



**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

IGLEYCE KELLY ALVES DA SILVA

**SELEÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS MAIS EFICAZES EM UM
SISTEMA DE POTÊNCIA**

**João Pessoa - PB
Junho - 2017**

IGLEYCE KELLY ALVES DA SILVA

**SELEÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS MAIS EFICAZES EM UM
SISTEMA DE POTÊNCIA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação de Engenharia
Elétrica como um dos pré-requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.
Dr. Alexandre César de Castro.**

**João Pessoa - PB
Junho – 2017**

S381s Silva, Igleyce Kelly Alves da

Seleção de entradas e saídas mais eficazes em um sistema de potência./
Igleyce Kelly Alves da Silva. – João Pessoa, 2017.

56 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Alexandre César de Castro

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I -
UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Sistemas de potência 2. Métodos de seleção 3. Pares de entrada e
saída 4. MGR 5. DVS I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed.621(043)

IGLEYCE KELLY ALVES DA SILVA

**Seleção de Entradas e Saídas Mais Eficazes em um Sistema de
Potência**

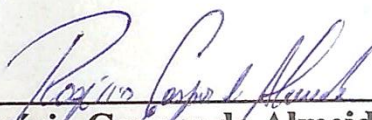
**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido a Coordenação de
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Data de Aprovação: 05 / 06 / 2017

Aprovado por:



**Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba**



**Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Membro)
Universidade Federal da Paraíba**



**Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes (Membro)
Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa – PB
Junho - 2017**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos meus pais, Maria do Socorro Alves da Silva e João Pedro da Silva, à minha irmã Ingrid Kelly Alves da Silva, à minha sobrinha Isadora Melina Alves de Luna, ao meu noivo, Lijecson Souza dos Santos, por todo o apoio e incentivo.

Ao meu professor orientador Alexandre César de Castro, por todo o incentivo que me foi dado ao longo do curso, por acreditar no meu potencial e cooperar de forma decisiva para a conclusão desta atividade.

Aos professores avaliadores Rogério Gaspar de Almeida e Darlan Alexandria Fernandes por aceitarem o convite para participarem da banca avaliadora e também por todos os ensinamentos que me passaram no decorrer do curso.

Aos colegas de curso por tornarem os dias cansativos mais leves e à todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste curso ou tornaram a caminhada até aqui mais agradável.

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação de dois métodos de seleção de sinais, matriz de ganhos relativos (MGR) e decomposição em valores singulares (DVS), em um sistema de potência com três áreas fazendo uso da ferramenta computacional MATLAB®, dada a necessidade de escolher para os sistemas de potência apenas os sinais de entrada e saída mais significativos. Realizando o estudo dos resultados obtidos com a aplicação dos métodos ao sistema de potência, estes mostraram um desempenho bastante satisfatório, permitindo a seleção dos melhores pares de entrada e saída e possibilitando uma melhor eficiência do sistema em questão.

Palavras-Chaves: Sistemas de potência. Métodos de seleção. Pares de entrada e saída. DVS. MGR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração do sistema de controle para avaliar a controlabilidade de IO.....	15
Figura 2.2 - Configuração geral do sistema de controle; planta G, controlador K, e incerteza Δ	20
Figura 3.1 - Diagrama simplificado de um sistema multivariável regular.....	23
Figura 3.2 - Diagrama simplificado de um sistema com interação entre malhas de controle.....	24
Figura 3.3 - Diagrama simplificado de um sistema linear multivariável regular desacoplado.....	24
Figura 6.1 - Malha de Controle Automático de Geração.....	33
Figura 6.2 - Diagrama de blocos de um modelo dinâmico simplificado de um sistema de potência.....	35
Figura 6.3 - Diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidade de uma turbina térmica.....	36
Figura 6.4 - Áreas de controle.....	37
Figura 6.5 - Diagrama de blocos relativo à equação 6.9.....	40
Figura 6.6 - Diagrama de blocos representando uma área de controle.....	41
Figura 6.7 - Modelo de área após redução dos blocos.....	42
Figura 6.8 - Modelo completo do sistema de carga-frequência com três áreas interligadas.....	44
Figura 7.1 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$ e $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C3})$	47
Figura 7.2 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$, $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ e $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$	48

LISTA DE SIGLAS

CC: Configuração de controle

DOF: *Degree Of Freedom*

DVS: Decomposição em Valores Singulares

IO: *Input / Output*

LQG: *Linear Quadratic Gaussian*

MGR: Matriz de Ganhos Relativos

MIMO: *Multiple Input / Multiple Output*

MO: Modo de Oscilação

MOE: Modos de Oscilação Eletromecânicos

NP: *Nominal Performance*

RS: *Robust Stability*

SISO: *Single Input / Single Output*

VC: Variável Controlada

VM: Variável Manipulada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	Objetivos.....	11
1.1.1.	Objetivo Geral.....	11
1.1.2.	Objetivos Específicos	11
1.2.	Organização do Trabalho	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	Acessibilidade	13
2.2.	Estado de controlabilidade e estado de observabilidade.....	14
2.3.	Zeros no semiplano direito	15
2.4.	Controlabilidade de entrada-saída.....	15
2.4.1.	O mínimo valor singular	16
2.4.2.	O máximo valor singular	16
2.4.3.	O número de condição	16
2.4.4.	Vetores singulares.....	17
2.4.5.	A matriz de ganhos relativos	17
2.5.	Eficiência de manipulação e estimativa.....	18
2.5.1.	Eficiência de manipulação	18
2.5.2.	Eficiência de estimativa	19
2.5.3.	Junção de eficiência de manipulação e de estimativa.....	19
2.6.	Estimativa robusta e desempenho nominal combinados	20
2.6.1.	Configuração geral do sistema de controle 1-DOF	20
2.7.	Métodos independentes de critérios de seleção	21
3.	SISTEMAS MULTIVARIÁVEIS - MÚLTIPLAS ENTRADAS / MÚLTIPLAS SAÍDAS.....	23
4.	MÉTODOS DE SELEÇÃO: MATRIZ DE GANHOS RELATIVOS E DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES.....	26
4.1.	Decomposição em Valores Singulares (DVS).....	26
4.1.1.	Propriedades da DVS.....	27

4.2.	Matriz de Ganhos Relativos (MGR).....	28
4.2.1.	Propriedades da MGR.....	29
5.	MODOS DE OSCILAÇÃO	31
5.1.	Conceito de oscilação em sistemas elétricos de potência.....	31
5.2.	Conceito de modo	32
6.	MODELO DE SISTEMA EM CARGA FREQUÊNCIA COM TRÊS	
	ÁREAS.....	33
6.1.	Conceito de área.....	34
6.2.	Modelo dos sistemas de regulação de velocidade das unidades de geração.....	34
6.3.	Obtenção do modelo de uma área.....	36
6.3.1.	Representação da área de controle por diagrama de blocos	40
6.4.	Modelo de sistema com as áreas interligadas	42
7.	APLICAÇÃO DA DVS E DA MGR EM UM SISTEMA DE TRÊS	
	ÁREAS.....	45
8.	CONCLUSÃO.....	50
9.	REFERÊNCIAS	51
10.	APÊNDICES	56
10.1.	Matrizes do sistema	56

1. Introdução

A grande maioria dos sistemas de potência operam com um grande número de variáveis de entrada e de saída, sistemas deste tipo são chamados multivariáveis. Apesar de representarem a maior parte dos sistemas de controle e de potência realizados na prática tais sistemas possuem um controle bastante complexo. O número elevado de variáveis a se controlar simultaneamente e que respondem à estímulos de distintos sinais de entrada tornam o sistema difícil de controlar, pois à medida que o número de candidatos a entradas e saídas aumenta, o número de possíveis conjuntos IO (de entrada e saída) cresce exponencialmente, além disso, surgem interações entre essas diversas variáveis do processo podendo resultar na instabilidade do sistema e na utilização de pares de sinais entrada/saída irrelevantes para o sistema (Van de Wal e De Jager, 2001).

A escolha sensata de IO é de grande importância, segundo Van de Wal e De Jager (2001) a escolha de entradas e saídas afeta o desempenho, a complexidade e os custos do sistema de controle, além de envolver a seleção da quantidade adequada, local e tipos de sensores e atuadores. Nesse contexto, devido à natureza combinatória do problema de seleção e no intuito de selecionar os pares de entrada e saída mais eficientes dos sistemas de controle vários métodos de seleção são utilizados e, na maioria das aplicações, são empregados dois métodos simultaneamente para a seleção dos pares IO mais adequados. Liu e Gao (2012) afirmam que, dentre os muitos métodos existentes, MGR (Matriz de Ganhos Relativos) e DVS (Decomposição em Valores Singulares) têm sido amplamente reconhecidas na prática, pois são técnicas que quantificam a controlabilidade dos sinais de entrada/saída do sistema.

Para a seleção dos sinais de entrada e saída deve-se eliminar os possíveis conjuntos de IO que não podem atingir os objetivos de controle pretendidos. Dessa forma, neste trabalho foram aplicados dois métodos de seleção, assim como suas respectivas propriedades, em um sistema com três áreas de controle no intuito de se obter como resultado um sistema mais simples, mais controlável e estável, no qual apenas os pares IO realmente relevantes para o sistema são considerados.

1.1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso são divididos em objetivos gerais e específicos conforme descrito nos tópicos a seguir.

1.1.1. Objetivo Geral

Efetuar a seleção dos sinais de entrada e saída mais eficazes em um sistema de potência.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Utilizar os métodos de seleção de sinais de entrada e saída matriz de ganhos relativos e decomposição em valores singulares por meio do ambiente computacional MATLAB®;
- Aplicar os dois métodos de seleção em um sistema de potência com três áreas interligadas.

1.2. Organização do Trabalho

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: São apresentadas a introdução e os objetivos do desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 2: É feita uma revisão bibliográfica bastante abrangente dos principais métodos de seleção de sinais utilizados por vários autores;
- Capítulo 3: É dada a definição de sistemas multivariáveis, visto que este é o tipo de sistema utilizado neste trabalho;
- Capítulo 4: São definidos os métodos de seleção MGR e DVS aplicados neste trabalho, bem como suas respectivas propriedades;
- Capítulo 5: É dada a definição de modos de oscilação, importante para a análise dos resultados apresentados no capítulo 7;
- Capítulo 6: É apresentado o modelo do sistema em carga frequência com três áreas no qual são aplicados os métodos de seleção abordados neste trabalho;

- Capítulo 7: São mostrados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de seleção no sistema de potência com três áreas, comprovando o bom desempenho dos métodos utilizados;
- Capítulo 8: Apresenta a conclusão, apresentando os objetivos que foram alcançados;
- Capítulo 9: São apresentadas todas as referências utilizadas;
- Capítulo 10: São apresentados os apêndices.

2. Revisão Bibliográfica

Na grande maioria das aplicações, os sistemas de controle operam com um grande número de variáveis de entrada e variáveis de saída. Essas multivariáveis tornam o sistema de controle ainda mais complexo devido às possíveis interações entre estas variáveis e consequentemente a seleção dos pares IO torna-se mais difícil. Para realizar essa seleção são utilizadas técnicas que fornecem os melhores pares à serem utilizados na implementação das malhas de controle.

Para a escolha do melhor método de seleção IO à ser utilizado na aplicação desejada, dentre os vários existentes, é importante avaliar algumas propriedades para a escolha do método mais apropriado ao sistema de controle em questão.

Van de Wal e De Jager (2001) agrupa os métodos de seleção IO de acordo com a propriedade do sistema de controle que eles resolvem, abordando diversas características dos sistemas, tais métodos são descritos a seguir.

2.1. Acessibilidade

Govind e Powers (1982) propõem uma técnica predominantemente qualitativa para a seleção de pares de entradas e saídas, que se baseia em gráficos de causa e efeito. A aplicação de tal técnica requer a acessibilidade, ou seja, com as variáveis manipuladas, deve ser possível afetar as variáveis controladas e com as variáveis medidas deve ser possível obter os valores das variáveis controladas. Porém, uma análise apenas pela acessibilidade pode ocorrer que um grande número de candidatos a pares de entrada e saída seja considerado viável, dessa forma, é necessária a utilização de critérios adicionais.

