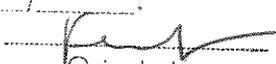


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO

**Análise e Projeto de Sistemas de Controle Fuzzy:
Uma Abordagem no Domínio da Frequência**

Autor: **Carlos Alberto Murari Pinheiro**
Orientador: **Fernando A. C. Gomide**

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Carlos Alberto Murari Pinheiro e aprovada pela Comissão Julgada em / / .


Orientador

Curso: Engenharia Elétrica
Área de Concentração: Automação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas, 22/02/2000
S.P. - Brasil



1ª CHAMADA:
T/UNICAMP
P655a
CAMS: 41512
REC: 278/00
C: D:
PREÇO R\$ 11,00
DATA 12-02-00
1ª CPD

CM-00143089-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P655a Pinheiro, Carlos Alberto Murari
Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: uma
abordagem no domínio da freqüência / Carlos Alberto
Murari Pinheiro.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Fernando A. C. Gomide.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Sistemas difusos. 2. Sistemas de comando e
controle. 3. Estabilidade. 4. Teoria do controle. 5.
Controladores PID. 6. Sistemas especialistas
(Computação). I. Gomide, Fernando A. C. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO

TESE DE DOUTORADO

**Análise e Projeto de Sistemas de Controle Fuzzy:
Uma Abordagem no Domínio da Frequência**

Autor: Carlos Alberto Murari Pinheiro
Orientador: Fernando Antonio Campos Gomide

Prof. Dr. Fernando Antonio Campos Gomide , Presidente
Instituição: Universidade Estadual de Campinas, FEEC, DCA

Prof. Dr. Márcio Luiz de Andrade Netto
Instituição: Universidade Estadual de Campinas, FEEC, DCA

Prof. Dr. Ricardo Gudwin
Instituição: Universidade Estadual de Campinas, FEEC, DCA

Prof. Dr. Ricardo Tanscheit
Instituição: Pontifícia Universidade Católica, PUC – RJ, DEE

Prof. Dr. Pedro Aladar Tonelli
Instituição: Universidade de São Paulo, USP – SP , IME

Dedicatórias:

Aos meus queridos pais Vicente e Lourdes cujos esforços possibilitaram a minha educação.

A minha dedicada esposa Neuza pela compreensão no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amados filhos Daniel e Raquel pelas diversas horas de minha ausência.

Agradecimentos

Ao meu orientador, por sua eficiente orientação, pelo tempo dedicado, confiança, e amizade.

Aos colegas e professores da Universidade Estadual de Campinas, da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, e aos amigos destas duas cidades que ajudaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste trabalho.

À FUNCAMP através do Prof. Fernando Gomide, pelo suporte financeiro na apresentação do artigo “Neural control of nonlinear systems by frequency response”, IJCNN Conference, Washington DC, 1999.

À CAPES-PICDT pela bolsa de doutorado.

Resumo

Neste trabalho desenvolvem-se métodos para analisar e projetar sistemas de controle fuzzy clássicos através de técnicas do domínio da frequência. Primeiramente, introduz-se um procedimento simples e intuitivo para obter resposta em frequência de sistemas de controle fuzzy a partir do conceito de funções descritivas. Este procedimento permite investigar as influências dos principais parâmetros dos controladores fuzzy nas respostas dinâmicas do sistema em malha fechada. Foram propostas duas abordagens para analisar e sintonizar sistemas de controle fuzzy através de métodos do domínio da frequência. A primeira visa sistemas não lineares invariantes no tempo. A segunda, mais genérica, objetiva sistemas não lineares com variações limitadas de parâmetros. Os resultados obtidos se mostram promissores pois proporcionam soluções semelhantes ou melhores do que aquelas fornecidas por métodos alternativos disponíveis na literatura. As técnicas propostas são fáceis de serem utilizadas e práticas, proporcionando assim uma forma sistemática de análise e projeto de sistemas de controle fuzzy. Estas técnicas são particularmente eficientes na sintonia de controladores e análise de robustez.

Palavras Chave

Sistemas de controle fuzzy, controladores fuzzy, sistemas não lineares de controle, resposta em frequência, funções descritivas, análise de estabilidade, sintonia de controladores não lineares, robustez.

Índice

1 Introdução geral	1
2 Estruturas e métodos de modelagem e controle fuzzy de processos	3
2.1 Introdução	3
2.2 Métodos de modelagem fuzzy de processos	4
2.2.1 Métodos e modelos baseados em regras	5
2.2.2 Métodos e modelos relacionais	8
2.2.3 Outros	11
2.3 Métodos de controle fuzzy de processos	12
2.3.1 Sistemas de controle fuzzy convencionais	13
2.3.2 Sistemas de controle fuzzy adaptativos e preditivos	18
2.3.3 Outros	21
2.4 Controladores fuzzy convencionais	23
2.4.1 Estruturas dos controladores fuzzy convencionais	23
2.4.2 Efeitos não lineares e analogias com compensadores clássicos	25
2.4.3 Sintonia de sistemas de controle fuzzy	27
2.5 Resumo	27
3 Análise de controladores fuzzy convencionais	29
3.1 Introdução	29
3.2 Relações entre entrada e saída de controladores fuzzy convencionais	30
3.3 Características não lineares de controladores fuzzy	34
3.4 Resumo	38
4 Análise de sistemas de controle fuzzy no domínio da frequência	39
4.1 Introdução	39
4.2 Procedimento para obter a resposta em frequência de sistemas não lineares	40
4.2.2 Aplicação em sistema não linear	43
4.2.3 Justificativas teóricas na aplicação do procedimento em controladores fuzzy	44
4.3 Análise de controladores fuzzy no domínio da frequência	47
4.4 Análise de estabilidade de sistemas de controle fuzzy	54

4.5 Características dinâmicas de sistemas de controle fuzzy e princípios de sintonia	56
4.6 Resumo	62
5 Projeto de controladores fuzzy em processos não lineares determinísticos	64
5.1 Introdução	64
5.2 Controladores com ganhos não lineares	64
5.3 Método de projeto de controladores fuzzy em processos não lineares determinísticos	66
5.3.1 Obtenção de ganhos equivalentes via resposta em frequência	67
5.3.2 Técnica de treinamento para funções de pertinência e regras fuzzy	68
5.3.3 Etapas de projeto	69
5.3.4 Exemplo e comparações	70
5.4 Resumo	73
6 Projeto de sistemas de controle fuzzy para processos com incertezas	74
6.1 Introdução	74
6.2 Técnicas do domínio da frequência para sistemas de controle robusto	74
6.3 Método de projeto de controladores fuzzy para processos com incertezas	76
6.3.1 Justificativas teóricas	77
6.3.2 Estágios de projeto e sintonia	80
6.3.3 Exemplos	82
6.4 Resumo	99
7 Análise e sintonia de controladores fuzzy para sistemas MIMO	100
7.1 Introdução	100
7.2 Procedimento para análise e sintonia de controladores fuzzy em sistemas MIMO	101
7.3 Exemplos	101
7.4 Resumo	112
8 Conclusão geral	113
Referências Bibliográficas	114
Apêndice	131

Capítulo 1

Introdução geral

Projeto, análise e sintonia de controladores fuzzy sempre foram questões essenciais desde as primeiras aplicações da teoria dos conjuntos fuzzy em sistemas de controle. Devido à variedade de funções de pertinência, métodos de inferência, técnicas de defuzificação, entre outras, os controladores fuzzy não são modelados facilmente através de equações diferenciais ou a diferenças. Isto dificulta a eventual aplicação de métodos da teoria de controle clássica em questões de análise e sintonia de sistemas de controle fuzzy. Geralmente em sistemas fuzzy, essas questões são abordadas através de tentativa e erro, simulações em computadores, ou usando métodos formais (muitas vezes de maneira aproximada) de áreas diversas da matemática e da engenharia de controle [Driankov et al. (1996)]. Métodos do domínio da frequência fornecem ferramentas poderosas para analisar e projetar sistemas de controles diversos, permitindo tratar de forma eficiente problemas de estabilidade, sintonia, e robustez. No entanto, muito pouco foi desenvolvido neste contexto, principalmente no que concerne a sistemas de controle fuzzy.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver abordagens que possibilitem a adaptação e aplicação sistemática de métodos do domínio da frequência na análise, projeto e sintonia de sistemas de controle fuzzy. Estas abordagens visarão os controladores fuzzy convencionais, que são os mais comuns e frequentemente usados. A tese propõe investigar a influência que determinados fatores dos controladores fuzzy apresentam em malhas de controle. Desenvolveu-se uma técnica que permite obter respostas em frequência de sistemas de controle fuzzy de uma maneira simples. Objetivou-se obter métodos para projetar e sintonizar sistemas de controle fuzzy da forma mais sistemática e direta possível. Um destes métodos está direcionado a sistemas não lineares determinísticos (com parâmetros invariantes, e com características não lineares definidas). O outro, se propõe a cobrir processos com variações em seus parâmetros. A faixa de variação dos parâmetros e a ordem de grandeza das características não lineares são assumidas como conhecidas. Essas propostas se baseiam em considerações teóricas que as justificam.

