac{K_{p3}}{T_{p3}} & -\frac{K_{p3}}{T_{p3}} & & & \\
 & & & & -\frac{1}{\tau_3 T_{R3}} - \frac{1}{T_{R3}} & 0 & 0 & & & \\
 & & & & 0 & \frac{1}{T_{T3}} - \frac{1}{T_{T3}} & 0 & & & \\
 & & & & 2\pi T_{32}^0 & 0 & 0 & 0 & & -2\pi T_{32}^0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} a_{12} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{T_{p2}} a_{32} & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 & \frac{K_{p2}}{T_{p2}} \\
 & & & & & & & & -\frac{1}{\tau_2 T_{R2}} - \frac{1}{T_{R2}} & 0 & \\
 & & & & & & & & 0 & \frac{1}{T_{T2}} - \frac{1}{T_{T2}} & \\
 \hline
 \end{array} \right] \\
 \mathbf{B} = & \left[\begin{array}{ccc|ccc}
 0 & & & & & \\
 \frac{1}{T_{R1}} & & & & & \\
 0 & & & & & \\
 0 & & & & & \\
 \hline
 & 0 & & & & \\
 & \frac{1}{T_{T3}} & & & & \\
 & 0 & & & & \\
 & 0 & & & & \\
 \hline
 & & & 0 & & \\
 & & & \frac{1}{T_{R2}} & & \\
 & & & 0 & & \\
 \hline
 \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} = & \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc}
 -\frac{1}{20} & 0 & \frac{240}{20} & -\frac{240}{20} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{1}{2,4 \cdot 0,08} & -\frac{1}{0,08} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{0,3} & -\frac{1}{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 2\pi 0,0866 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi 0,0866 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{20} & 0 & \frac{240}{20} & -\frac{240}{20} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2,4 \cdot 0,3} & -\frac{1}{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0,5} & -\frac{1}{0,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 2\pi 0,0866 & 0 & 0 & 0 & -2\pi 0,0866 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & -\frac{240}{20} \cdot -0,5 & 0 & 0 & 0 & -\frac{240}{20} \cdot -0,5 & -\frac{1}{20} & 0 & \frac{240}{20} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2,4 \cdot 0,2} & -\frac{1}{0,2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0,4} & -\frac{1}{0,4} \\
 \hline
 \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

```

A=[-0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0 0 0 0 0;
    -5.20833 -12.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 3.33333 -3.33333 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0.54412 0 0 0 0 0 0 0 -0.54412 0 0;
    0 0 0 0 -0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0;
    0 0 0 0 -1.38889 -3.33333 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 2.0 -2.0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 .54412 0 0 0 -0.54412 0 0;
    0 0 0 6.0 0 0 0 6.0 -0.05 0 12.0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 -2.08333 -5.0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 2.5 -2.5];

```

$$B = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{0,08} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.33333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

```

C=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];

```

APÊNDICE B - Código para obtenção da MGR no estado estacionário

```

A=[-0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0 0 0 0 0;    -5.20833 -12.5 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 3.33333 -3.33333 0 0 0 0 0 0 0 0;    0.54412 0 0 0 0 0 0 0 -0.54412 0 0;
    0 0 0 0 -0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0;    0 0 0 0 -1.38889 -3.33333 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 2.0 -2.0 0 0 0 0;    0 0 0 0 .54412 0 0 0 -0.54412 0 0;
    0 0 0 6.0 0 0 0 6.0 -0.05 0 12.0;    0 0 0 0 0 0 0 0 -2.08333 -5.0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 2.5 -2.5];

B=[0 0 0; 12.5 0 0; 0 0 0; 0 0 0; 0 0 0; 0 3.33333 0; 0 0 0;
   0 0 0; 0 0 0; 0 0 5.0; 0 0 0];

C=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
   0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];

D=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 0; 0 0 0; 0 0 0];

sys = ss(A,B,C,D);

%Função de transferência do sistema
G=tf(sys);
g=C*inv(A)*B;

%MGR do sistema
MGR=g.*pinv(g.')
```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

MGR =

0.0833	0.0833	0.1667
0.7500	0.0000	0.2500
0.0833	0.0833	0.1667
-0.0000	0.7500	0.2500
0.0833	0.0833	0.1667

APÊNDICE C - Código para obtenção da MGR em $w = 6$ rad/s

```

A=[-0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0 0 0 0 0;
   -5.20833 -12.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
   0 3.33333 -3.33333 0 0 0 0 0 0 0 0;
   0.54412 0 0 0 0 0 0 0 -0.54412 0 0;
   0 0 0 0 -0.05 0 12.0 -12.0 0 0 0;
   0 0 0 0 -1.38889 -3.33333 0 0 0 0 0;
   0 0 0 0 2.0 -2.0 0 0 0 0 0;
   0 0 0 0 0.54412 0 0 0 -0.54412 0 0;
   0 0 0 6.0 0 0 0 6.0 -0.05 0 12.0;
   0 0 0 0 0 0 0 -2.08333 -5.0 0;
   0 0 0 0 0 0 0 0 2.5 -2.5];

B=[0 0 0;12.5 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 3.33333 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 5.0;0 0 0];
C=[0.417 0 0 1.0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0.417 0 0 1.0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 0 -1.0 0.417 0 0];
D=[0 0 0;0 0 0;0 0 0];

%MGR jw

GJ = pck(A,B,C,D);
gw = frsp(GJ, 6);
RGAw = veval('.*', gw, vpinv(vtp( gw)))

```