Daoutidis e Kravaris (1992) propõem a seleção de sinais em plantas não lineares. Eles definem o grau relativo r_{ij} que é uma medida do efeito de cada uma das entradas em cada uma das saídas. O grau relativo é proposto como uma medida da lentidão da resposta das variáveis controladas a mudanças nas variáveis manipuladas (Van de Wal e De Jager, 2001). Tais critérios são frequentemente utilizados para seleção de IO.

2.2. Estado de controlabilidade e estado de observabilidade

Esta seção lida com modelos de planta linear P na descrição do espaço de estados, conforme a equação 2.1.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du,\end{aligned}\tag{2.1}$$

Onde:

- x é o vetor de estados do sistema;
- \dot{x} é a derivada do vetor de estados em relação ao tempo;
- y é o vetor de saída;
- u é o vetor de entrada;
- A é a matriz de transição de estados;
- B é a matriz de entrada;
- C é a matriz de saída;
- D é a matriz de transferência direta.

na qual o número de entradas n_u não precisa ser igual ao número de saídas n_y .

Morari e Stephanopoulos (1980a) propõem a controlabilidade de estado estrutural como critérios de seleção de entradas e saídas. Essa nomenclatura se deve ao fato da planta ser representada em um modelo estrutural que requer apenas a informação se a variável está envolvida num determinado sistema de equação ou não. A controlabilidade e observabilidade estruturais proporcionam perspectivas de seleção de entradas e saídas para sistemas não lineares, pois por meio da “linearização” de um modelo não linear é possível obter um modelo estrutural linear.

Lin, Tade e Newell (1991) e Lin et al. (1994) utilizam a controlabilidade estrutural da saída para seleção de IO. Ou seja, cada saída pode ser influenciada por pelo menos uma entrada independentemente. Segundo Van de Wal e De Jager (2001) esse estudo é interessante pois, na prática, pode não ser necessário (estruturalmente) controlar e observar todos os estados.

2.3. Zeros no semiplano direito

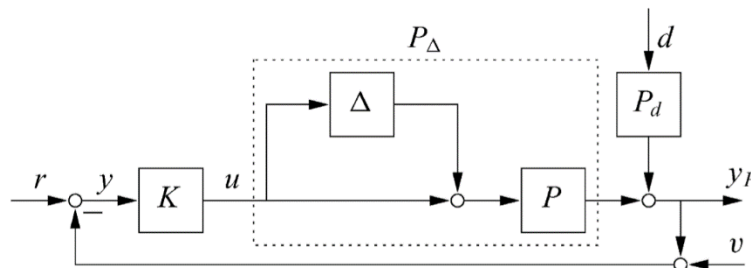
Diferentes conjuntos de IO podem originar números e localizações distintas de zeros do sistema, como definido em, por exemplo, Zhou et al. (1996). Os zeros no semiplano direito causam uma limitação no desempenho do circuito fechado, por isso, na seleção de IO é indicado rejeitar conjuntos IO que introduzem zeros no semiplano direito com magnitudes abaixo da largura de banda desejada, tal critério é utilizado por, por exemplo, Biss e Perkins (1993), e Hovd e Skogestad (1993), Samar e Postlethwaite (1994), e Wolff et al. (1992).

2.4. Controlabilidade de entrada-saída

Segundo Van de Wal e De Jager (2001) as medidas quantitativas de controlabilidade IO são amplamente abordadas na literatura, tais medidas se restringem a controlar problemas que apresentam a configuração da Figura 2.1, onde $P_d(s)$ modela a perturbação na saída da planta e $\Delta(s)$ modela a incerteza. Uma definição que pode ser dada para controlabilidade IO é:

Controlabilidade de entrada-saída. A planta na Figura 2.1 é chamada IO controlável se o desempenho aceitável pode ser alcançado, ou seja, se as saídas y e as entradas u podem ser mantidas aceitavelmente pequenas, na presença de incertezas Δ , referências r , distúrbios d , e ruídos de sensores v .

Figura 2.1 - Configuração do sistema de controle para avaliar a controlabilidade de IO.



Fonte: (Van de Wal e De Jager, 2001)

A base para as medidas de controlabilidade é muitas vezes a decomposição em valores singulares, cujo equacionamento é mostrado na seção 4.1, e o cálculo dos valores singulares é feito por meio da equação 4.2.

2.4.1. O mínimo valor singular

O mínimo valor singular de uma planta: $\underline{\sigma}(P) \geq 0$, é uma das primeiras medidas de controlabilidade IO que é frequentemente usada para a seleção de entradas e saídas (Van de Wal e De Jager, 2001). Em Tzouanas et al. (1990), o mínimo valor singular é sugerido para seleção *online* do conjunto de entrada, para se adaptar às mudanças nas condições de operação. Os conjuntos de IO devem ser selecionados de forma que resulte um grande valor singular mínimo.

2.4.2. O máximo valor singular

O método de seleção de entrada de Cao e Biss (1996) é um dos poucos métodos diretos. Com N_y saídas fixas e N_u entradas possíveis, a planta para o conjunto de entrada completo, $P = [P_1, \dots, P_{N_u}]$, é construída. Cao e Biss (1996) sugerem reter essas n_u entradas ($N_y \leq n_u \leq N_u$) com o maior “ganho de entrada única”, dado pela equação 2.2.

$$\sigma_{u_j}(P) := \sqrt{P_j^* P_j} = \sigma(P_j) = \bar{\sigma}(P_j) \quad (2.2)$$

Onde “:=” indica que o termo do lado esquerdo da equação pode ser definido como a equação do lado direito.

Porém, segundo Van de Wal e De Jager (2001) esta abordagem pode não ser eficaz, pois a combinação de entradas não é avaliada, podendo assim ser selecionado um conjunto de entradas que é incapaz de afetar todas as saídas.

2.4.3. O número de condição

Uma outra medida de controlabilidade IO bastante comum é o número de condição. De forma geral, um conjunto de IO deve ser escolhido de forma que resulte em um pequeno número de condição. O número de condição é definido pela equação 2.3:

$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}}{\underline{\sigma}} \quad (2.3)$$

Sendo $\bar{\sigma}$ o valor singular máximo e $\underline{\sigma}$ o valor singular mínimo.

Morari (1983) mostra que um pequeno número de condição corresponde a uma boa robustez, o que justificaria selecionar conjuntos de IO que dão origem a um pequeno número de condição.

Reeves (1991) propõe um método para reduzir o número de entradas e saídas candidatas. Começando com o conjunto completo de IO, onde uma única entrada ou uma única saída que produz o conjunto de IO reduzido com o menor número de condição é eliminada, calculado a uma frequência adequada. Deste modo, o tamanho do conjunto de IO é reduzido gradualmente, até que seja administrável por outras técnicas. Porém, o conjunto final de IO não é garantido ser o conjunto IO para o qual a dimensão de número de condição é menor. Para isso, o número de condição deveria ter sido calculado para todos os conjuntos de IO daquela dimensão.

2.4.4. Vetores singulares

O próximo grupo de medidas de controlabilidade IO envolve os vetores singulares da decomposição em valores singulares.

Moore Hackney e Carter (1987) sugerem um método cuja ideia-chave é encontrar o melhor compromisso entre as medidas y que são independentes entre si e as medições que são sensíveis a alterações das entradas u . Para este efeito, a DVS de P no estado de equilíbrio é calculada e são considerados conjuntos IO quadrados.

Keller e Bonvin (1987) propõem um método de seleção de entrada que tem como objetivo selecionar as n_u entradas que possuem “o efeito mais forte e mais ortogonal” nas saídas y .

Em Cao e Biss (1996) uma abordagem direta é sugerida para selecionar as entradas $n_u \geq N_y$ dos N_u candidatos com o maior efeito sobre o número fixo de N_y saídas y . A DVS de P para o conjunto completo de entrada é calculada com uma frequência relevante.

2.4.5. A matriz de ganhos relativos

A medida de controlabilidade IO final que é muitas vezes utilizada para a seleção IO é a matriz de ganhos relativos em função da frequência (MGR) para uma matriz não singular, quadrada, dada pela equação 4.3, que é descrita detalhadamente na seção 4.2.

A MGR foi introduzida por Bristol (1966) como uma medida para as interações dos sistemas de controle descentralizados. Uma regra frequentemente encontrada é que conjuntos IO que causam grandes elementos MGR devem ser evitados, pois as plantas correspondentes seriam difíceis de controlar, ver, por exemplo, Chen, Freudenberg e Nett (1994).

Motivados pelo fato das plantas com elementos MGR com grandes valores absolutos serem muito sensíveis, Samar e Postlethwaite (1994) baseiam-se na magnitude dos elementos da MGR no processo de seleção IO. Como mostrado em Cao e Biss (1996), Chang e Yu (1990), e Skogestad e Postlethwaite (1996), em certa medida, pode ser utilizada a MGR para uma abordagem direta de seleção IO.

2.5. Eficiência de manipulação e estimativa

O objetivo de atuadores é manipular o sistema de tal modo que ele se comporte como desejado, enquanto o objetivo dos sensores é obter as melhores informações possíveis sobre o comportamento do sistema. Nesta seção serão abordadas as maneiras adequadas para realizar a seleção de atuadores e sensores.

2.5.1. Eficiência de manipulação

Em Al-Sulaiman e Zaman (1994), a função de custo J_u é apresentada conforme a equação 2.4:

$$J_u = \int_0^{t_e} (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt. \quad (2.4)$$

sendo $x(t)$ o vetor de estado, $u(t)$ o vetor de entrada, $Q = Q^T \geq 0$ e $R = R^T > 0$ são ponderações. O conjunto de entrada apropriado é aquele que dá origem a menor função de custo. Al-Sulaiman e Zaman (1994), avaliam J_u somente após a realimentação de estado ter sido projetada por posicionamento de pólos e uma simulação de circuito fechado para uma perturbação ter sido executada durante o intervalo de tempo $[0, t_e]$. A seleção de entrada depende, assim, da escolha do sinal de perturbação. Xu, Warnitchai e Igusa (1994) utilizam uma função de custo semelhante com $t_e = \infty$.

Para sistemas não-lineares, Cao, Biss e Perkins (1996) consideram seleção de entradas com restrições de magnitude. A função de custo J_u toma a forma mostrada na equação 2.5.

$$J_u = \int_0^{t_e} (z(t) - z_r)^T Q (z(t) - z_r) dt \quad (2.5)$$

com z_r um ponto de ajuste especificado para as variáveis controladas z e com $Q > 0$ uma matriz de ponderação diagonal. O conjunto de entrada preferido é aquele que produz a menor J_u . A seleção de entrada com base nesta otimização requer grande aplicação computacional (Cao, 1995) e os resultados podem depender das escolhas de z_r e das condições iniciais.

2.5.2. Eficiência de estimativa

Morari e Stephanopoulos (1980b) selecionam medições (secundárias) que visam minimizar os erros nas estimativas de variáveis relevantes, como as variáveis controladas z . As fontes de erro são incertezas do modelo, distúrbios de processo e ruído do sensor. O método de seleção de saída proposto por Kumar e Seinfeld (1978) visa minimizar erros de estimativa de estado usando um estimador dinâmico (filtro Kalman) em vez de um estático. Incertezas do modelo, distúrbios de processo e ruído do sensor são novamente abordados a partir de um ponto de vista estocástico, adicionando ruído branco.

Rhodes e Morari (1995) fazem uma tentativa no sentido de seleção de saída para uma planta autônoma não-linear. A ideia básica não é a minimização de erros de estimativa, mas minimização dos erros de modelagem. O objetivo é designar o menor número de medições (secundárias) y que permite uma recriação exata da dinâmica do sistema não-linear. Após a seleção de saída, as saídas que são necessárias para descrever com precisão o sistema são conhecidas, mas um modelo ainda tem que ser derivado (Van de Wal e De Jager, 2001).