Este texto está organizado conforme descrito a seguir. O capítulo 2 traz uma visão geral dos métodos formais utilizados em modelagem e controle fuzzy. No capítulo 3 são deduzidas algumas expressões analíticas com o objetivo de investigar similaridades e diferenças entre controladores fuzzy convencionais e compensadores lineares clássicos. No capítulo 4 é proposta uma técnica simples para obter a resposta em frequência de sistemas de controle fuzzy. A seguir são pesquisados os aspectos relevantes da estrutura dos controladores fuzzy que mais influenciam nas suas respostas dinâmicas. No capítulo 5 é desenvolvida uma abordagem de projeto de controladores fuzzy para processos não lineares determinísticos. No capítulo 6 é proposto um método para análise e sintonia de sistemas de controle fuzzy para processos genéricos (lineares, não lineares, com variações em parâmetros, etc.). No capítulo 7 é proposta uma abordagem para usar a metodologia desenvolvida para projeto de controladores fuzzy, aplicada a sistemas de controle com múltiplas entradas e múltiplas saídas. Alguns exemplos ilustrarão os métodos propostos, e os resultados obtidos serão comparados com técnicas alternativas propostas na literatura. Um dos exemplos será uma implementação em laboratório de um controlador fuzzy para sistemas de tração elétrica. Finalmente no capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estruturas e métodos de modelagem e controle fuzzy de processos

2.1 Introdução

O propósito deste capítulo é apresentar uma visão geral dos métodos formais utilizados para modelagem e controle fuzzy. O significado de “formal”, neste trabalho, é colocado em contraposição a procedimentos puramente heurísticos ou baseados em tentativas e erros. Portanto, ele se refere a qualquer metodologia e técnica formalmente desenvolvida que possa ser aplicada a sistemas fuzzy, sejam elas provenientes diretamente da teoria dos conjuntos fuzzy, ou de outras áreas como identificação de sistemas, otimização, teoria de sistemas de controle, redes neurais, algoritmos genéticos, etc.

Desde sua formulação inicial por Zadeh (1965), a teoria dos conjuntos fuzzy tem sido aplicada em muitas áreas, principalmente em engenharia. Zadeh (1972, 1973) antecipou a aplicabilidade da teoria de conjuntos fuzzy em modelagem e controle de sistemas. Mamdani e Assilian (1974, 1975) implementaram de forma pioneira controladores fuzzy para uma caldeira a vapor, na qual compensadores convencionais apresentavam dificuldades de sintonia devido a características não lineares da planta. Tong (1978) usou pioneiramente conceitos de conjuntos fuzzy na modelagem de alguns sistemas físicos. Estas aplicações destacaram o potencial da teoria dos conjuntos fuzzy no tratamento de procedimentos que tenham graus de incertezas nos seus valores, ou na agregação de informações lingüísticas nas soluções de vários tipos de problemas práticos.

Maiers e Sherif (1985) compilaram diversas referências bibliográficas sobre aplicações de conjuntos fuzzy em diferentes campos. Lee (1990) organizou várias referências na área de sistemas de controle fuzzy, juntamente com uma revisão básica sobre conjuntos fuzzy.

Um atributo importante no contexto da teoria de conjuntos fuzzy em modelagem e controle de sistemas complexos, é que classes de sistemas baseados em regras fuzzy são aproximadores universais, proporcionando uma grande capacidade de mapear relações entre entradas e saídas de sistemas em geral [Wang e Mendel (1992), Kosko (1994), Castro e Delgado (1996), Wang (1998)].

2.2 Métodos de modelagem fuzzy de processos

A representação de sistemas através de modelos é importante para diversas finalidades tais como: estudos de características dinâmicas, análise de estabilidade, estabelecimento de estratégias de controle, verificação de desempenho, e outras. Existem diferentes abordagens para se modelar e identificar sistemas físicos [Eykhoff (1974), Ljung (1987)]. Geralmente os modelos podem ser construídos matematicamente a partir de leis físicas, de dados provenientes de medições, etc.

Sistemas complexos (não lineares, variantes no tempo) nem sempre são bem representados através de modelos matemáticos determinísticos ou estocásticos clássicos. Modelos não lineares convencionais necessitam de razoável conhecimento dos sistemas físicos que representam para uma escolha apropriada de sua estrutura. O emprego de conjuntos fuzzy tem-se revelado bastante eficiente nestes casos, necessitando-se apenas de valores aproximados (ordem e atraso de transporte) para construir a estrutura do modelo.

A representação de sistemas fuzzy pode ser realizada de várias formas [Pedrycz (1996), Pedrycz e Gomide (1998)], podendo os modelos fuzzy ser classificados em:

- baseados em regras lingüísticas,
- baseados em regras funcionais,
- equações relacionais,
- representação tabular,
- gramáticas fuzzy,
- regressão fuzzy,

- redes neuro-fuzzy.

As três primeiras representações são muito freqüentes.

Técnicas de agrupamento (*clustering*) de dados constituem uma ferramenta poderosa para análise de dados, e tem se mostrado muito útil para modelagem [Hirota e Pedrycz (1996)]. Seu propósito é destacar grupos de dados de um conjunto maior, produzindo uma representação concisa dos dados que relacionam o comportamento do sistema modelado.

2.2.1 Métodos e modelos baseados em regras

Um dos atrativos dos sistemas fuzzy consiste da facilidade de incorporar informações ou conhecimentos qualitativos nos modelos que representam. Os sistemas baseados em regras são constituídos por um conjunto de sentenças do tipo:

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } X_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^i \text{ and } \dots x_k \text{ is } X_k^i \text{ then } y \text{ is } Y^i . \quad (1)$$

Onde x_m e y são variáveis associadas às entradas e às saídas do sistema e X_j^i e Y_n^i , termos lingüísticos cujos significados são dados por conjuntos fuzzy. Os conjuntos fuzzy são expressos por funções de pertinência, e associados a termos lingüísticos como pequeno, grande, negativo, positivo, zero, etc.

A obtenção das regras sempre foi uma questão relevante em modelagem fuzzy. Tong (1978) introduziu o conceito de investigação lógica para converter dados de entrada e saída de um conjunto de regras fuzzy, analisando valores de pertinência unitário nas variáveis do sistema. Como a freqüência destes valores diminui com o aumento do número de variáveis, este método precisa de uma grande quantidade de dados em sistemas de maiores dimensões. O procedimento pode apresentar regras conflitantes (saídas diferentes para uma mesma combinação de entradas), bem como podem inexistir regras (nenhuma saída é apontada para um arranjo de entradas), podendo então fornecer modelos incompletos. Graham e Newell (1989) propuseram um modo mais geral para o método de Tong com uma ponderação das regras conflitantes apoiado no

conceito de conjuntos fuzzy de referência [Pedrycz (1984_b)]. Kiszka et al. (1985) mostraram a influência de operadores de implicação fuzzy na precisão de modelos fuzzy. Sugeno e Yasukawa (1993) usaram técnicas de agrupamento para identificar a estrutura de modelos fuzzy. Wang (1994) analisou questões de estabilidade e convergência na identificação de sistemas fuzzy. Bastian (1995) apresentou um pequeno histórico sobre modelos fuzzy, e tentou formular uma teoria unificada de identificação de sistemas fuzzy. Arnould (1995) apresentou duas aproximações para obtenção de regras, uma baseada na soma disjuntiva de produtos cartesianos dos pares de valores de entradas e saídas, e outra onde os conjuntos fuzzy e dados são expressos usando distribuições de possibilidades. Wang (1995) analisou questões de estabilidade global na identificação fuzzy de sistemas dinâmicos não lineares. Babuska e Verbruggen (1995) mostraram como derivar modelos fuzzy lingüísticos a partir de uma identificação aproximada de sistemas físicos. Cao e Rees (1995) utilizaram conjuntos de regras classificadas como globais e locais na identificação de sistemas dinâmicos, onde as regras globais fazem o mapeamento das características gerais do sistema, e as locais representam características específicas. Pedrycz et al. (1995) introduziram a idéia de modelagem fuzzy distribuída. Tan e Yu (1995, 1996) mostraram como modelar sistemas fuzzy de forma *on-line* através de modificações em funções de pertinência e regras, com análises de convergência pelo método de Lyapunov. Filev e Yager (1996) discutiram as principais classes de modelos fuzzy com respeito aos processos de defuzificação. Abreu et al. (1996) mostram um método rápido e simples para produção de regras de modelos fuzzy, onde as funções de pertinência das variáveis fuzzy são calculadas por meio de técnicas de agrupamento. Vachkov e Hirota (1996) apresentaram um modelo fuzzy dinâmico adequado para previsão de um passo a frente para sistemas de alta ordem, não lineares e variantes no tempo, baseado na atualização recursiva dos fatores de escala das funções de pertinência. Zeng e Singh (1997) mostraram um método para identificar modelos fuzzy de sistemas desconhecidos usando informações lingüísticas e dados numéricos. Mouzouris e Mendel (1997) propuseram uma metodologia de modelagem fuzzy empregando mecanismos de adaptação capaz de capturar a dinâmica de sistemas não lineares, e mostraram que o método pode ser considerado um modelo tipo NARMA (*Nonlinear Auto Regressive Moving Average*) geral. Emami et al. (1998) apresentaram uma metodologia sistemática para modelagem fuzzy com as seguintes características: formulação de inferência parametrizada; algoritmo de agrupamento eficiente; uma

estratégia de seleção de entradas significativas e suas funções de pertinência. Yen e Wang (1999) usaram métodos de mínimos quadrados para seleção de regras em sistemas fuzzy.

Takagi e Sugeno (1985), Sugeno e Kang (1988) apresentaram um método sistemático de identificação e modelagem fuzzy que se tornou um marco. Conhecido como modelos T-S ou T-S-K, são constituídos por uma base de regras (também chamadas de regras funcionais) com a seguinte forma:

$$R^i : \text{if } x_1 \text{ is } X_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^i \text{ and } \dots x_k \text{ is } X_k^i \text{ then } y = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (2)$$

Isto é, os conseqüentes das regras (saída do sistema) são funções das variáveis de entrada. Os parâmetros da função f_i podem ser estimados por métodos convencionais como mínimos quadrados ou outros [Yager e Filev (1994)].

Sugeno e Tanaka (1991) mostraram como proceder no ajuste de parâmetros das premissas e conseqüentes de regras tipo T-S-K com o uso de algoritmo de mínimos quadrados recursivo. Os procedimentos para encontrar a estrutura ótima de premissas podem levar a problemas de programação não linear. Isto levou Yager e Filev (1993) a desenvolver uma alternativa para construir modelos tipo T-S-K com o conceito de amostra de distribuição de probabilidade, simplificando o problema de identificação da estrutura das funções de pertinência das variáveis de entrada por técnica de agrupamento. Chiu (1994) apresentou uma forma modificada do método de Yager e Filev, resultando em um método de estimação mais eficiente. Nakamori e Ryoike (1994) trataram de identificação de modelos fuzzy funcionais com uma técnica de agrupamento chamada hiper-elipsoidal obtendo-se uma boa continuidade nas aproximações. Park et al. (1995) propuseram um método para modelos T-S-K onde os parâmetros conseqüentes das regras eram identificados por meio da transformada de Hough. Cipriano et al. (1995) desenvolveram um método para modelos T-S-K baseado na sintonia iterativa das funções de pertinência por meio de técnicas de mínimos quadrados. Kroll (1996) utilizou técnicas de agrupamento e de medidas de distância na identificação de modelos funcionais. Babuska et al. (1996) analisaram as influências de sobreposições das funções de pertinência na precisão das aproximações de modelos T-S-K. Johansen (1996) usou métodos de regularização para

identificação de modelos T-S-K em problemas que apresentavam carência de dados. Wang e Langari (1996) argumentaram que, mesmo com técnicas de agrupamento, a identificação de modelos T-S-K ainda depende de procedimentos de otimização não linear, o que, para diferentes valores iniciais, pode fornecer diferentes resultados de identificação. Estes autores desenvolveram um procedimento que apresenta características de simplicidade, flexibilidade, e precisão baseado em técnica de discretização proposta por Willaeyts e Malvache (1979, 1981). Whalen et al. (1996) analisaram os fatores que influenciam a precisão de modelos fuzzy, realçando a discretização como um dos mais importantes. Cao et al. (1997_a) apresentaram um método de modelagem fuzzy funcional que constrói um conjunto de modelos locais que são conectados através de funções de pertinência para formar um modelo global dinâmico. Mastorocostas e Theocharis (1997) sugeriram um procedimento simples e eficiente para modelos fuzzy tipo T-S-K, onde os parâmetros dos antecedentes e conseqüentes das regras são ajustados por mínimos quadrado ortogonais. Kim et al. (1997) propuseram um modo de modelagem com regras funcionais usando dois procedimentos de identificação: uma etapa de ajuste grosso usando um método modificado de agrupamento; outra de ajuste fino através de técnicas de gradiente descendente.

2.2.2 Métodos e modelos relacionais

Os modelos fuzzy relacionais são representados por uma equação relacional nebulosa ao invés de um conjunto de regras. Por exemplo, considere dois conjuntos fuzzy (C, D) discretos e finitos:

$$C = \sum_{i=1}^n C(u_i) / u_i \quad , \quad D = \sum_{j=1}^m D(v_j) / v_j. \quad (3)$$

Onde u_i , v_j são valores das variáveis (u, v) dos respectivos universos de discurso, e $C(u_i)$, $D(v_j)$ são os graus de pertinência correspondentes no intervalo [0, 1]. No produto cartesiano dos universos de C e D pode ser definido um subconjunto fuzzy, uma relação fuzzy R:

$$R = \sum_{u,v} C(u)tD(v) / (u,v). \quad (4)$$

Sendo t uma norma triangular, R pode ser representado na forma matricial (como na tabela 1) recebendo o nome de matriz relacional. Uma equação relacional fuzzy fornece a saída de um

Tabela 1. Representação da relação R .

	v_1	v_2	...	v_m
u_1	Γ_{11}	Γ_{12}	...	Γ_{1m}
u_2	Γ_{21}	Γ_{22}	...	Γ_{2m}
...
u_n	Γ_{n1}	Γ_{n2}	...	Γ_{nm}

sistema a partir da composição entre as entradas e a relação nebulosa. Por exemplo, um sistema em tempo discreto de múltiplas entradas e única saída (MISO) pode ser descrito pela seguinte equação relacional:

$$Y(k) = Y(k-1-\tau) \circ Y(k-p-\tau) \circ X_1(k-\tau_1) \circ X_1(k-q_1-\tau_1) \circ X_n(k-q_n-\tau_n) \circ R. \quad (5)$$

Onde $Y(\cdot)$ é a saída do modelo, $X_i(\cdot)$ são variáveis fuzzy relativas as entradas, R a correspondente matriz relacional, p, q_1, \dots, q_n representam a ordem do sistema, $\tau, \tau_1, \dots, \tau_n$ correspondem a atrasos de transporte, \circ representa um operador de composição fuzzy. A extensão para sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) é direta. A característica principal dos modelos fuzzy relacionais é que, uma vez definida a estrutura do modelo (ordem e atrasos podem ser obtidos aproximadamente através de métodos convencionais de identificação), o problema se resume à estimação dos elementos dessa matriz.

Czogala e Pedrycz (1981) trataram de forma pioneira a identificação fuzzy de sistemas por meio de expressões relacionais, propondo a utilização de métodos analíticos para resolver equações relacionais [Sanchez (1976), Czogala et al. (1982), Higashi e Klir (1984_b), Nola et al.

(1984), Gottwald (1985), Pedrycz (1985_{a,b}), Pedrycz (1990), Nola et al. (1991), Pedrycz (1993)]. A partir de então outros trabalhos seguiram esta linha: Pedrycz (1981), Czogala e Pedrycz (1982), Pedrycz et al. (1984), Pedrycz (1984_a), Higashi e Klir (1984_a). Esses métodos pressupõem a existência de soluções que não podem ser verificadas antecipadamente, mas servem para estabelecer condições iniciais para outros métodos. Para contornar as dificuldades dos métodos analíticos exatos, foram desenvolvidos métodos aproximados como em Pedrycz (1983). Pedrycz (1984_a) propôs o uso de técnicas de agrupamento para reduzir a quantidade de dados e resolver mais facilmente as equações relacionais. Neste sentido Gottwald e Pedrycz (1986) utilizaram o conceito de medida de solucionalidade para expressões relacionais. Pedrycz (1988) usou um índice de igualdade entre conjuntos fuzzy para analisar inconsistências. Para aplicações *on-line* Xu e Lu (1987), Graham e Newell (1989), Xu (1989) desenvolveram algoritmos com características adaptativas usando fatores de ponderação para atualizar a matriz relacional (esses fatores nem sempre são fáceis de se ajustar). Pedrycz (1991) tratou de alguns aspectos fundamentais de modelagem fuzzy, onde foram analisados alguns modelos fuzzy desenvolvidos em termos de equações relacionais. Postlethwaite (1991) mostrou que modelos relacionais fuzzy são tão bons quando os baseados em regras, e podem ser construídos para serem tolerantes a ruídos presentes nos dados usados para a identificação. Pedrycz e Oliveira (1993) investigaram o problema da otimização de modelos relacionais fuzzy sob aspectos numéricos. Oliveira e Lemos (1993), Oliveira (1995) mostraram como construir *interfaces* numérico/lingüísticas na modelagem de sistemas representados por equações relacionais fuzzy. Levrat et al. (1993) generalizaram a resolução de equações relacionais fuzzy para qualquer t-norma. Yi e Chung (1993) construíram sistemas fuzzy através do cálculo de possibilidade entre modelos de saída e valores estimados. Ikoma e Hirota (1993) propuseram um modelo não linear autoregressivo contendo uma função regressiva aproximada por relações fuzzy. Branco e Dente (1993) desenvolveram um algoritmo de predição baseado no ajuste do centro de gravidade. Bae et al. (1993) usaram um índice de paridade fuzzy na avaliação de modelos representados por equações relacionais. Pedrycz e Oliveira (1994) propuseram um método de modelagem usando um sistema relacional fuzzy estático, onde a dinâmica era representada no modelo por linhas de atraso. Lee et al. (1994) propuseram um algoritmo para otimização de modelos fuzzy, cuja eficiência dependia de uma estimativa inicial da relação nebulosa, condição que pode levar a erros grandes em modelagem quando na presença de variações bruscas no sistema identificado. Isto também pode

ocorrer nas abordagens propostas por Oliveira e Lemos (1993, 1995_b), que mostraram que a taxa de convergência na identificação de sistemas relacionais fuzzy depende não somente do método de otimização utilizado, mas também das normas empregadas. Campello et al. (1997), Campello (1997), Campello e Amaral (1998), Campello et al. (1998_a) propuseram uma solução para o problema de condições iniciais em identificação fuzzy com um método onde a otimização é realizada mesmo sem uma boa estimativa da relação nebulosa. Oliveira (1999) tratou de condições de otimização de funções de pertinência de sistemas fuzzy através de informações semânticas.

2.2.3 Outros

Outras abordagens de sistemas fuzzy incorporam métodos de redes neurais, algoritmos genéticos, computação evolutiva e outros na construção de modelos de sistemas complexos. Jia e Zhang (1993) trataram de modelagem de sistemas fuzzy multivariáveis baseado em técnicas de mapeamento de células. Esta técnica conhecida por *cell mapping* foi proposta por Hsu (1980) para avaliar o comportamento global de sistemas não lineares em geral, e tem sido aplicada a sistemas fuzzy. Ela aproxima um espaço de fase contínuo por um conjunto finito de células independentes. Cada célula abrange um infinito número de estados e é aproximada por seu ponto central. Assim o problema de analisar trajetórias contínuas é facilmente interpretada expressando-as como trajetórias finitas através das células do espaço. Células são criadas por divisão de cada eixo do espaço de fase dentro de intervalos, usualmente de tamanhos iguais. Oliveira (1993) baseou-se em métodos de redes neurais para obter soluções aproximadas de equações relacionais fuzzy. Wang (1994) adaptou métodos de aprendizado tipo retropropagação para identificação de sistemas fuzzy, e mostrou que, com a inclusão de informações lingüísticas, pode-se ter um número de épocas de treinamento bem menor do que as redes neurais. Nie (1995) descreveu um método sistemático para construção de modelos fuzzy multivariáveis através de uma rede neural tipo contrapropagação auto-organizada. Pedrycz e Oliveira (1996) mostraram mecanismos de otimização para tratar de problema multimodal empregando algoritmos genéticos. Wong e Lin (1997) apresentaram um modo para obtenção automática das regras de modelos tipo T-S-K

através de algoritmos genéticos, obtendo os parâmetros dos antecedentes e conseqüentes das regras ao mesmo tempo.