2.5.3. Junção de eficiência de manipulação e de estimativa

Em Norris e Skelton (1989), a seleção de IO é baseada numa função de custo semelhante ao do controle linear quadrático Gaussiano (LQG), conforme a equação 2.6:

$$J_{uy} = E \left(\int_0^{\infty} (z^T(t) Q z(t) + u^T(t) R u(t)) dt \right) \quad (2.6)$$

sendo z as variáveis que devem ser mantidas pequenas.

Uma abordagem para a seleção IO seria recalculer J_{uy} para cada conjunto IO e identificar o (s) conjunto (s) IO que produz (em) o menor J_{uy} . No entanto, para reduzir o esforço computacional, Norris e Skelton (1989) calculam J_{uy} apenas para o conjunto IO completo. A eficácia de cada atuador e sensor é expressa pela alteração em J_{uy} se um atuador ou sensor é eliminado, quanto maior a alteração, maior a eficiência. Estas eficácias medidas são então utilizadas para a seleção IO. No entanto, as definições das medidas são discutíveis: elas podem não ser fisicamente significativas e não serem consistentes para atuadores e sensores (Van de Wal e De Jager, 2001).

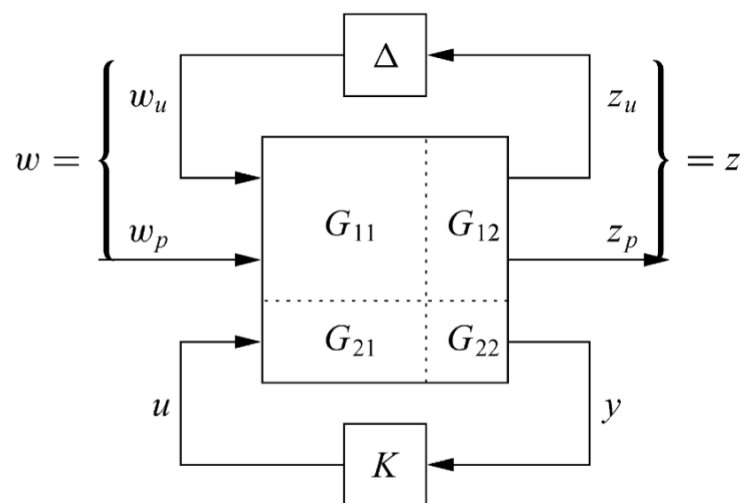
2.6. Estimativa robusta e desempenho nominal combinados

Esta seção considera estabilidade robusta (RS) e desempenho nominal (NP) combinados como critérios de seleção IO. Estabilidade robusta garante a estabilidade na presença de incertezas, enquanto desempenho nominal garante a estabilidade e o desempenho na ausência de incertezas.

2.6.1. Configuração geral do sistema de controle 1-DOF

Os métodos de seleção IO nesta seção usam a configuração da Figura 2.2.

Figura 2.2 - Configuração geral do sistema de controle; planta G , controlador K , e incerteza Δ .



Fonte: (Van de Wal e De Jager, 2001)

As incertezas Δ são isoladas do modelo nominal da planta G e w e z são divididos em partes relacionadas com a incerteza (w_u, z_u) e desempenho (w_p, z_p).

Em Van de Wal e De Jager (1996) e Van de Wal (1998), um método de seleção de IO é proposto para RS e NP separados ou combinados. Δ é assumido como não estruturado, linear e invariante no tempo. Um problema de controle \mathcal{H}_∞ é formulado, com a norma \mathcal{H}_∞ de uma matriz função de transferência $H(s)$ definida pela equação 2.7, onde $\bar{\sigma}$ é o máximo valor singular.

$$\|H(s)\|_\infty := \sup_{\omega} \bar{\sigma}(H(j\omega)) \quad (2.7)$$

Onde “:=” indica que o termo do lado esquerdo da equação pode ser definido como a equação do lado direito.

Em Van de Wal et al. (1997) e Van de Wal (1998), o método de seleção IO descrito acima é usado em sistemas não-lineares. Para que o problema \mathcal{H}_∞ não linear seja localmente solucionável, basta que o problema \mathcal{H}_∞ linear seja solucionável (Van der Schaft, 1996). Dessa forma, conjuntos de IO podem ser rejeitados incorretamente.

2.7. Métodos independentes de critérios de seleção

A maioria dos critérios de seleção de IO discutidos são avaliados numa base por candidato, de modo que no pior caso todos os conjuntos de IO têm de ser verificados. Isso implica numa busca exaustiva por um número de combinações que cresce exponencialmente com $N_u + N_y$, que é praticamente intratável e ineficiente. Para evitar a natureza combinatória do problema, em geral é preciso fazer um compromisso, seja na escolha do critério de seleção, seja na escolha da estratégia de busca (Van de Wal e De Jager, 2001).

De Jager e Toker (1998) baseia-se em um algoritmo que gera todos os conjuntos dependentes mínimos, isto é, conjuntos que são viáveis mas cujos subconjuntos são todos inviáveis.

Outra abordagem para evitar testes exaustivos numa base de candidato a candidato é através da otimização. A adição de um critério de otimização pode gerar uma solução única, Hassibi, How e Boyd (1998) baseiam-se nesta ideia. Se os coeficientes do controlador tendem

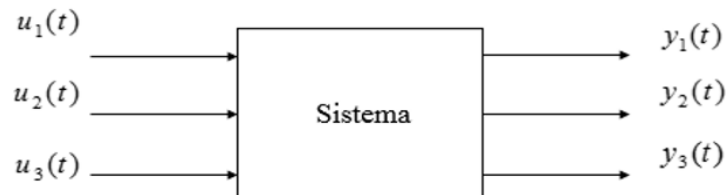
a ser zero, pode ser possível que alguns atuadores e sensores não sejam utilizados. Este método combina seleção de IO e CC (configuração de controle).

Dentre todos os métodos de seleção descritos, neste trabalho foram utilizados a decomposição em valores singulares e matriz de ganhos relativos. A seleção de sinais por meio da matriz de ganhos relativos não é frequentemente utilizada para seleção de entradas e saídas em sistemas de potência, este método é mais comumente utilizado na área da química, sendo a abordagem de tal aplicação de considerável importância para a engenharia elétrica, sobretudo para sistemas de potência.

3. Sistemas multivariáveis - múltiplas entradas / múltiplas saídas

Na maioria dos sistemas de potência, assim como nos sistemas de controle, existe a necessidade de se trabalhar com diversas variáveis de entrada e variáveis de saída. Sistemas de controle desse tipo são chamados de sistemas com múltiplas-entradas/múltiplas-saídas (MIMO) (Skogestad e Postlethwaite, 2005), ilustrado na Figura 3.1.

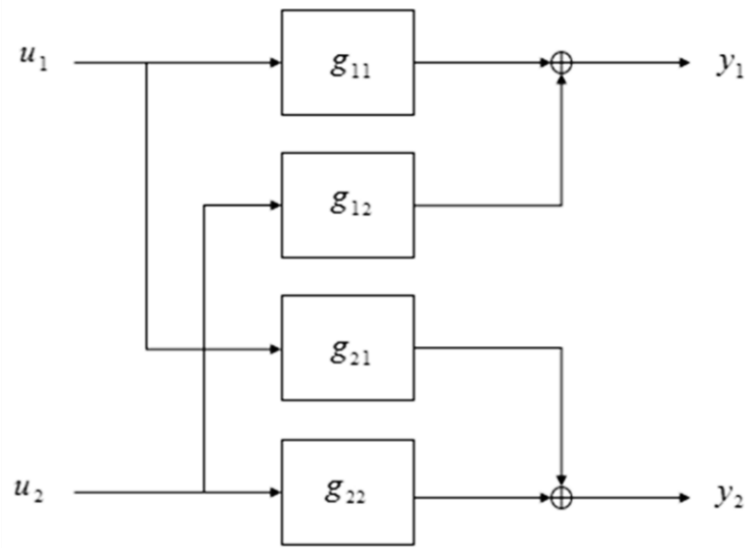
Figura 3.1 - Diagrama simplificado de um sistema multivariável regular.



Fonte: (Anjos, 2014)

Como esses sistemas possuem várias entradas e várias saídas apresentam, conseqüentemente, uma complexidade maior que um sistema simples-entrada/simples-saída (SISO) pois uma entrada passa a influenciar outras saídas além daquela à qual ela está diretamente relacionada. Se houver uma alteração na primeira entrada, u_1 , então isto geralmente afetará todas as saídas, y_1, y_2, \dots, y_l , ou seja, haverá interações entre as entradas e saídas. Numa planta que não possui interações u_1 afeta apenas y_1 , u_2 só afeta y_2 e assim por diante. Esse processo de interação que ocorre entre as malhas faz com que, havendo um distúrbio sobre a saída y_1 , as variações na entrada u_1 apresentem um efeito direto e um efeito indireto sobre a saída, esses efeitos geram duas ações de controle simultâneas que conseqüentemente dificultam a sintonia dos controladores, e que podem desestabilizar o sistema em malha fechada conforme ilustrado na Figura 3.2.

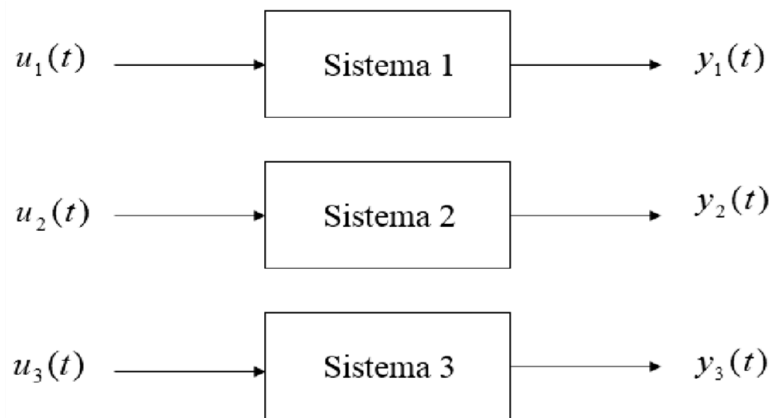
Figura 3.2 - Diagrama simplificado de um sistema com interação entre malhas de controle.



Fonte: (Anjos, 2014)

Uma alternativa para eliminar os efeitos dessas interações é fazer o desacoplamento dessas variáveis, conforme a Figura 3.3, onde um sistema MIMO é transformado em vários sistemas SISO, dessa forma, uma única entrada afeta uma única saída.

Figura 3.3 - Diagrama simplificado de um sistema linear multivariável regular desacoplado.



Fonte: (Anjos, 2014)

Fazendo uma abordagem sobre as representações de sistemas multivariáveis, sabe-se que uma das formas mais comuns de se representar o comportamento dinâmico de sistemas lineares, invariantes no tempo com atraso é através de funções de transferência. Segundo Flesch (2012), é comum escrever a função de transferência da planta como a composição da função de

transferência sem atraso ($G_{ij}(z)$) e $z^{-d_{ij}}$, que representa o atraso, onde d_{ij} é o atraso de transporte discreto. Dessa forma, é descrita uma matriz de transferência $P(z)$ que relaciona cada uma das entradas com cada uma das saídas, escrita para um sistema multivariável, como definida na equação 3.1:

$$P(z) = \begin{bmatrix} G_{11}(z)z^{-d_{11}} & \dots & G_{1n}(z)z^{-d_{1n}} \\ G_{21}(z)z^{-d_{21}} & \dots & G_{2n}(z)z^{-d_{2n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(z)z^{-d_{n1}} & \dots & G_{nn}(z)z^{-d_{nn}} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde $G_{ij}(z)z^{-d_{ij}}$ é a função de transferência que relaciona a j -ésima entrada com a i -ésima saída.

Porém, existe uma representação alternativa que emprega variáveis de estado, conforme o sistema descrito na equação 2.1.

A confiabilidade, as despesas de hardware, implementação, operação e manutenção do sistema de controle dependem da seleção dos conjuntos IO. Nesse contexto, torna-se indispensável a seleção adequada dos pares de variáveis entrada-saída para que o desempenho e estabilidade do sistema não sejam afetados, os métodos de seleção abordados neste trabalho são descritos no capítulo 4.