2.3 Métodos de controle fuzzy de processos

Os controladores fuzzy tem-se mostrado mais eficientes que os compensadores clássicos em aplicações que envolvam processos complexos (não lineares, variantes no tempo), onde não se dispõem de muitas informações detalhadas do sistema. Driankov et al. (1996) resumiram as maneiras básicas para se gerar os controladores fuzzy: interrogando operadores de processos, verbalizando experiências de especialistas como forma para obter uma representação qualitativa do controle; derivando estratégias de controle a partir da identificação de modelos; ou usando técnicas da teoria de sistemas de controle (linear, não linear, adaptativo, etc.).

Assim como em modelagem fuzzy, a obtenção de regras para sistemas de controle usando conjuntos fuzzy sempre foi uma questão importante. Baaklini e Mamdani (1975) propuseram um modo para derivar regras de forma lingüística, através de restrições da resposta desejada do sistema dentro de uma faixa especificada. Os trabalhos de Czogala e Pedrycz (1981), Takagi e Sugeno (1985), contribuíram para um tratamento mais formal na obtenção de regras fuzzy para controle a partir da modelagem e identificação fuzzy de sistemas. A partir das informações de modelos de processos a serem controlados pode-se derivar regras para representar estratégias de controle. Nos modelos baseados em regras funcionais, as regras de controle podem ser obtidas por meio da análise do funcionamento do modelo. Nos modelos relacionais, através de conjuntos fuzzy de referência, é possível obter conhecimento qualitativo do processo [Pedrycz (1984_b), Graham e Newell (1989)], onde cada elemento da matriz relacional representa uma medida de possibilidade [Zadeh (1978)] da relação entre os conjuntos fuzzy de entrada e saída.

Os sistemas de controle fuzzy podem ser classificados em controladores fuzzy convencionais e adaptativos. Geralmente, os controladores fuzzy convencionais são usados em processos complexos não lineares e/ou variantes no tempo onde se conhece a ordem dessas variações. O uso de controladores fuzzy adaptativos é mais adequado em processos onde essas

variações são desconhecidas. Outros tipos de controladores fuzzy são aqueles que incorporam estruturas de redes neurais, de sistemas de controle não lineares, algoritmos genéticos, etc.

2.3.1 Sistemas de controle fuzzy convencionais

King e Mamdani (1975) mostraram uma maneira simples para justificar as regras usadas em sistemas de controle fuzzy, através da análise da trajetória do sistema no tempo e em um plano de fase (figura 1). A partir das informações do erro (E) do sistema (a diferença entre a referência e a variável de saída), e da variação do erro (V), as regras lingüísticas do controlador são inferidas para adequar as correções de atuação na planta (U) e obter o comportamento desejado (especificações de projeto).

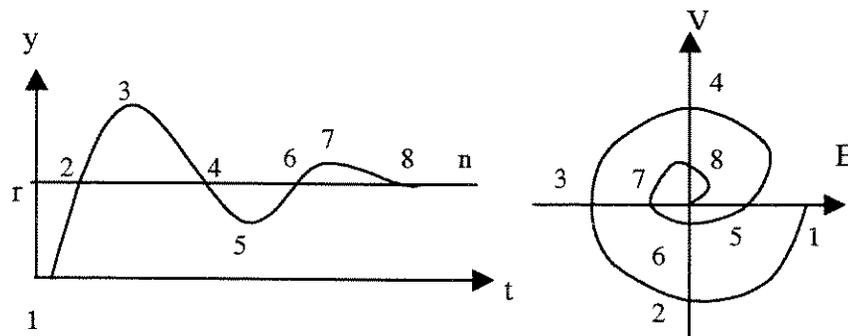


Figura 1. Resposta no tempo e em um plano de fase de um sistema de controle.

A seguir são mostradas cinco regras simples, obtidas para algumas regiões de interesse (delimitadas pelos pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, etc.), onde os conjuntos fuzzy são definidos lingüísticamente como negativo (N), zero (Z), e positivo (P):

- if $E = P$ and $V = Z$ then $U = P$ (pontos 1, 5)
- if $E = Z$ and $V = N$ then $U = N$ (pontos 2, 6)
- if $E = N$ and $V = Z$ then $U = N$ (pontos 3, 7)
- if $E = Z$ and $V = P$ then $U = P$ (pontos 4, 8)
- if $E = Z$ and $V = Z$ then $U = Z$ (n). (6)

Outros pontos podem ser analisados junto com outras partições lingüísticas como: pequena (S), média (M), larga (L), etc., gerando mais regras. A tabela 2 ilustra um arranjo típico:

Tabela 2. Arranjo típico de regras.

U		E						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
V	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
	NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
	NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
	Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
	PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
	PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

A estrutura deste tipo de controlador fuzzy (conhecido como tipo Mamdani) pode ser esquematizada através da figura 2, onde o sinal (u) para comando da planta pode ser do tipo posicional ou incremental. As etapas de fuzificação e defuzificação transformam variáveis não fuzzy em fuzzy, e vice-versa. Os mecanismos de inferência são os mesmos da teoria de sistemas fuzzy: max-min; max-produto; etc. A sintonia do controle pode ser realizada com modificações nas funções de pertinência (forma, largura, posição), nos fatores de escala (g_e , g_v , g_d) das variáveis, e mesmo em alterações de regras. Outras entradas podem ser adicionadas, tais como a variação da variação do erro ou a somatória do erro para estabelecer atuações semelhantes a compensadores clássicos tipo proporcional-integral-derivativo (PID). Isto pode exigir uma tabela de regras de três dimensões ao invés de duas ($E \times V$).

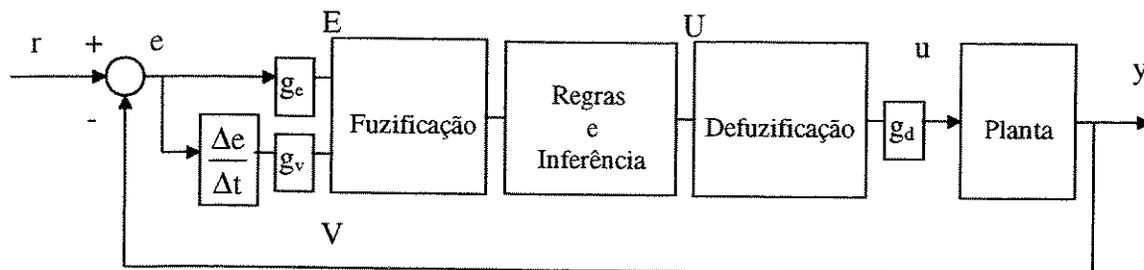


Figura 2. Sistema de controle fuzzy típico.

Com as primeiras aplicações de conjuntos fuzzy em sistemas de controle, vários trabalhos foram desenvolvidos abordando questões sobre projeto, estabilidade, sintonia, condições de robustez, comparações com controladores clássicos, etc. Kickert e Mamdani (1978) mostraram que controladores fuzzy são similares a sistemas de controle com múltiplos relés. Eles usaram o conceito de função descritiva, técnica para sistemas de controle não lineares [Gelb e Velde (1968), Atherton(1975)], para prever a existência de oscilações mantidas e ciclos limites em sistema de controle fuzzy. Braae e Rutherford (1979) usaram a mesma técnica para analisar condições de estabilidade em plantas lineares com controladores fuzzy. Ray e Majumder (1984) aplicaram o método do critério do círculo (um método do domínio da frequência) para análise de estabilidade em sistemas de controle fuzzy multivariáveis. Tang e Mulholland (1987) compararam controladores fuzzy e compensadores lineares, mostrando que, sob certas condições, os primeiros se aproximam de atuações semelhantes aos segundos quando se incrementa o número dos conjuntos fuzzy. Siler e Ying (1989) provaram que um controlador fuzzy com funções de pertinência lineares, empregando operadores de Zadeh e Lukasiewicz, e com um algoritmo de defuzificação linear, é precisamente equivalente a um compensador PI linear. Buckley e Ying (1989) mostraram que, para um controlador fuzzy empregando regras fuzzy simétricas (como da tabela 2), quando o número destas cresce o comportamento do mesmo tende a ser igual ao de um PI linear, ou ao de um PID com a variação da derivada do erro como uma terceira entrada. Abdelnour et al. (1991) apresentaram um método de gerar tabelas reduzidas de regras em controladores fuzzy com três entradas. Tanaka e Sugeno (1992) desenvolveram uma maneira para garantir a estabilidade de sistemas de controle fuzzy com regras tipo T-S-K usando o método de Lyapunov. Buckley (1992) mostrou que controladores fuzzy tipo Mamdani podem ser considerados controladores universais. Buckley (1993) demonstrou que controladores fuzzy tipo T-S-K são controladores universais. Chen et al. (1993) utilizaram o método de Lyapunov como condição suficiente para garantir a estabilidade de controles fuzzy que tenham o processo e controlador (este com características PID), modelados por regras tipo T-S-K. Tanaka e Sano (1993) propuseram um controlador fuzzy com regras funcionais que apresenta características de avanço de fase. O controlador admite as funções de pertinência da figura 3 com as seguintes regras e expressões:

$$\begin{aligned} \text{Regra 1 : Se } \phi \text{ está entre } [-\pi, +\pi] \text{ Então } U1 &= g_{e1} e + g_{v1} v, \\ \text{Regra 2 : Se } \phi \text{ está entre } [-\pi/2, +\pi/2] \text{ Então } U2 &= g_{e2} e + g_{v2} v, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{e}{v}, \quad (8)$$

$$U = \frac{W1U1 + W2U2}{W1 + W2}. \quad (9)$$

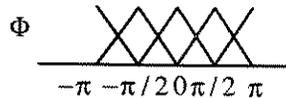


Figura 3. Funções de pertinência.

Abdelnour et al. (1993_{a,b}) usaram o método da função descritiva para analisar sistemas de controle fuzzy. Ying (1993_a) provou que controladores fuzzy típicos se constituem da soma de um controlador local com outro global com características não lineares. Postlethwaite (1994) mostrou que a partir de modelos relacionais pode-se gerar um controlador fuzzy convencional. Leephakpreeda e Batur (1994) usaram conceitos de função descritiva para estudar questões de estabilidade em controladores fuzzy. Marin e Titli (1994) abordaram as possibilidades do uso de métodos da teoria de controle de sistemas não lineares (Lyapunov; Popov; critério do círculo; funções descritivas; e outros) na análise de controladores fuzzy, visto que eles podem ser considerados como uma classe de controladores não lineares. Marin e Titli (1995) usaram o método da função descritiva para analisar a estabilidade de sistemas de malha fechada com controladores fuzzy. Güvenç (1995) mostrou que, para análises de estabilidade de malhas de controle fuzzy, o método da função descritiva é menos conservativo que os de Popov e do círculo. Ortmeyer e Hiyama (1995) analisaram a estabilidade de um sistema de controle fuzzy através de medidas de resposta em frequência. Raymond et al. (1995) descreveram um meio para deduzir as regras de controle para sistemas multivariáveis através das regras que modelam o processo. Manoranjan et al. (1995) apresentaram um modo para determinar as funções de pertinência de conjuntos fuzzy através de otimização linear. Chen et al. (1995) formularam, através de relações fuzzy, condições necessárias e suficientes para analisar a estabilidade de sistemas de controle fuzzy em malha fechada. Li e Gatland (1995) mostraram como obter regras fuzzy para sistemas de controle com atrasos de transporte usando um plano de fase. Galichet e Foulloy (1995) propuseram uma metodologia de projeto de controladores fuzzy tipo Mamdani e T-S-K com características PI. Zhao et al. (1995) usaram o método das desigualdades matriciais

para projetar e analisar sistemas de controle fuzzy tipo T-S-K. Tanaka (1995) apresentou análise de estabilidade de sistemas de controle fuzzy onde os processos são modelados por técnicas clássicas, conjuntos fuzzy, ou redes neurais. Lewis e Liu (1996) apresentaram expressões relacionadas a memórias associativas fuzzy com definições multidimensionais, e mostraram que as funções de pertinência não devem ser igualmente espaçadas quando se deseja obter controles mais efetivos. Cao et al. (1996) propuseram um método para projetar, através da teoria de sistemas de controle lineares, controladores fuzzy baseados na dinâmica de modelos fuzzy em variáveis de estado. Wang et al. (1996) mostraram uma metodologia para controle de plantas não lineares que são modeladas através de regras funcionais, onde o controlador é projetado utilizando o conceito de compensação paralela distribuída. Tanaka et al. (1996) apresentaram modos de analisar a estabilidade para uma classe de sistemas não lineares com incertezas, modelados por regras T-S-K e empregando técnicas de estabilização quadrática e desigualdades matriciais lineares (LMI). Gegov (1996) compilou uma série de referências bibliográficas sobre sistemas de controle fuzzy multivariáveis. Nie (1997) mostrou o controle de um sistema não linear multivariável, onde a estratégia de controle empregava um controlador fuzzy convencional para cada malha, e um desacoplamento entre canais era realizado através de conjuntos fuzzy com o processamento de algumas variáveis do sistema. Cao et al. (1997_b) propuseram, para plantas modeladas por regras tipo funcionais, modos de projeto de controladores fuzzy por métodos de alocação de pólos e controle linear quadrático. Logan e Pachter (1997) propuseram um tipo de controlador fuzzy baseado em técnicas de modulação de sinais. Ying (1998_{a,b}) provou que controladores fuzzy com regras T-S-K possuem ganhos não lineares variáveis, e mostrou uma nova forma de construir esses controladores manipulando essas variações de ganhos. Chen et al. (1998) examinaram as influências de várias t-normas em controladores fuzzy convencionais, e seus efeitos na estabilidade em malha fechada. Berger (1998) introduziu uma nova descrição axiomática para conexão de conjuntos fuzzy, e mostrou que sistemas de controle fuzzy assim implementados seriam melhores que com as t-normas convencionais. Cao et al. (1998) desenvolveram análises de estabilidade para sistemas de controle tipo Mamdani e T-S-K baseadas no método de Lyapunov. Sio e Lee (1998) estudaram a estabilidade de controlador fuzzy PID usando o teorema da passividade. Tanaka et al. (1998) apresentaram um meio para análise e projeto de sistemas de controle fuzzy contínuos e discretos baseado em técnicas de LMI. Calcev et al. (1998) mostraram que controladores fuzzy podem ser tratados como controladores

não lineares dinâmicos passivos, e em plantas lineares invariantes no tempo levam a respostas similares a sistemas clássicos. Gegov (1998) aplicou técnicas de sistemas de controle multicamadas em sistemas multivariáveis fuzzy. Margaliot e Langhotz (1999) utilizaram técnicas de controle ótimo no projeto de controladores fuzzy.

2.3.2 Sistemas de controle fuzzy adaptativos e preditivos

Um sistema de controle adaptativo tradicional tem a capacidade de compensar variações desconhecidas (*a priori*) de um processo, alterando parâmetros do sistema em função de variações na planta controlada [Chalam (1987), Aström e Wittenmark (1989), Bitmead et al. (1990)]. Os controladores adaptativos/preditivos fuzzy também tem esta capacidade, possuindo além disso, as vantagens inerentes dos sistemas fuzzy de lidar com incertezas e poder agregar informações lingüísticas. Nos controladores adaptativos fuzzy as ações de adaptação geralmente modificam funções de pertinência, fatores de escala, ou regras durante o controle. Esses sistemas de controle fuzzy são classificados em adaptativos e preditivos, e usam terminologia, métodos, e estruturas semelhantes aos controladores adaptativos tradicionais.

Procyk e Mamdani (1979) foram os primeiros a propor e construir um controlador fuzzy auto-organizado (figura 4) composto por uma estrutura hierárquica constituída de dois níveis de bases de regras, uma geral e outra com capacidade de auto-organização que modificava as regras segundo um índice de performance desejado.

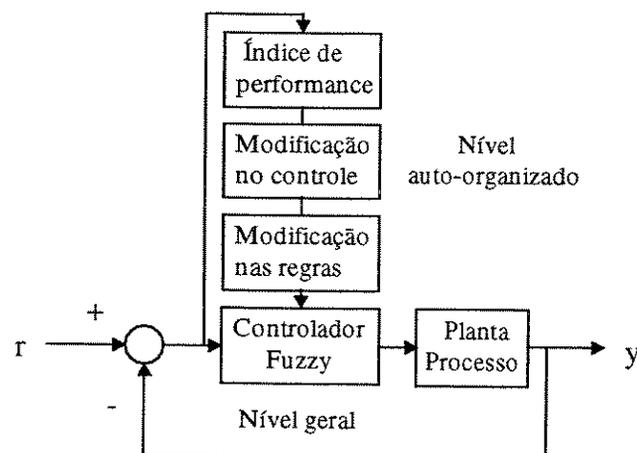


Figura 4. Sistema de controle fuzzy auto-organizado.

Desde então vários trabalhos foram desenvolvidos nesta área. Yamazaki e Mamdani (1982) trataram de medidas de performance para controladores auto-organizados. Bartolini et al. (1985) implementaram um controlador fuzzy adaptativo com modificações nas funções de pertinência. Scharf e Mandic (1985) desenvolveram um controle auto-organizado fuzzy específico para sistemas robotizados. Shao (1988) apresentou um algoritmo para um controlador fuzzy auto-organizado levando em consideração memória e tempo de processamento, com aplicações em um processo térmico e no controle de velocidade de um motor elétrico. Tanscheit e Scharf (1988) apresentaram experimentos de controle fuzzy auto-organizado para aplicações em robôs. Graham e Newell (1989) mostraram o controle de um processo com ganho e constante de tempo variável empregando o controlador fuzzy adaptativo ilustrado na figura 5:

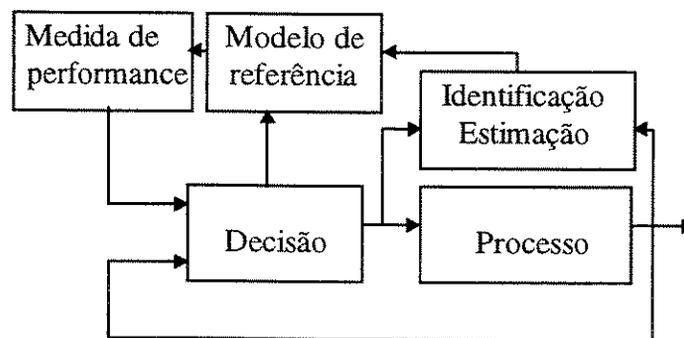


Figura 5. Sistema de controle fuzzy adaptativo.