4. Métodos de seleção: Matriz de Ganhos Relativos e Decomposição em Valores Singulares

Dentre os vários métodos de seleção existentes, neste trabalho serão abordados os métodos de decomposição em valores singulares e matriz de ganhos relativos, tais técnicas quantificam a eficiência dos sistemas em manterem suas saídas e suas entradas aceitavelmente pequenas, na presença de incertezas limitadas, referências, distúrbios, e ruídos de sensores.

4.1. Decomposição em Valores Singulares (DVS)

Os valores singulares da matriz de funções de transferência de um sistema multivariável fornecem informações sobre a sensibilidade desse sistema nas diferentes direções, e por medirem sensibilidade, esses valores singulares são chamados muitas vezes de ganhos do sistema. A decomposição em valores singulares determina se um sistema estará tendencioso a interações na malha de controle, o que gera problemas de sensibilidade. Além de ser útil também na determinação das variáveis que mais irão influenciar na operação.

A decomposição em valores singulares é muito útil para as plantas não quadradas. Considerando, por exemplo, numa planta com 2 entradas e 3 saídas, o terceiro vetor singular de saída nos diz quais as direções de saída da planta não podem ser controladas. Da mesma forma, para uma planta com mais entradas do que saídas, os vetores singulares de entrada adicionais nos dizem em quais direções a entrada não terá efeito.

A DVS pode ser definida matematicamente. Seja um sistema MIMO $G(s)$ com m entradas e l saídas, sendo G uma matriz complexa constante ($l \times m$), esta pode ser decomposta em valores singulares, dada pela equação 4.1.

$$G = U \cdot G_D \cdot V^T \quad (4.1)$$

Sendo:

U uma matriz ($l \times l$) cujas colunas, u_i , são os vetores singulares de saída,

V uma matriz ($m \times m$) cujas colunas, v_i , são os vetores singulares de entrada,

G_D uma matriz $l \times m$ com $k = \min\{l, m\}$ valores singulares não-negativos, σ_i , dispostas em ordem decrescente ao longo de sua diagonal principal, ou seja $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > 0$; as outras entradas são zero.

Matricialmente, os componentes da matriz G podem ser descritos da seguinte forma:

$$G_D = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_1(G) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \underline{\sigma}_k(G) \end{bmatrix}_{l \times m}$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \end{bmatrix}_{l \times l}$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix}_{m \times m}$$

Onde:

u_1 é o vetor singular que indica a direção em que as variáveis de saída mudam mais facilmente, frente a variações nas variáveis de entrada.

u_2, u_3, \dots, u_l indicam, nessa ordem, direções cada vez menos sensíveis.

v_2, v_3, \dots, v_l indicam a combinação de variáveis de entrada cuja variação afeta as saídas de forma mais significativa.

Os valores singulares são a raiz quadrada dos autovalores de $G^T G$, onde G^T é a matriz conjugada e transposta de G , conforme já descrito anteriormente e dado pela equação 4.2.

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

Sendo λ_i o i -ésimo autovalor da matriz e $k = \min(l, m)$.

4.1.1. Propriedades da DVS

As principais propriedades da DVS definidas por Cruz (1996) e Skogestad e Postlethwaite (2005) são descritas a seguir:

- $\bar{\sigma}$ na frequência de um MO (modo de oscilação) representa o grau de observabilidade do modo na resposta do sistema e $\underline{\sigma}$ representa o grau de controlabilidade do modo. MO pouco amortecidos e fortemente observáveis apresentam grandes picos no gráfico de $\bar{\sigma}$. Os picos de $\bar{\sigma}$ são associados à robustez do sistema. Sistemas robustos apresentam pequenos picos de $\bar{\sigma}$.
- Uma depressão no gráfico de $\underline{\sigma}$ indica a existência de um zero influente na referida frequência.
- Número de condição elevado ($\gamma > 10$) indica dificuldade de controle, principalmente se $\underline{\sigma} \ll 1$.
- A norma l_2 de \mathbf{G} é $\bar{\sigma}(\mathbf{G})$. Também, $\|\mathbf{G}^{-1}\| = 1/\underline{\sigma}(\mathbf{G})$.

4.2. Matriz de Ganhos Relativos (MGR)

Sistemas multivariáveis apresentam como uma de suas características interações entre as suas variáveis de entrada e saída, essas interações por sua vez, aumentam a quantidade de possíveis conjuntos IO de forma considerável. Dessa forma, é necessário que sejam selecionados os emparelhamentos mais adequados e que o grau e tipo de interação sejam medidos. A MGR é uma medida que pode ser usada para quantificar o nível de interações em um sistema multivariável.

O primeiro passo para a definição da estratégia de controle a ser adotada em um sistema multimalha deve ser a determinação da Matriz de Ganhos Relativos desse sistema (Bristol, 1966; Seborg et al, 1989; Shinskey, 1996), e a partir dela determinar os melhores pares das variáveis VM (variável manipulada) e VC (variável controlada).

A técnica MGR consiste em uma matriz em que seus termos são razões entre o ganho estático de cada par entrada-saída, quando o outro par se encontra em malha aberta, e o ganho estático do mesmo par quando o outro se encontra em malha fechada (Rangel, 2010 apud Quirino, 2012).

A MGR apresenta uma definição matemática, como mostrado a seguir. Seja um sistema multivariável descrito pela matriz de função de transferência $G(s)$, a MGR representa a matriz de ganho relativo em função da frequência, conforme mostrado na equação 4.3.

$$MGR(j\omega) = G(j\omega) \times (G(j\omega)^{-1})^T \quad (4.3)$$

Os pares, variável controlada-variável manipulada podem então ser determinados através dos resultados da matriz $MGR(j\omega)$, em que, cada elemento da matriz representa o grau de interação entre o par entrada-saída correspondente a este elemento, podendo então tomar-se uma decisão sobre o emparelhamento das variáveis.

A matriz de ganhos relativos pode ser representada conforme mostrado abaixo.

$$\begin{array}{c} \text{Variáveis de Saída} \\ \left[\begin{array}{cccc} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1j} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{i1} & \lambda_{i2} & \dots & \lambda_{ij} \end{array} \right] \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{Variáveis de Entrada} \\ \left[\begin{array}{c} \phantom{\lambda_{11}} \\ \phantom{\lambda_{21}} \\ \\ \phantom{\lambda_{i1}} \end{array} \right] \end{array}$$

Onde as variáveis de entrada representam as colunas da matriz e as variáveis de saída representam as linhas da matriz e tais variáveis devem ser pareadas de acordo com o valor dos elementos λ_{ij} mais próximos de 1, como será mostrado na seção 4.2.1.

Uma característica importante da matriz de ganhos relativos que merece ser citada é que a eficiência e confiabilidade para seleção de sinais são alcançadas quando se tem a matriz de ganhos relativos igual a matriz identidade, o que não ocorre em sistemas de potência. Portanto, pode-se aceitar o conjunto de sinais de entrada e saída para os quais a MGR é muito próxima da matriz identidade, ou seja $MGR(j\omega) \cong I$, para $\omega = \omega_c$ (Skogestad e Postlethwaite, 2005). Tal característica será importante para a análise dos resultados obtidos neste trabalho.

4.2.1. Propriedades da MGR

As propriedades descritas por Corrêa (2005) baseiam-se nas interações entre as malhas de controle, onde a configuração de controle escolhida deve ser aquela que apresente a menor interação. Considere a matriz de ganhos relativos de um sistema $N \times N$. Deve-se analisar os valores de λ_{ij} para verificar qual configuração de controle apresentará menor interação:

- $\lambda_{ij}(s) = 1$: as malhas do sistema estarão totalmente desacopladas, ou seja, somente a entrada j atua sobre a saída i ;

- $\lambda_{ij}(s) = 0$: a variável de entrada j não atua sobre a saída i . Outra variável de entrada deve ser escolhida para o controle da variável de saída;
- $0 < \lambda_{ij}(s) < 1$: haverá interação entre as malhas;
- $\lambda_{ij}(s) > 1$: há interações entre as malhas de controle, mas há menos opções de pareamento;
- $\lambda_{ij}(s) < 0$: Impossibilidade de controlar o sistema, logo esse pareamento é indesejável e deve ser evitado.

Pode-se avaliar a matriz dos ganhos relativos tanto no estado estacionário (método tradicional: $\Lambda(0)$), quanto dinamicamente (mais interessante: $\Lambda(\omega)$).

Portanto,

- Deve-se escolher a configuração de controle, com malhas de controle apresentando $\lambda_{ij}(s)$ o mais próximo de 1;
- Evitar escolher uma configuração onde $\lambda_{ij}(s) > 1$.

5. Modos de Oscilação

A estabilidade de sistemas elétricos de potência pode ser definida como a capacidade que esses sistemas apresentam de se manter em equilíbrio sob condições normais de operação, bem como a de atingirem um estado aceitável de equilíbrio após serem submetidos a distúrbios ou perturbações (Kundur, 1994; IEEE/CIGRE, 2004). A falta de sincronismo dos geradores pode provocar a perda da estabilidade dos sistemas de geração de energia. Com o crescimento das potências de intercâmbio, a estabilidade dos sistemas elétricos tornou-se mais vulnerável devido às oscilações (Castro, 2006). A presença de oscilações nos sistemas de potência limita a potência transmitida e aumenta o risco de se ter paradas não programadas de fornecimento de energia. Logo, o amortecimento destas oscilações é de grande importância em sistemas elétricos de potência (Rogers, 2000).

A seguir são definidos conceitos de oscilações em sistemas elétricos de potência, para uma melhor compreensão da importância de tal estudo em sistemas deste tipo.

5.1. Conceito de oscilação em sistemas elétricos de potência

As oscilações associadas às equações de oscilação do sistema são denominadas “oscilações eletromecânicas” e os modos de oscilação associados a essas oscilações são denominados “modos eletromecânicos” (MOE) (Castro, 2006). A equação 5.1 representa a oscilação, por variáveis de estado, do modelo clássico de um i -ésimo gerador.

$$\frac{2H_i}{\omega_B} \dot{\omega}_i = T_{mi} - T_{ei} \quad (5.1)$$

Sendo:

- ω_i = velocidade angular do gerador i em rad/s;
- H_i = constante de inércia do gerador i em s;
- ω_B = velocidade angular síncrona em rad/s;
- $T_{mi} - T_{ei}$ o torque de aceleração do gerador;
- T_{mi} o torque mecânico em pu;
- T_{ei} o torque elétrico em pu.

Em regime permanente esses torques permanecem em equilíbrio no conjunto turbina-rotor de cada gerador, de modo que todos os geradores operam com a mesma velocidade. Dessa forma, quando há uma perturbação no sistema esses torques sofrem um desequilíbrio, resultando na aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas. Para uma dada frequência de oscilação do rotor do gerador, existe uma variação do torque elétrico de mesma frequência e proporcional à amplitude da oscilação (Ayres, 2005).

Ao tentar controlar a excitação ou velocidade dos geradores, os modos de oscilação aparecem. Os modos eletromecânicos (MOE) são os modos mais críticos em virtude do baixo amortecimento natural do sistema, eles estão associados ao comportamento dinâmico dos rotores dos geradores e são responsáveis por oscilações que se situam na faixa de frequência entre 0,1Hz e 2,0 Hz. (Kundur, 1994).

5.2. Conceito de modo

Segundo Castro (2006), um sistema de n equações diferenciais lineares de primeira ordem possui n autovalores, λ_i , $i = 1, \dots, n$, e a solução do sistema tem a forma $y = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} + f(t)$, em que $f(t)$ depende da entrada. Cada uma das exponenciais, $e^{\lambda_i t}$ é denominada “modo” do sistema associado ao autovalor λ_i .