Batur e Kasparian (1989) propuseram um controlador fuzzy *self-tuning* com estrutura semelhante aos controladores auto-sintonizados tradicionais. Harris e Moore (1990) desenvolveram sistemas fuzzy adaptativos para aplicações em tempo real. Linkens e Abbod (1991) implementaram controladores fuzzy auto-organizados para aplicações em tempo real. Glorennec (1991) desenvolveu um controlador fuzzy com mecanismo de adaptação implementado através de modificações nos conjuntos fuzzy. Hayashi (1991) desenvolveu um controlador fuzzy auto-sintonizado com características PI. Kang e Vachtsevanos (1992) introduziram um controle adaptativo fuzzy com critério de estabilidade por Lyapunov para garantir condições de convergência e robustez. Tseng e Hwang (1993) implementaram um controlador fuzzy PI auto-sintonizado usando funções de Lyapunov como um índice de performance na formulação das regras. Zhao et al. (1993) desenvolveram um sistema fuzzy para *gain scheduling* de controladores

PID com determinação *on-line* dos parâmetros do controlador. Tzes e Kyriakides (1993) implementaram um controlador fuzzy PD auto-sintonizado usando técnicas de identificação do domínio da frequência. Wang (1994) apresentou com detalhes a construção de controladores fuzzy adaptativos diretos e indiretos. Yin e Lee (1995) propuseram um controle fuzzy adaptativo usando funções de base para representar os parâmetros e mudanças na identificação. Wang (1996) construiu um controle adaptativo baseado em um controlador fuzzy convencional, cujos parâmetros são ajustados para controlar o processo dentro de uma faixa de resposta especificada. Foi mostrado que a inclusão de informações lingüísticas pode tornar o controle mais rápido e preciso. Ollennu e White (1997) desenvolveram um controle fuzzy adaptativo usando linearização por realimentação de estado das variáveis de entrada e saída. Palm e Rehfuss (1997) mostraram que controladores do tipo T-S-K estão relacionados com controladores *gain scheduling* tradicionais. Chung et al. (1998) desenvolveram um controlador fuzzy tipo PI com fatores de escala auto-sintonizados. Nie e Lee (1998) analisaram a estabilidade da malha de controle de um sistema não linear tipo Wiener, onde as regras do controlador fuzzy são auto-organizadas. Li (1999) implementou um sistema de controle fuzzy adaptativo usando modelos de referência.

Um controlador preditivo fuzzy, de forma similar aos não fuzzy, é um tipo de sistema de controle adaptativo que calcula uma seqüência futura de atuações para otimizar uma função que descreve os objetivos do controle, por exemplo: minimização de erro, tempo de resposta, energia, etc. Batur e Kasparian (1991) mostraram uma técnica onde o conhecimento incorporado em um controlador fuzzy preditivo refletia as mudanças do processo e condições ambientais. Nakamori et al. (1991) propuseram um controle preditivo fuzzy para modelos tipo T-S-K. Georgescu et al. (1993_a) mostraram um algoritmo PID preditivo fuzzy derivado de técnicas de controle preditivo convencional. Georgescu et al. (1993_b) apresentaram uma aplicação de controle preditivo fuzzy em um sistema de ar condicionado onde os objetivos eram regular a temperatura e economizar energia. Yamazaki (1994) desenvolveu um controlador preditivo fuzzy auto-sintonizado para sistemas multivariáveis. Oliveira e Lemos (1994, 1995_a) apresentaram um algoritmo de controle preditivo com predições de longo prazo, usando um modelo relacional fuzzy distribuído. Bourke e Fisher (1996) propuseram um controlador fuzzy preditivo de modelo relacional com a mesma estrutura de um preditivo tradicional. Postlethwaite (1996) desenvolveu um controlador fuzzy

com modelo relacional baseado em controladores preditivos não fuzzy. Fischer et al. (1997) desenvolveram um controle preditivo não linear baseado em sistemas fuzzy tipo T-S-K de alta ordem. Kaymak et al. (1997) implementaram um sistema de controle preditivo fuzzy visando atender múltiplos critérios de otimização. Hecker et al. (1997) analisaram um sistema de controle preditivo baseado em modelo fuzzy de um trocador de calor industrial. Saez e Cipriano (1997) mostraram o melhor comportamento de um controlador fuzzy em relação a um preditivo convencional para um pêndulo invertido. Fischer (1998) et al. propuseram um algoritmo para construir sistemas de controle preditivo fuzzy a partir de modelos tipo T-S-K. Campello et al. (1998_b) usaram modelos relacionais fuzzy para estimar processos não lineares e implementar controladores preditivos fuzzy.

2.3.3 Outros

Outros tipos de controladores fuzzy são aqueles que incorporam estruturas de redes neurais, técnicas não lineares não convencionais, algoritmos genéticos, computação evolutiva, etc.

Por exemplo, Chen e Tsao (1989) usaram a técnica de *cell mapping* para analisar o comportamento dinâmico global de um sistema fuzzy. Kang (1993) utilizou o método de transição de células de estado para análise de estabilidade em sistemas de controle fuzzy. Vachtsevanos et al. (1993) implementaram um controlador fuzzy através de grupos de células de estado, visando o controle de rotação e pressão de pistões de combustão interna.

Outro método da teoria de controle não linear usada para análise e projeto de controles fuzzy é o *sliding mode control* (SMC), um tipo de controle de estrutura variável (VSC) [Slotine e Li (1991)] que apresenta boas características de robustez e rejeição a distúrbios. Os controles SMC tem sua trajetória de estado “deslizando” sobre uma determinada superfície de estado. Hwang e Lin (1992) desenvolveram um controle fuzzy baseado em técnicas de SMC. Kim e Lee (1995) mostraram o projeto de um controlador fuzzy tipo *sliding mode* onde as regras de controle são baseadas nas informações da superfície de estado, e as condições de estabilidade são analisadas por método de Lyapunov. Driankov et al. (1996) mostraram que um controlador fuzzy

tipo *sliding mode* é similar a um filtro de estado usado em processamento de sinais. Wu e Liu (1996) implementaram um sistema de controle fuzzy de um pêndulo invertido rotacional, onde o controlador foi projetado por técnicas de *sliding mode*. Yeh (1997) propôs um controlador fuzzy para sistemas multivariáveis onde as regras eram obtidas por técnicas de *sliding mode*. Zhang e Feng (1997) propuseram um sistema de controle fuzzy para sistemas não lineares com projeto baseado em SMC. Ghalia (1997) mostrou uma forma de modelagem e controle para sistemas dinâmicos não lineares, onde a representação de incertezas é realizada por conjuntos fuzzy, e o controle por uma extensão de métodos de SMC. Li et al. (1997) usaram métodos de VSC para projetar e sintonizar sistemas de controles fuzzy. Yi e Chung (1998) efetuaram a análise de estabilidade de sistemas de controle fuzzy baseando-se em similaridades com VSC não fuzzy. Shaocheng e Tianyou (1998) propuseram um controle adaptativo indireto fuzzy para sistemas não lineares usando conceitos de *sliding mode*. Chen e Chang (1998) apresentaram um modo para projetar controles fuzzy tipo *sliding mode* com técnicas de algoritmos genéticos ou com o método de Taguchi. Lo e Kuo (1998) apresentaram um controle fuzzy tipo SMC para uma classe de sistemas não lineares de quarta ordem. Kiriakidis et al. (1999) implementaram um SMC-fuzzy para um sistema de controle de vazão de gases.

Tanaka et al. (1996) apresentaram modos para analisar a estabilidade de uma classe de sistemas não lineares com incertezas, modelados por regras T-S-K, usando técnicas de controle H_∞ [Shahian e Hassul (1993)]. Kobylarz et al. (1997) usaram sistemas fuzzy junto com controladores obtidos por QFT (*Quantitative Feedback Theory*) [Horowitz (1991)], para controlar sistemas não lineares dinâmicos. H_∞ e QFT são métodos do domínio da frequência para projetar compensadores (geralmente com parâmetros fixos) que apresentam excelentes características de robustez.

Nie e Linkens (1994) apresentaram um sistema de controle multivariável com capacidade de auto-organização que combina sistemas fuzzy com redes neurais. Jin et al. (1995) descreveram um controle de processo complexo usando um controlador neuro-fuzzy. Chen e Chang (1996) descreveram o projeto de um sistema de controle neuro-fuzzy tipo PID de estrutura variável para um processo de neutralização química. Nie e Lee (1997) implementaram um sistema de controle multivariável onde as regras do controlador são auto-organizadas por uma rede neural de

contrapropagação. Cho et al. (1997) usaram uma estrutura de controle híbrida fuzzy-PID, onde as regras e funções de pertinência são geradas e ajustadas por algoritmos genéticos. Chak et al. (1998) mostraram um controle adaptativo onde as funções de pertinência do controlador fuzzy são otimizadas por rede neural com aprendizado competitivo, e o sistema estimado por filtro de Kalman. Pham e Karaboga (1998) mostraram como projetar sistemas de controle fuzzy com técnicas de algoritmos genéticos. Penot et al. (1998) propuseram um controlador fuzzy T-S-K otimizado por algoritmos genéticos, no controle de vazão de microfiltração em um sistema de processamento de açúcar. Jin (1998) desenvolveu um controlador fuzzy adaptativo que combina algoritmos genéticos e métodos de gradiente. Hopgood et al. (1998) apresentaram uma técnica para melhorar a eficiência da etapa de defuzificação de controladores fuzzy, onde as funções de pertinência são substituídas por funções delta de Dirac.

2.4 Controladores fuzzy convencionais

Os controladores fuzzy convencionais representados por regras lingüísticas são largamente empregados em controle de processos, quando se dispõe de informações básicas das plantas controladas. A implementação desses controladores é computacionalmente simples. Determinadas características (que serão vistas a seguir), explicam algumas semelhanças e os melhores desempenhos dos controladores fuzzy em relação a compensadores lineares clássicos, principalmente em sistemas não lineares.

A seguir serão vistas as estruturas de controladores fuzzy convencionais mais utilizadas. Os efeitos não lineares que eles podem apresentar, bem como analogias e semelhanças com alguns compensadores tradicionais são também apresentadas.

2.4.1 Estruturas dos controladores fuzzy convencionais

Controladores fuzzy convencionais representados por regras lingüísticas possuem uma estrutura típica semelhante àquela definida pela tabela 2 e figura 2. Em controle de processos, os

controladores com ações proporcional (P), integral (I) e derivativa (D) são freqüentemente utilizados. Eles permitem que o sistema controlado alcance critérios de desempenho em resposta dinâmica, tais como máxima sobre-elevação, tempo de resposta, e erro em regime permanente. Muitos sistemas de controle fuzzy foram desenvolvidos de forma a apresentar atuações semelhantes aos controladores PID clássicos. Por exemplo, Kwok et al. (1990) [ver Harris et al. (1993) para outras referências] mostraram como implementar controladores fuzzy tipo PID como alternativa a estruturas fuzzy com três entradas (erro, variação do erro, e variação da variação do erro). Usando tabelas de duas dimensões (erro e variação do erro) obtém-se controladores fuzzy tipo PD ou PI. Tomando como referência a tabela 2 e figura 2, quando o sinal de comando (u) do controlador fuzzy for do tipo posicional, a ação resultante será tipo PD; se for incremental, a ação será do tipo PI. Outra estrutura muito utilizada de controlador fuzzy tipo PI é mostrada na figura 6(a) [Braae e Rutherford (1979)], onde é usado o valor da somatória (ou integral) do erro no lugar do sinal da variação do erro, e o sinal de comando do controlador fuzzy é do tipo posicional:

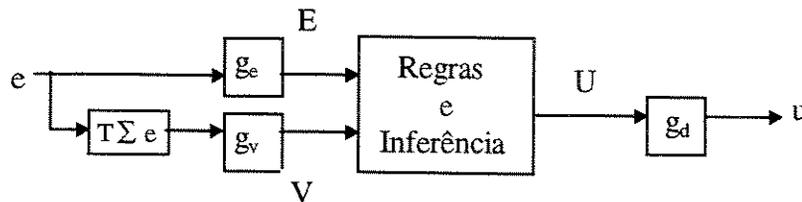


Figura 6(a). Exemplo de controlador fuzzy tipo PI.

Associando um fuzzy-PD com um fuzzy-PI, ou combinado um fuzzy-PD com um integrador mais um ganho (K_i), tem-se ações tipo PID como indicado pela figura 6(b):

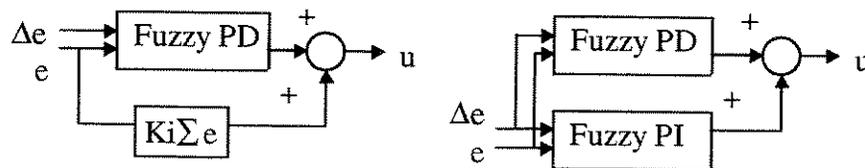


Figura 6(b). Duas composições de controladores fuzzy com efeito PID.

Li e Gatland (1996) mostraram outra alternativa para implementar controladores fuzzy tipo PID usando uma única tabela de duas dimensões com as informações do erro (E) e sua variação (V), como indicado pela figura 7.

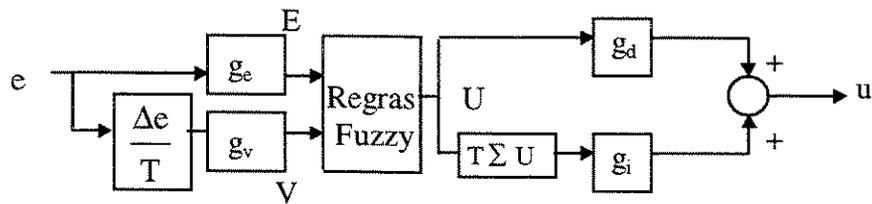


Figura 7. Controlador fuzzy tipo PID.

2.4.2 Efeitos não lineares e analogias com compensadores clássicos

Ying et al. (1990) analisaram um controlador fuzzy (CF) com funções de pertinência triangulares (figura 8) e com dois conjuntos fuzzy para as entradas e três para a saída; a base de regras é mostrada na tabela 3. Eles provaram analiticamente que este sistema, usando-se composição max-min, defuzificação tipo centro de gravidade e saída incremental eqüivale a um controlador PI não linear com os ganhos da parte proporcional (K_p) e integral (K_i) variando em função da intensidade das entradas, conforme as expressões (10) e (11). Esta seria uma explicação do melhor desempenho de um controlador fuzzy em relação a compensadores lineares clássicos para controle de processos não lineares.

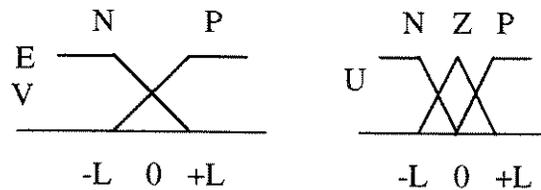


Figura 8. Funções de pertinência.

Tabela 3. Regras do CF.

U		V	
		N	P
E	N	P	Z
	P	Z	N

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_v}{2L - g_e |e|}, \quad K_i = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_e}{2L - g_e |e|}, \quad \text{ou} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_v}{2L - g_v |v|}, \quad K_i = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_e}{2L - g_v |v|}. \quad (11)$$

Malki et al. (1994) fizeram uma demonstração similar para um controlador fuzzy tipo PD, obtendo as expressões (12) e (13) para os ganhos proporcional (K_p) e derivativo (K_d).

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_e}{2L - g_e |e|}, \quad K_d = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_v}{2L - g_e |e|}, \quad \text{ou} \quad (12)$$

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_e}{2L - g_v |v|}, \quad K_d = \frac{1}{2} \frac{L g_d g_v}{2L - g_v |v|}. \quad (13)$$

Chen e Kuo (1995) realizaram uma extensão das análises de Ying et al. (1990) para um número genérico de conjuntos fuzzy (figura 9), concluindo que, quando estes tendem ao infinito, o controlador fuzzy apresenta um comportamento linear expresso por (14). Assim a analogia com um compensador linear clássico é representada através dos ganhos (K_p e K_i) que tenderiam a valores constantes e lineares expressos por (15).

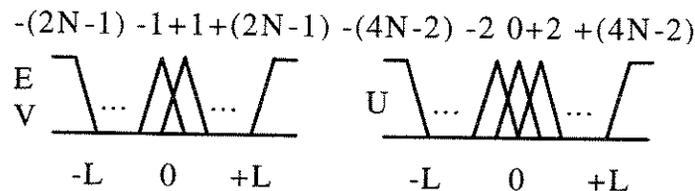


Figura 9. Funções de pertinência.

$$N \rightarrow \infty : U \rightarrow \frac{1}{2}(E + V) = \frac{1}{2}(g_e e + g_v v) \quad (14)$$

$$K_p \rightarrow \frac{1}{2} g_d g_v, \quad K_i \rightarrow \frac{1}{2} g_d g_e. \quad (15)$$

2.4.3 Sintonia de sistemas de controle fuzzy

A sintonia dos sistemas de controle fuzzy geralmente é realizada através de modificações nas funções de pertinência (larguras e posições), em fatores de escala das variáveis fuzzy, e mesmo em alterações nas regras. São usados procedimentos através de analogias com outros sistemas, heurísticas e tentativa e erro, sendo este o método mais usual.

Abdelnour et al. (1991) usaram um índice de desempenho (integral do erro quadrático) para ajustar os fatores de escala na sintonia de controladores fuzzy com regras lingüísticas. Tanaka e Sano (1993) empregaram informações de resposta transitória (amortecimento e tempo de sobrelevação) de um modelo linear de segunda ordem, para obter os fatores de escala de um controlador fuzzy tipo T-S-K. Qin e Borders (1994) mostraram como realizar a sintonia de controladores fuzzy convencionais ajustando simultaneamente suas funções de pertinência e os seus fatores de escala. Li (1997) introduziu uma metodologia para sintonizar controladores fuzzy tipo Mamdani ajustando fatores de escala através de analogias com controladores lineares clássicos. Xu et al. (1998) usaram informações heurísticas sobre margem de fase e margem de ganho, para sintonizar controladores fuzzy tipo PI em malhas de controle de sistemas de primeira ordem com atraso de transporte.

2.5 Resumo

Devido à sua capacidade de lidar com incertezas e com conceitos lingüísticos, os sistemas fuzzy vêm sendo empregados com sucesso na modelagem e controle de processos complexos. Métodos formais da teoria dos conjuntos fuzzy, e de áreas diversas como identificação, controle e otimização, são usados no desenvolvimento desses sistemas.

Os sistemas fuzzy são classificados em modelos baseados em regras (lingüísticas e funcionais), modelos relacionais e outros que utilizam técnicas de redes neurais, algoritmos genéticos, etc.

Em sistemas de controle fuzzy, os controladores podem ser divididos em controladores fuzzy convencionais, adaptativos/preditivos e outros que utilizam técnicas de sistemas não lineares, redes neurais, etc.

Existem diversas abordagens que apresentam resultados satisfatórios na obtenção das regras de sistemas fuzzy. A sintonia de uma malha de controle fuzzy é realizada através de modificações em funções de pertinência, fatores de escala e nas regras. Os procedimentos de sintonia usam analogias com outros sistemas, heurísticas e mesmo tentativa e erro.

Mesmo os controladores fuzzy convencionais mais simples podem apresentar características não lineares, o que explicaria sua melhor performance em relação aos lineares.

Capítulo 3

Análise de controladores fuzzy convencionais

3.1 Introdução

Algumas referências do capítulo 2 mencionam que os controladores fuzzy podem apresentar características não lineares. Elas dependeriam das funções de pertinência, limites dos universos de discurso, fatores de escala, regras, tipos de inferência, e métodos de defuzificação utilizados. Isto explicaria a melhor performance dos controladores fuzzy em relação aos compensadores lineares clássicos no controle de sistemas não lineares. Ying (1993_b) considera os controladores fuzzy convencionais com efeitos não lineares como sendo tipos de controladores adaptativos que não possuem modelos de referência ou etapas de identificação. São, portanto computacionalmente bem mais simples e os mecanismos de adaptação estariam inerentemente embutidos nas próprias regras, funções de pertinências, etc.

Os controladores fuzzy convencionais (até aqueles representados através de regras lingüísticas básicas) podem equivar a compensadores tipo PI e PD não lineares (item 2.4.2). Seus ganhos podem variar em função da magnitude das entradas, mesmo com as amplitudes dentro dos limites dos seus universos de discurso (fora destes limites podem ocorrer também efeitos de saturação nos controladores). Os ganhos não lineares (K_p e K_i , ou K_p e K_d), expressos por (10) ou (11), e (12) ou (13) têm alterações de no máximo 1/2, visto que os universos de discurso estão em $\pm L$ (figura 8, página 25) e apresentam variações proporcionais entre si.