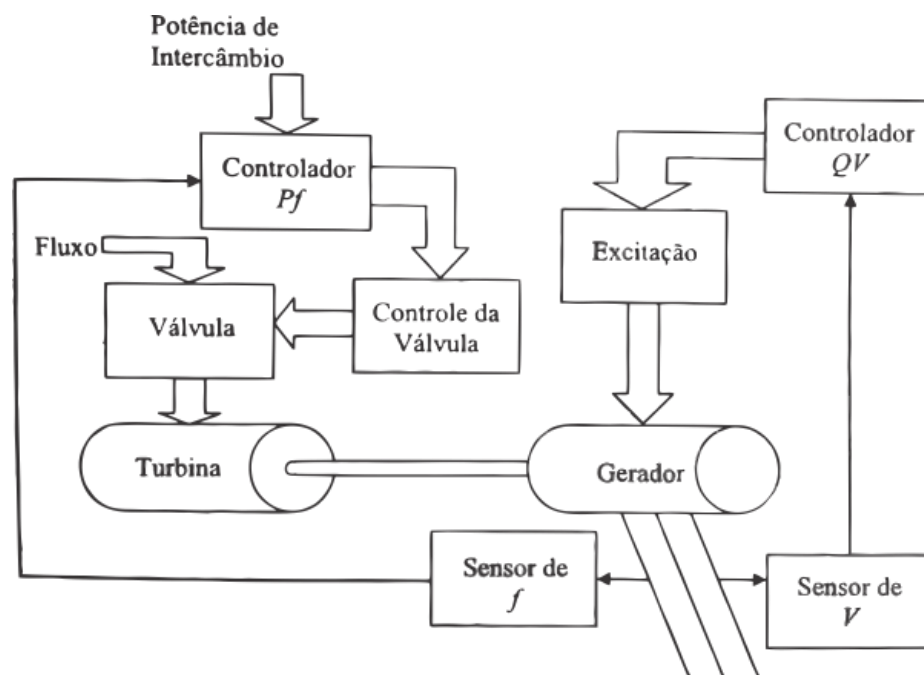
Para o caso de pares de autovalores complexos conjugados, na forma $\lambda_i = \alpha_i \pm j\omega_i$, os dois termos exponenciais associados a estes autovalores dão origem a um só termo, na forma $e^{\alpha_i t} \text{sen}(\omega_i t + \theta)$, que é denominado “modo oscilatório” associado ao autovalor $\lambda_i = \alpha_i \pm j\omega_i$ (Castro, 2006).

6. Modelo de sistema em carga frequência com três áreas

Os métodos de seleção MGR e DVS, utilizados neste trabalho, serão aplicados em um sistema em carga frequência com três áreas que será detalhado nesta seção. Esta seção é baseada no modelo descrito por (Silva Filha, 2012).

Em um sistema de geração o controle automático ocorre, de uma forma geral, por meio de dois canais, o canal de Carga-Frequência, ou malha de controle PF e o canal de Potência Reativa/Tensão, ou malha de controle QV. A função do controlador PF é manter a potência gerada igual à demanda de potência elétrica, manter a frequência constante e igual a frequência padrão e manter também as potências de intercâmbio constantes e iguais aquelas programadas (Mota, 2006). Já o controle QV tem como objetivo manter constante a tensão terminal do gerador. Os canais QV e PF possuem uma certa interação, dessa forma, havendo uma perturbação dinâmica na malha de controle de excitação, o balanço de potência ativa e a frequência do sistema serão afetados. A Figura 6.1 representa as malhas de controle automático de geração:

Figura 6.1 - Malha de Controle Automático de Geração.



Fonte: (Mota, 2006)

A malha de controle PF possui grandes constantes de inércia mecânica e, por isso, a malha de controle de excitação é muito mais rápida que a malha de controle PF, devido a este fato é possível desacoplar as malhas de controle PF e QV, o que resulta em uma grande simplificação no estudo da malha de controle.

6.1. Conceito de área

Os sistemas elétricos de potência geralmente são grandes e complexos com unidades separadas por centenas de quilômetros e divididos em diversas áreas. Chama-se de área de controle a parte de um sistema de potência interligado, responsável por absorver as suas próprias variações de carga (Cohn, 1961). O controle PF, em contraste com o controle QV, é feito coletivamente, agindo em todas as unidades de controle geradoras numa área de controle (Elgerd, 1976).

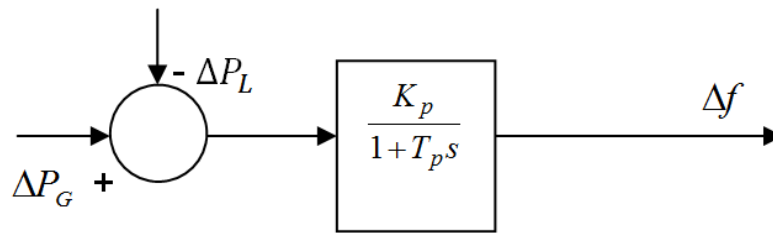
As fronteiras de uma área de controle não são definidas de forma rígida, elas geralmente coincidem com as fronteiras elétricas pertencentes a uma concessionária, ou a um sistema que possuam uma boa capacidade de geração e alimente uma carga significativa.

Espera-se que as áreas de controle sejam balanceadas em termos de carga-geração, que as linhas de interligação entre áreas trabalhem com folgas suficientes para garantir intercâmbios de auxílio, emergência e etc, e que as unidades geradoras sejam suficientemente coerentes, do ponto de vista dinâmico. Quando as máquinas de uma área são suficientemente coerentes, o modelo de uma unidade geradora suprindo uma carga pode ser usado para representar uma área (Silva Filha, 2012). É o que será discutido a seguir.

6.2. Modelo dos sistemas de regulação de velocidade das unidades de geração

O diagrama de blocos da Figura 6.2 representa a equação de oscilação da unidade geradora 6.1.

Figura 6.2 - Diagrama de blocos de um modelo dinâmico simplificado de um sistema de potência.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

Considerando $K_p = 1/2\pi D$ e $T_p = 2H/\omega_B D$. Onde as variáveis incrementais ΔP_L , Δf e ΔP_G são a variação da potência em pu requerida pela carga elétrica, a variação de frequência em Hz e a variação de potência da turbina em pu, respectivamente.

No modelo clássico, uma unidade geradora pode ser representada apenas por sua equação de oscilação que, de forma incremental e incluindo o amortecimento do sistema, é a seguinte (Anderson e Fouad, 1977):

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \frac{2H_i}{\omega_B} \dot{\omega}_i &= T_{mi} - T_{ei} - D_i \omega_i \\ T_{ei} &= E_i I_{qi} \end{aligned} \quad (6.1)$$

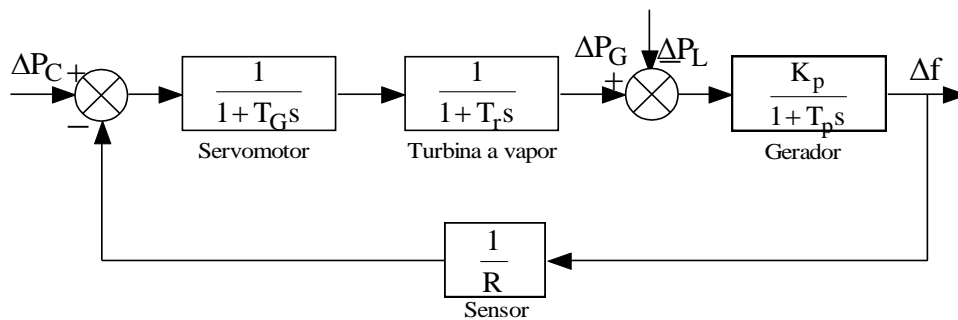
Em que:

- δ_i = ângulo de torque do gerador i em rad;
- ω_i = velocidade angular do gerador i em rad/s;
- H_i = constante de inércia do gerador i em s;
- $T_{mi} - T_{ei}$ = torque de aceleração do gerador, onde T_{mi} é o torque mecânico em pu e T_{ei} é o torque elétrico em pu;
- D_i = fator de amortecimento do gerador i em pu/Hz;
- $E_i \angle \delta_i$ = tensão interna do gerador i em pu;
- I_{qi} = componente da corrente no eixo de quadratura do gerador i em pu;

- ω_B = velocidade angular síncrona em rad/s.

O diagrama de blocos da figura 6.3 é utilizado para representar a ação do variador de velocidade. A constante R do sensor é denominada “regulação em estado de equilíbrio” em Hz/pu, $\Delta f/R$ é uma potência, P_C é a potência de referência e ΔP_C é a variação de potência de controle em pu.

Figura 6.3 - Diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidade de uma turbina térmica.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

Nas turbinas a vapor, o servomotor do regulador de velocidade desloca diretamente a haste da válvula de entrada de vapor. A válvula tem dupla entrada de vapor para diminuir a força necessária para sua abertura. Nesse modelo, a turbina é do tipo sem ressuperaquecimento (Mota, 2006), (Castro, 1988).

6.3. Obtenção do modelo de uma área

Nesta seção será estudado o caso de um sistema com uma única área de controle, que é o caso mais simples, para que se compreenda a dinâmica dos sistemas de controle PF. Para tanto, será desenvolvido um modelo dinâmico para descrever uma área de controle i , ligada a outras áreas por meio de linhas de transmissão, como mostrado na figura:

Figura 6.4 - Áreas de Controle



Fonte: (Autora)

Se, devido à ação dos controladores de turbina, esta área sofre uma variação na carga no valor de ΔP_{Li} MW, a potência gerada nesta área aumenta na taxa de ΔP_{Gi} MW. Logo, a área terá um excedente de carga no valor de $(\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li})$ MW.

Essa potência será absorvida pelo sistema com o aumento da energia cinética da área $W_{kin,j}$ na taxa $\frac{dW_{kin,i}}{dt}$, com o aumento da potência “exportada” por meio das linhas de ligação, num total de $\Delta P_{tie,i}$ MW, considerado positivo saindo da área, e com o aumento crescente do consumo da carga. Todas as cargas típicas sofrerão um aumento $D = \frac{\partial P_L}{\partial f}$ MW/Hz, com o quadrado da velocidade ou frequência, devido à predominância de cargas motoras. O “D” é conhecido como coeficiente de amortecimento ou característica de frequência da carga. (Elgerd, 1976).

Matematicamente,

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li} = \frac{d}{dt} W_{kin,i} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,t} \quad (6.2)$$

Do primeiro termo, ao lado direito da equação 6.2, a energia cinética da área, $W_{kin,j}$, varia com o quadrado da velocidade ou frequência, ou

$$W_{kin,i} = \left(\frac{f_i}{f_0}\right)^2 W_{kin,i}^0 \quad (6.3)$$

Em que $W_{kin,i}^0$ é a energia cinética da área, quando a frequência é a nominal.

A frequência instantânea da área de controle é dada por $f_i = f^0 + \Delta f_i$, onde f^0 é a frequência nominal. Se for considerado Δf_i pequeno, a equação 6.3 pode ser reescrita conforme a equação 6.4:

$$W_{kin,i} = \left(\frac{f^0 + \Delta f_i}{f^0}\right)^2 W_{kin,i}^0 \approx \left(1 + 2\frac{\Delta f_i}{f^0}\right) W_{kin,i}^0 \quad (6.4)$$

Assim, o primeiro termo após a igualdade na equação 6.2 pode ser definido como:

$$\frac{d}{dt} W_{kin,i} = \frac{2W_{kin,i}^0}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f_i \quad (6.5)$$

O segundo termo da equação 6.2 é obtido empiricamente, pois, para cargas compostas, o que consiste a maioria dos sistemas reais, pode-se observar na prática que a carga varia, dependendo da frequência e da velocidade (Silva Filha, 2012).

O terceiro termo da equação 6.2 é a potência incremental da linha de ligação, $\Delta P_{tie,j}$, exportada da área i, que é igual a soma das potências incrementais que saem dessa área e migram para as áreas vizinhas através das linhas de transmissão. Logo, considerando, por exemplo, as linhas que ligam a área i à área k, tem-se:

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_k \Delta P_{tie,ik}$$

O aumento incremental da potência transmitida é causado pelo pequeno incremento $\Delta\delta$, do ângulo de fase δ , entre V_i e V_K , e é uma medida do coeficiente de sincronização (Elgerd, 1976), que é dado por:

$$T_{ik} = \frac{\Delta \Delta P_{ik}}{\Delta\delta} \approx \frac{dP_{ik}}{d\delta} = P_{\max} \cos\delta \text{ MW/Rad} \quad (6.6)$$

Desprezando as perdas das linhas pode-se escrever as potências incrementais individuais em função do coeficiente de sincronização da seguinte forma:

$$\Delta P_{ie,ik} = T_{ik}^0 (\Delta \delta_i - \Delta \delta_k) \quad (6.7)$$

Onde $T_{ik}^0 = P_{\max} \cos(\delta_i^0 - \delta_k^0)$.

P_{\max} corresponde à capacidade de transmissão estática da linha em questão. Se essa capacidade for pequena, comparada à potência nominal da área i , então essa linha é fraca.

Sabendo que, pela teoria da análise dinâmica do sistema de potência, Δf_i pode ser expresso em ciclos por segundo, como mostrado:

$$\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta \delta_i$$

Então, a equação 6.7 pode ser reescrita em função da frequência incremental, Δf_i :

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

Somando todas as potências incrementais individuais obtém-se a potência incremental total da linha que sai da área i :

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

Se todos os termos da equação 6.2 forem divididos pela potência nominal total, P_{ri} , e considerando a equação 6.5, tem-se:

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li} = \frac{2H_i}{f^0} \frac{d}{dt} (\Delta f_i) + D_i \Delta f_i + \Delta P_{ie,i} \quad (6.8)$$

Tornando as variáveis ΔP e D medidas em pu, em relação a P_{ri} . Sendo H_i a constante de inércia por unidade, que é dada por:

$$H_i = \frac{\Delta W_{kin,i}^0}{P_{ri}}$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação 6.8, obtém-se o seguinte:

$$\Delta F_i(s) = [\Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Li}(s) - \Delta P_{tie,i}(s)]G_{pi}(s) \quad (6.9)$$

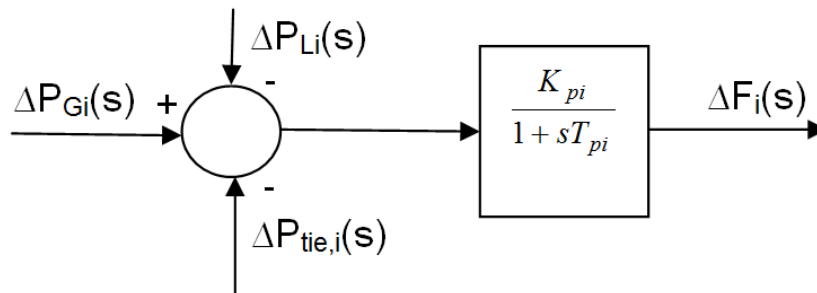
6.3.1. Representação da área de controle por diagrama de blocos

A equação 6.9 pode ser representada em diagramas de blocos e para simplificar tal representação, dois parâmetros serão introduzidos:

$$T_{pi} \triangleq \frac{2H_i}{f^0 D_i} \text{ e } K_{pi} \triangleq \frac{1}{D_i}$$

Então, obtém-se o seguinte diagrama de blocos:

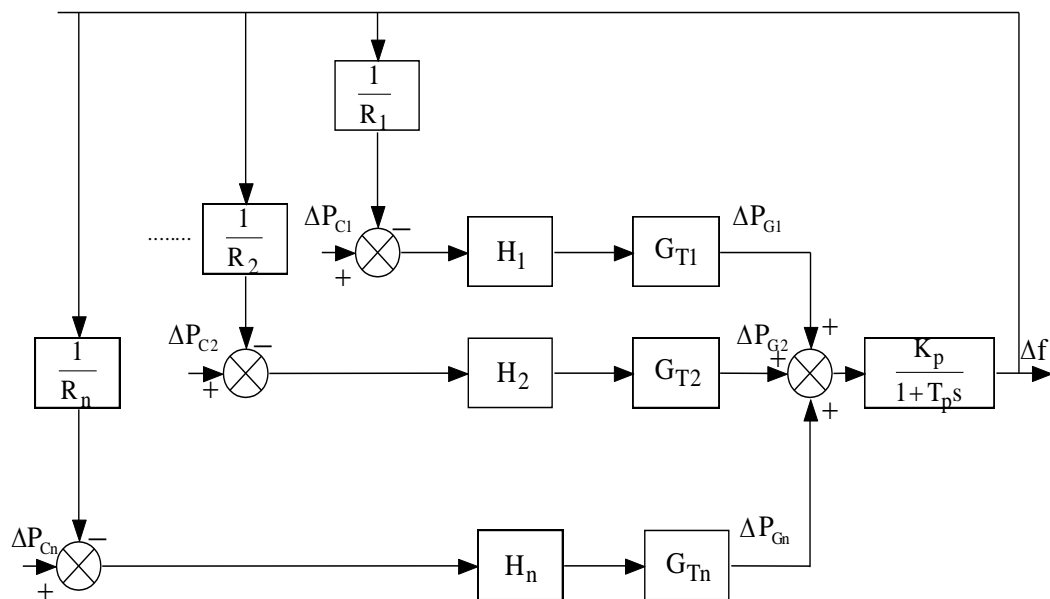
Figura 6.5 - Diagrama de blocos relativo à equação 6.9.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

Considerando uma área com n turbogeradores com funções de transferência H_1, H_2, \dots, H_n , para os reguladores de velocidade das turbinas, com R_1, R_2, \dots, R_n regulações e $G_{T1}, G_{T2}, \dots, G_{Tn}$ representando modelos de turbinas representados pelas funções de transferência, uma área de controle pode ser representada pelo diagrama abaixo:

Figura 6.6 - Diagrama de blocos representando uma área de controle.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

De acordo com esse diagrama, o desvio total da potência mecânica da área é:

$$\Delta P_G = -\left(\frac{H_1 G_{T1}}{R_1} + \frac{H_2 G_{T2}}{R_2} + \dots + \frac{H_n G_{Tn}}{R_n}\right) \Delta f$$

Considerando que as turbinas e os reguladores de velocidade tenham funções de transferências iguais e correspondem a $H_1 G_{T1} = H_2 G_{T2} = \dots = H_n G_{Tn} \equiv H G_T$, para esse caso, obtém-se o seguinte:

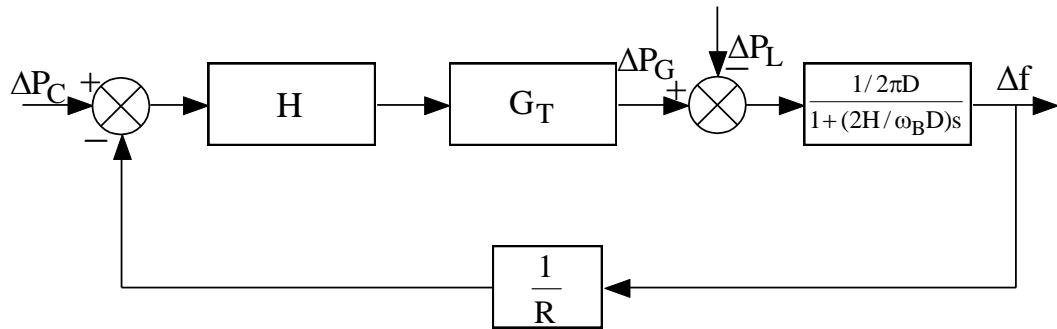
$$\Delta P_G = -\frac{H G_T}{R} \Delta f$$

A regulação equivalente da área será da seguinte forma:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Simplificando o modelo apresentado na Figura 6.3, obtém-se o seguinte diagrama similar ao modelo de uma unidade geradora:

Figura 6.7 - Modelo de área após redução dos blocos.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

Para o caso em que as turbinas e os reguladores de velocidade não são similares, deve-se obter um equivalente dinâmico para HG_T , de modo a representar o conjunto de turbinas e reguladores de velocidade da área (Castro, 2006).

6.4. Modelo de sistema com as áreas interligadas

Pode-se concluir a partir do modelo apresentado no item anterior que, como era esperado, uma área se comporta aproximadamente como uma unidade geradora. Conclui-se então que para representar-se duas áreas ou mais, interligadas, pode-se usar o mesmo raciocínio utilizado para o caso de dois ou mais geradores síncronos, operando em paralelo e interligados através de uma reatância mútua (Silva Filha, 2012).

No caso de duas áreas, por exemplo, a troca de potência elétrica entre os geradores é dada pela equação 6.10:

$$P_{ie} = \frac{E_1 E_2}{x_{12}} \text{sen } \delta_{12} \quad (6.10)$$

Em que

x_{12} = Reatância equivalente entre os geradores 1 e 2.

$e_1 = E_1 \angle \delta_1$ = tensão terminal do Gerador 1;

$e_2 = E_2 \angle \delta_2$ = tensão terminal do Gerador 2;

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

Para pequenas perturbações, pode-se adotar o modelo linearizado da equação 6.10, que é dado pela equação 6.11, abaixo:

$$\Delta P_{ie} = T_{12}^0 \Delta \delta_{12} \quad (6.11)$$

Em que

ΔP_{ie} = desvio de potência de intercâmbio em pu;

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

$T_{12}^0 = \frac{E_1 E_2}{x_{12}} \cos \delta_{12}^0$ = coeficiente de torque sincronizante em pu.

Sabendo que $\Delta\omega = 2\pi\Delta f = \frac{d\Delta\delta}{dt}$. Logo, $\Delta\delta = 2\pi \int_0^t \Delta f dt$

Por Transformada de Laplace, tem-se $\Delta\delta = 2\pi \frac{\Delta f}{s}$.

Logo, pode-se reescrever a equação 6.11 como:

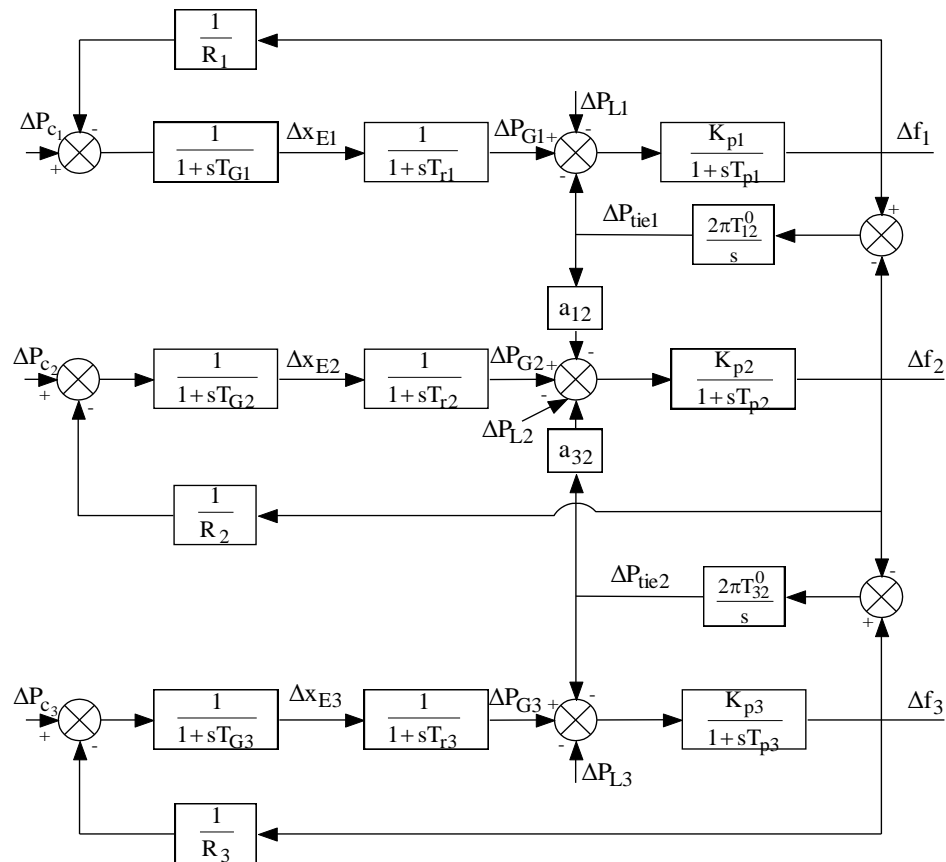
$$\Delta P_{ie_1} = \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2)$$

Estendendo este modelo para o caso de três áreas, acrescenta-se a equação de intercâmbio de potência entre as áreas 2 e 3, que é dada por:

$$\Delta P_{ie_2} = \frac{2\pi T_{32}^0}{s} (\Delta f_3 - \Delta f_2)$$

O sistema é representado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Modelo completo do sistema de carga-frequência com três áreas interligadas.



Fonte: (Silva Filha, 2012)

No diagrama a_{ij} indicam a parcela da potência e o sentido da potência de intercâmbio (Elgerd, 1976). O sinal negativo indica que a área i fornece energia, enquanto os valores positivos indicam que esta área recebe energia. 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.

7. Aplicação da DVS e da MGR em um sistema de três áreas

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos a partir da utilização dos métodos de seleção MGR e SVD, aplicados a um sistema de potência de controle de carga-frequência de três áreas equivalentes interligadas, ilustrado nas figuras 6.4 e 6.8, cujos dados são mostrados a seguir.

Segundo o exemplo utilizado em Calvert e Titli (1989), os parâmetros do sistema são: $T_{p1} = T_{p2} = T_{p3} = 20s$; $K_{p1} = K_{p2} = K_{p3} = 240\text{Hz/pu MW}$; $R_1 = R_2 = R_3 = 2,4\text{Hz/pu MW}$; $T_{G1} = 0,08s$; $T_{r1} = 0,3s$; $T_{G2} = 0,2s$; $T_{r2} = 0,4s$; $T_{G3} = 0,3s$; $T_{r3} = 0,5s$; $T_{12}^0 = T_{32}^0 = 0,0866 \text{ pu MW}$; $a_{12} = a_{32} = -0,5$.

O modelo do sistema é representado por

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_t x + B_t u \\ y &= C_t x\end{aligned}$$

em que

$$x^T = [\Delta f_1 \Delta x_{E1} \Delta P_{G1} \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta x_{E3} \Delta P_{G3} \Delta P_{tie2} \Delta f_2 \Delta x_{E2} \Delta P_{G2}]$$

$$u^T = [\Delta P_{C1} \Delta P_{C3} \Delta P_{C2}]$$

$$y^T = [\Delta f_1 \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta P_{tie2} \Delta f_2]$$

em que x_{Ei} , f_i , P_{Gi} , P_{tiei} e P_{Ci} são, respectivamente, sinal de saída do regulador, frequência, potência da turbina, potência de intercâmbio do turbogerador equivalente a área i e a entrada de controle do regulador de velocidade da área i , em valores incrementais (Castro e Araújo, 2002).

O sistema em questão apresenta três pólos e três zeros que ocorrem exatamente na mesma frequência, ou seja, o sistema tem três modos de oscilação, sendo necessária a utilização de controladores nas três áreas para amortecer esses modos. Os autovalores associados a esses três modos são: $\lambda_1 = -0,1759 \pm j3,0010$; $\lambda_2 = -0,1199 \pm j4,0102$; $\lambda_3 = -0,1894 \pm j4,6410$.

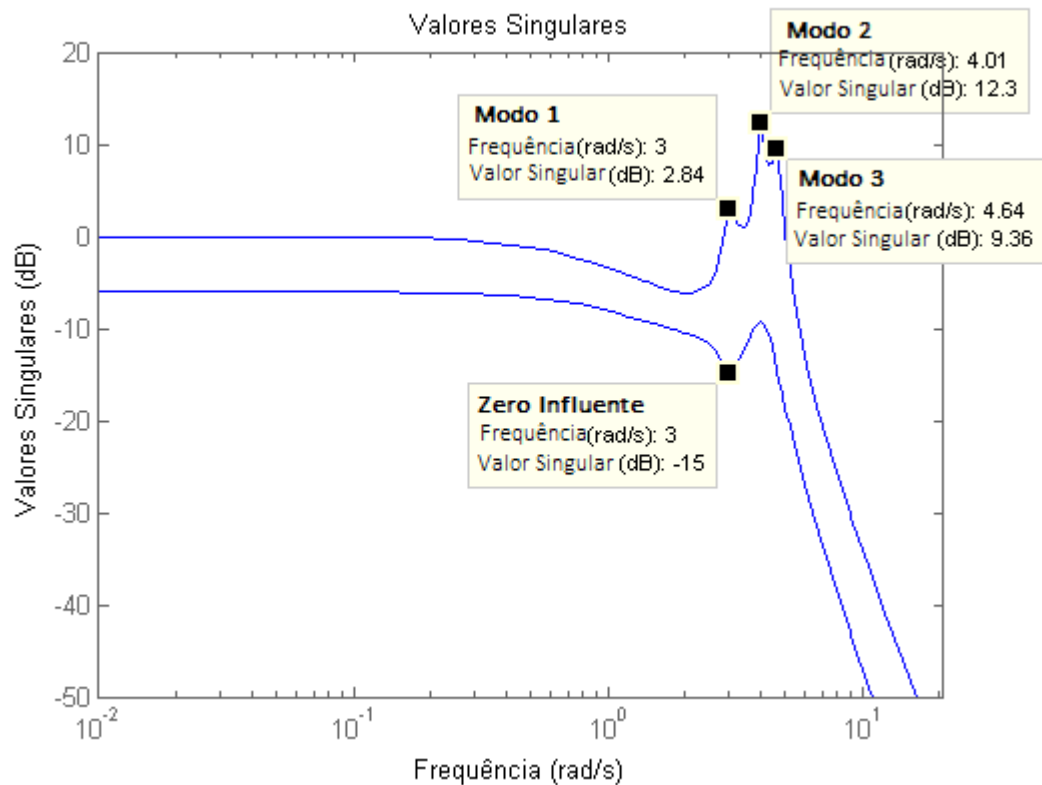
Utilizando do ambiente MATLAB[®] foi aplicada a MGR ao sistema em questão, no estado estacionário ($\Lambda(0)$).

$$\Lambda(0) = \begin{array}{ccc} \Delta P_{C1} & \Delta P_{C3} & \Delta P_{C2} \\ \left[\begin{array}{ccc} 0.0833 & 0.0833 & 0.1667 \\ 0.75 & 0 & 0.25 \\ 0.0833 & 0.0833 & 0.1667 \\ 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.0833 & 0.0833 & 0.1667 \end{array} \right] & \begin{array}{l} \Delta f1 \\ \Delta P_{tie1} \\ \Delta f3 \\ \Delta P_{tie2} \\ \Delta f2 \end{array} \end{array}$$

A partir da matriz $\Lambda(0)$ nota-se que, de acordo com as propriedades da MGR descritas na seção 4.2.1, as entradas mais efetivas são ΔP_{C1} e ΔP_{C3} e as saídas mais efetivas são ΔP_{tie1} e ΔP_{tie2} .

Observando a MGR nota-se que os pares cujos elementos são mais próximos de 1 são λ_{21} e λ_{42} , que correspondem aos pares $u_1 \rightarrow y_2$ e $u_2 \rightarrow y_4$, ou seja, a entrada $\Delta P_{C1} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie1} e $\Delta P_{C3} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie2} , resultando então nos pares IO: $\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1}$ e $\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2}$. A MGR nos diz que o sistema deve ser reduzido de forma que contenha somente as linhas e colunas que apresentam os maiores elementos da matriz MGR. Dessa forma, o sistema de equações é modificado de forma a apresentar tais características. Após a modificação do sistema pode-se aplicar a DVS na sua matriz de transferência. O gráfico dos valores singulares foi gerado conforme a Figura 7.1. O gráfico dos valores singulares pode apresentar várias curvas, porém aquelas que serão realmente importantes para a análise dos resultados são as curvas de valores singulares máximo e mínimo.

Figura 7.1 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$ e $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C3})$.



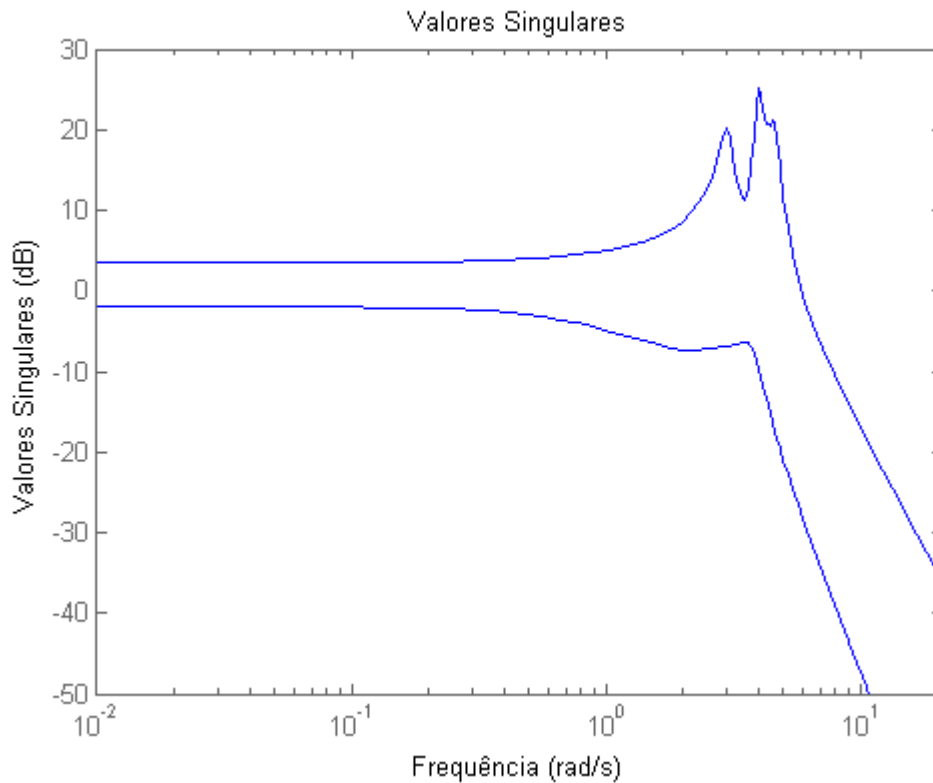
O que se notou foi que o gráfico dos valores singulares apresentou um pico no gráfico do máximo valor singular e um vale no gráfico do mínimo valor singular, ambos na mesma frequência, como mostrado na figura anterior. Isso indica, de acordo com as propriedades da DVS descritas na seção 4.1.1, que existe um zero influente $z = -0,1759 \pm j3,0010$ na mesma frequência do modo de oscilação, indicando que o sinal de entrada exerce influência sobre o sinal de saída e tornando o sistema não controlável. Logo, pode-se analisar a MGR novamente e acrescentar um novo par entrada-saída.

Analisando-se a matriz MGR nota-se que os elementos seguintes mais próximos a 1 são λ_{23} e λ_{43} , que correspondem aos pares $u_1 \rightarrow y_2, u_2 \rightarrow y_4, u_3 \rightarrow y_2$ e $u_3 \rightarrow y_4$, ou seja, a entrada $\Delta P_{C1} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie1} , a entrada $\Delta P_{C3} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie2} , a entrada $\Delta P_{C2} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie1} e a entrada $\Delta P_{C2} \rightarrow$ na saída ΔP_{tie2} , porém, após a utilização desses pares notou-se que estes não apresentam resultados satisfatórios.

Deve-se então procurar os próximos elementos da matriz que são mais próximos de 1 e seus respectivos pares IO. Melhorando os resultados pode-se considerar $\lambda_{13}, \lambda_{33}$ e λ_{53} , porém analisando caso a caso nota-se que considerando apenas λ_{53} os resultados são mais satisfatórios.

Logo, os pares resultantes são $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$, $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ e $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$, onde ΔP_{C1} , ΔP_{C2} , ΔP_{C3} representam, em valores incrementais, as entradas de controle do regulador de velocidade das áreas 1, 2 e 3, respectivamente, ΔP_{tie1} e ΔP_{tie2} são as potências de intercâmbio do turbogerador equivalente as áreas 1 e 2, respectivamente, em valores incrementais, e Δf_2 é a frequência da área 2 em valor incremental. Pode-se observar os resultados da DVS para os novos pares IO considerados, mostrado na figura 7.2.

Figura 7.2 - Valores singulares do sistema em dB versus ω em rad/s, para os pares $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$, $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ e $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$.



Nota-se que o pico e a depressão exatamente na mesma frequência, que ocorreu anteriormente, já não existe mais, o que demonstra uma melhor seleção dos pares de entrada e saída. Conclui-se então que a aplicação da MGR juntamente com a DVS retorna os pares de entrada e saída mais eficazes para o sistema considerado, ou seja, através da junção das características dos dois métodos, os resultados são melhorados significativamente.

A MGR encontrada para esse sistema foi como mostrada abaixo:

$$\Lambda(0) = \begin{bmatrix} 0.75 & -0 & 0.25 \\ -0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Pode-se notar que os elementos da diagonal principal da MGR possuem valores relativamente próximos a 1 e os demais elementos nulos ou muito próximos a 0 (zero), ou seja, a MGR é uma matriz próxima da matriz identidade. Essa característica da MGR é de grande importância por demonstrar o quão eficiente e confiável é a seleção dos pares de entrada e saída do sistema considerado. Porém, é importante destacar que a MGR obtida não é exatamente a matriz identidade, o que indica que os resultados ainda podem ser melhorados através de uma combinação de sinais, podendo ser aplicado em trabalhos futuros.

8. Conclusão

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou avaliar a aplicação dos métodos de seleção de sinais de entrada e saída MGR e DVS em um sistema de potência multivariável com três áreas de controle. A partir da análise dos resultados obtidos com a aplicação dos dois métodos de seleção, foram selecionados os pares de variáveis de entrada e saída que mais influenciam no sistema de potência em questão.

A aplicação da MGR mostrou que tal método pode falhar quando utilizado isoladamente, mas que, quando utilizado juntamente com DVS o seu desempenho é melhorado. A aplicação da MGR no sistema de três áreas resultou em um gráfico de valores singulares com características que representam instabilidade para o sistema, tornando-o mais difícil de ser controlado. Após sucessivas aplicações da MGR e da DVS conjuntamente observou-se que os pares IO mais eficientes foram $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$, $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ e $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$.

Futuros estudos nesta área devem ser realizados levando-se em consideração além do desempenho, a complexidade do sistema de controle e os custos. Para sistemas semelhantes ao utilizado neste trabalho as aplicações futuras podem utilizar sistemas mais complexos, considerando um número maior de áreas de controle, por exemplo.

Diante dos complexos sistemas de potência existentes na prática o presente trabalho mostra-se de grande relevância para a operação mais eficiente do sistema, fazendo-o apresentar menos perdas, menos instabilidade, seja mais facilmente controlado e como consequência apresente custos menores, visto que o número de atuadores e sensores utilizados no sistema dependem diretamente da seleção adequada dos pares IO. Neste contexto, a seleção adequada de sinais de entrada e saída dos sistemas de potência é de grande relevância.

9. Referências

- AL-SULAIMAN; ZAMAN, S. **Actuator placement in lumped parameter systems subjected to disturbance**. Computers & Structures, p. 41-47, 1994.
- ANDERSON, P.M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. Iowa State Univ. Press, Ames, 1977.
- ANJOS, D. A. **Projeto de malhas de controle utilizando as técnicas SVD e RGA**. Trabalho de conclusão de curso. UFCG, Campina Grande, 2014.
- 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, 2005.
- BISS, D.; PERKINS, J. D. **Application of input-output controllability analysis to chemical processes**. Proceedings of European Control Conference, vol. 2 (pp. 1056-1059), 1993.
- BRISTOL, E. H. **On a new measure of interaction for multivariable process control**. IEEE Transactions on Automatic Control, p. 133-134, 1966.
- CALVERT, J. L., TITLI, A. **Overlapping vs Partitioning in Bloc-Iteration Methods: Application in Large-Scale Theory**. Automatica, p. 137-145, 1989.
- CAO, Y. **Control structure selection for chemical processes using input-output controllability analysis**. Ph.D. thesis, University of Exeter, UK, 1995.
- CAO, Y.; BISS, D. **New screening techniques for choosing manipulated variables**. Proceedings of IFAC World Congress. vol. M (pp. 103-108), 1996.
- CAO, Y.; BISS, D.; PERKINS, J. D. **Assessment of input-output controllability in the presence of control constraints**. Computers & Chemical Engineering, p. 337-346, 1996.
- 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, 2006.
- 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, J.C. “**Controle de Geração e Intercâmbio**”. Apostila do CEOPE/88, DEE-UFPB, Campina Grande, 1988.
- CHANG, J.-W.; YU, C.-C. **The relative gain for nonsquare multivariable systems**. Chemical Engineering Science, p. 1309-1323, 1990.
- CHEN, J.; FREUDENBERG, J. S.; NETT, C. N. **The role of the condition number and the relative gain array in robustness analysis**. Automatica, p. 1029-1035, 1994.
- COHN, N. “**Control of Interconnected Power System**”. In: Ramo, S., Wooldrige, D.E. (eds), Handbook of Automation Computation and Control, chapter 17, John Wiley, 1961.
- CORRÊA, R. G. **Notas de Aula: Matriz do Ganho Relativo (RGA)**. São Carlos, 2005.
- CRUZ, J.J. **Controle Robusto Multivariável**. Editora Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.
- DAOUTIDIS, P.; KRAVARIS, C. **Structural evaluation of control configurations for multivariable nonlinear processes**. Chemical Engineering Science, p. 1091-1107, 1992.
- DE JAGER, B.; TOKER, O. **Complexity of input output selection**. In A. Beghi, L. Finesso, & G. Picci (Eds.), Proceedings of International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Il Polygrafo, Padova (pp. 597-600), Padova: Polygrafo, 1998.
- ELGERD, O.I. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. McGraw-Hill do Brasil, 1ª ed., São Paulo, 1976.
- FLESCHE, R. C. C. **Projeto de malhas de controle utilizando as técnicas SVD e RGA**. Florianópolis, 2012.
- GOVIND, R.; POWERS, G. J. **Control system synthesis strategies**. A.I.Ch.E Journal, p. 60-73, 1982.
- HASSIBI, A.; HOW, J. P.; BOYD, S. P. **Low-authority controller design via convex optimization**. Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, vol. 1 (pp. 140-145), 1998.
- HOVD, M.; SKOGESTAD, S. **Procedure for regulatory control structure selection with application to the FCC process**. A.I.Ch.E. Journal, p. 1938-1953, 1993.
- 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, 2004.

- LIU, T.; GAO, F. **Industrial Process Identification and Control Design**. [S.l.]: Springer, 2012.
- LIN, X.; NEWELL, R. B.; DOUGLAS, P. L.; MALLICK, S. K. **Application of output structural controllability to a thermally integrated distillation sequence**. International Journal of Systems Science, p. 1437-1459, 1994.
- LIN, X.; TADE, M. O.; NEWELL, R. B. **Output structural controllability condition for the synthesis of control systems for chemical processes**. International Journal of Systems Science, p. 107-132, 1991.
- KELLER, J. P.; BONVIN, D. **Selection of inputs for the purpose of model reduction and controller design**. Proceedings of IFAC World Congress (pp. 209-214), 1987.
- KUMAR, S.; SEINFELD, J. H. **Optimal location of measurements in tubular reactors**. Chemical Engineering Science, p. 1507-1516, 1978.
- KUNDUR, P. **Power System Control and Stability**. Editora McGraw-Hill, 1994.
- MOORE, C.; HACKNEY, J.; CARTER, D. **Selecting sensor location and type for multivariable processes**. Proceedings of Shell Process Control Workshop (pp. 291-308), 1987.
- MORARI, M. **Design of resilient processing plants - III: A general framework for the assessment of dynamic resilience**. Chemical Engineering Science, p. 1881-1891, 1983.
- MORARI, M.; STEPHANOPOULOS, G. **Studies in the synthesis of control structures for chemical processes - Part II: Structural aspects and the synthesis of alternative feasible control schemes**. A.I.Ch.E. Journal, p. 232-246, 1980a.
- MORARI, M.; STEPHANOPOULOS, G. **Studies in the synthesis of control structures for chemical processes - Part III: Optimal selection of secondary measurements within the framework of state estimation in the presence of persistent unknown disturbances**. A.I.Ch.E. Journal, p. 247-260, 1980b.
- MOTA, W. S. **Simulação de transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência**. Ed. EPGRAF. Campina Grande, 2006.
- NORRIS, G. A.; SKELTON, R. E. **Selection of dynamic sensors and actuators in the control of linear systems**. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, p. 389-397, 1989.
- QUIRINO, P. P. D. S. **Estratégias de Controle Aplicadas a Reatores de Polimerização de Eteno em Solução**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2012.

RANGEL, F. B. **Avaliação do Desempenho de Configurações de Controle Dual em Colunas de Destilação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

REEVES, D. E. **A comprehensive approach to control configuration design for complex systems**. Ph.D. thesis. Georgia Institute of Technology, 1991.

RHODES, C.; MORARI, M. **Determining the model order of nonlinear input/output systems directly from data**. Proceedings of American Control Conference, vol. 3 (pp. 2190-2194), 1995.

ROGERS, G. **Power System Oscillation**. 1 ed. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000.

SAMAR, R.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable controller design for a high performance aero-engine**. Proceedings of International Conference on CONTROL, vol. 2 (pp. 1312-1317), 1994.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

SHINSKEY, F. G. **Sistemas de Control de Procesos: Aplicación, diseño, y sintonización**. [S.l.]: McGRAW-HILL, v. 1, 1996.

SILVA FILHA, B. G. **Projeto de controladores robustos para amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema de carga-frequência**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2012.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: Analysis and design**. Chichester, UK: Wiley, 1996.

SKOGESTAD S., POSTLETHWAITE, I. **Multivariable Feedback Control Analysis and Design**. John Wiley & Sons, 2005.

TZOUANAS, V. K.; LUYBEN, W. L.; GEORGAKIS, C.; UNGAR, L. H. **Expert multivariable control. 1. Structure and design methodology**. Industrial and Engineering Chemistry Research, p. 382-389, 1990.

VAN DE WAL, M.; DE JAGER, B. **Selection of sensors and actuators for an active suspension control problem**. Proceedings of IEEE International Conference Control Applications (pp. 55-60), 1996.

- VAN DE WAL, M. **Selection of inputs and outputs for control.** Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, 1998.
- VAN DE WAL, M.; DE JAGER, B. **A review of methods for input/output selection.** *Automatica*, p. 487-510, 2001.
- VAN DE WAL, M.; DE JAGER, B. **Selection of sensors and actuators based on a sufficient condition for robust performance.** Proceedings of European Control Conference, 1997.
- VAN DER SCHAFT, A. J. **\mathcal{L}_2 - gain and passivity techniques in nonlinear control.** Heidelberg: Springer, 1996.
- WOLFF, E. A.; SKOGESTAD, S.; HOVD, M.; MATHISEN, K. W. **A procedure for controllability analysis.** In: J.D. Perkins (Ed.), Preprints IFAC workshop interactions between process design and process control (pp. 127-132). Oxford: Pergamon Press, 1992.
- XU, K.; WARNITCHAI, P.; IGUSA, T. **Optimal placement and gains of sensors and actuators for feedback control.** *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, p. 929-934, 1994.
- ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K. **Robust and optimal control.** Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.

10. Apêndices

10.1. Matrizes do sistema

$$A = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 12 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2083 & -12.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.3333 & -3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5441 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5441 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.05 & 0 & 12 & -12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.3889 & -3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5441 & 0 & 0 & 0 & -0.5441 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & -0.5 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.0833 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.5 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 12.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$