É bem conhecido na teoria de sistemas lineares de controle que, no domínio da frequência, os compensadores PI e PD são definidos através de suas frequências de canto¹ (ω_c), e de seus módulos (M_d) em alta e baixa frequência: equações (16), (17), (18), (19). Como os ganhos dos

$$\omega_{cPI} = \frac{K_i}{K_p} \quad (16)$$

¹ Valor onde M_d muda de inclinação.

$$Md_{PI} = 20 \log_{10} K_p \quad (17)$$

$$W_{cPD} = \frac{K_p}{K_d} \quad (18)$$

$$Md_{PD} = 20 \log_{10} K_p \quad (19)$$

controladores fuzzy mencionados acima apresentam variações proporcionais, as frequências de canto não mudam. As alterações nos módulos serão de apenas 6 dB com as modificações nas amplitudes das entradas. Assim a dinâmica do sistema não terá alterações significativas com mudanças nestes ganhos. Nestas condições, somente efeitos de saturação poderiam explicar diferenças de comportamento entre um controlador fuzzy convencional e um compensador linear clássico. Pinheiro e Gomide (1998) mostraram que controladores fuzzy convencionais usando composição max-min podem apresentar um comportamento aproximado ao de sistemas lineares, quando os sinais das entradas estão dentro dos limites dos seus universos de discurso.

Ficam em aberto as seguintes questões: É possível obter controladores fuzzy convencionais tendendo a características lineares como em (14), sem que o número de partições fuzzy seja muito grande? Na necessidade de se ter efeitos razoavelmente não lineares, quais seriam os meios para obtê-los? Como estimá-los?

3.2 Relações entre entrada e saída de controladores fuzzy convencionais

Para obter algumas respostas sobre as questões colocadas acima, serão realizadas algumas análises formais usando a estrutura de controladores fuzzy convencionais da figura 2, e regras com distribuições padrões semelhantes às da tabela 2. Para manter uma representação única, concisa e o mais genérica possível, as funções de pertinência estão na forma mostrada na figura 10, onde $L_{-r}, \dots, L_{-1}, L_0, L_{+1}, \dots, L_i, L_m, \dots, L_j, L_k, \dots, L_n$ são nomes de conjuntos fuzzy que definem as partições para cada variável. Elas podem ser interpretadas como, p. ex., $L_0=ZE$ (zero), $L_{-1}=NS$ (negativo pequeno), $L_{+1}=PS$ (positivo pequeno), etc. Os centros das funções de pertinência são $C_p, \dots, C_{-1}, C_0, C_{+1}, \dots, C_i, C_m, \dots, C_j, C_k, \dots, C_s$, e os limites dos universos são C_p e C_s . Na base de regras genérica, conforme indica a tabela 4, cada regra tem a forma:

if E is L_i and V is L_j then U is L_z , onde $z = \begin{cases} -r & \text{se } j+i < -r \\ n & \text{se } j+i > n \\ j+i & \text{c.c} \end{cases}$

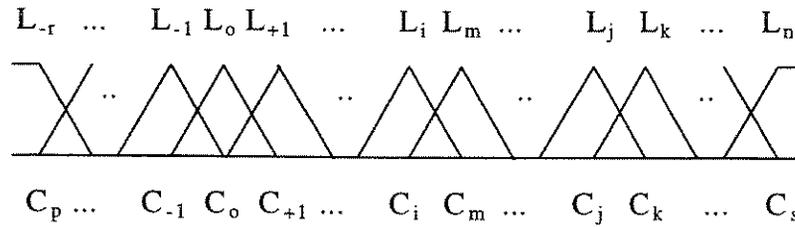


Figura 10. Funções de pertinência para E, V, e U.

E Tabela 4. Base de regras.

V	L_{-r}	L_{-r+1}	...	L_{-1}	L_0	L_{+1}	...	L_j	...	L_{n-1}	L_n
L_{-r}	L_{-r}	L_{-r}	...	L_{-r}	L_{-r}	L_{-r+1}	...	L_{-1}	L_0		
L_{-r+1}	L_{-r}	L_{-r}	...	L_{-r}	L_{-r+1}	L_{-r+2}	...	L_0	L_{+1}		
.
.
.
L_{-1}	L_{-r}	L_{-r}	...	L_{-2}	L_{-1}	L_0	...	L_{n-2}	L_{n-1}		
L_0	L_{-r}	L_{-r+1}	...	L_{-1}	L_0	L_{+1}	...	L_{n-1}	L_n		
L_{+1}	L_{-r+1}	L_{-r+2}	...	L_0	L_{+1}	L_{+2}	...	L_n	L_n		
.
L_j	L_{j+i}	.	.	.
.
L_{n-1}	L_{-1}	L_0	...	L_{n-2}	L_{n-1}	L_n	...	L_n	L_n		
L_n	L_0	L_{+1}	...	L_{n-1}	L_n	L_n	...	L_n	L_n		

Na figura 10, os índices dos nomes dos conjuntos fuzzy são tais que:

$$i = m - 1; \quad j = k - 1; \quad k = m + a; \quad j = i + a.$$

Além disso, como as funções de pertinência são triangulares, simétricas, e igualmente espaçadas (induzindo o que será chamado aqui uma partição uniforme), tem-se:

$$C_0 = \frac{C_s + C_p}{2}; \quad b = \frac{C_s + C_p}{2n}; \quad C_q = q \cdot b; \quad q \in \{-r, \dots, -1, 0, +1, \dots, n\}.$$

Nota-se que o suporte de algum conjunto fuzzy L_q é o intervalo fechado $[C_q - b, C_q + b]$. Portanto, o grau de pertinência de x em L_q é:

$$L_q(x) = 1 - \frac{|x - C_q|}{b}.$$

Devido a simetria das partições dos universos subjacentes, pode-se considerar sem perda de generalidade que, para dados valores de E e V , os conjuntos fuzzy para quais os graus de pertinência não estão nulos são L_i , L_m e L_j , L_k , respectivamente. Portanto, somente quatro regras são ativadas por vez, sendo:

$$L_m(E) = 1 - \frac{|E - mb|}{b} = 1 - m + \frac{E}{b},$$

$$L_i(E) = 1 - \frac{|E - ib|}{b} = 1 + i - \frac{E}{b} = m - \frac{E}{b},$$

$$L_k(V) = 1 - \frac{|V - kb|}{b} = 1 - k + \frac{V}{b} = 1 - m - a + \frac{V}{b},$$

$$L_j(V) = 1 - \frac{|V - jb|}{b} = 1 + j - \frac{V}{b} = m + a - \frac{V}{b}.$$

Usando o produto algébrico nas conjunções (*and*), os níveis de ativação dos consequentes das regras são:

$$\begin{aligned}\mu_{j+i} &= L_j(V) L_i(E) = (m + a - \frac{V}{b})(m - \frac{E}{b}) , \\ \mu_{j+m} &= L_j(V) L_m(E) = (m + a - \frac{V}{b})(1 - m + \frac{E}{b}) , \\ \mu_{k+i} &= L_k(V) L_i(E) = (1 - m - a + \frac{V}{b})(m - \frac{E}{b}) , \\ \mu_{k+m} &= L_k(V) L_m(E) = (1 - m - a + \frac{V}{b})(1 - m + \frac{E}{b}) .\end{aligned}$$

Os centros das regras ativas são:

$$\begin{aligned}C_{j+i} &= (j+i)b = (i+a+i)b = (2m+a-2)b , \\ C_{j+m} &= (j+m)b = (i+a+m)b = (2m+a-1)b , \\ C_{k+i} &= (k+i)b = (m+a+m-1)b = (2m+a-1)b , \\ C_{k+m} &= (k+m)b = (m+a+m)b = (2m+a)b .\end{aligned}$$

Portanto, a agregação das regras com defuzzificação através do método da altura (um tipo de método de centro de gravidade simplificado) [Driankov et al. (1996)] fornece a seguinte saída:

$$U = \frac{\sum C_q \mu_q}{\sum \mu_q} = \frac{N}{D} , \text{ onde}$$

$$D = \mu_{j+i} + \mu_{j+m} + \mu_{k+i} + \mu_{k+m} ,$$

$$N = C_{j+i} \mu_{j+i} + C_{j+m} \mu_{j+m} + C_{k+i} \mu_{k+i} + C_{k+m} \mu_{k+m} .$$

Desenvolvendo vem:

$$D = 1 , \quad N = E + V ,$$

$$U = E + V .$$

Assim, toda vez que E e V permanecerem dentro de $[C_p, C_s]$, a saída do controlador fuzzy é $U \sim E + V$. E para este propósito, somente um mínimo de conjuntos fuzzy são necessários para os correspondentes universos, sem a necessidade de tenderem a um número grande de regras como no resultado dado por (14). Isto significa que, quando um controlador fuzzy linear é de interesse, não há necessidade de considerar alguma outra estrutura do que a citada. Portanto, leis de controle fuzzy lineares podem ser obtidas com uma estrutura muito simples e computacionalmente efetiva.

Ainda mais, se o controlador fuzzy for tipo PD obtém-se:

$$u = g_d U = g_d (E + V) \quad \text{ou,}$$

$$u = g_d \left(g_e e + g_v \frac{\Delta e}{T} \right) . \quad (20)$$

Isto mostra que os fatores de escala g_e e g_v representam o mesmo papel dos ganhos proporcional e derivativo como em um compensador linear clássico PD. Estas mesmas considerações são válidas para controladores fuzzy tipo PI ou PID. Assim, controladores fuzzy com características lineares estão sujeitos às mesmas limitações e comportamentos (estabilidade, robustez, etc.) que os compensadores lineares clássicos.

3.3 Características não lineares de controladores fuzzy

Se, nas condições do item 3.2, as relações entre entrada e saída de um controlador fuzzy convencional são lineares (desconsiderando efeitos de saturação), como obter características não lineares significativas ? Geralmente nas abordagens de projeto e sintonia de controladores fuzzy, é comum se utilizar funções de pertinência com larguras e posições distintas. Como quantificar essa condição ?

Usando a mesma formulação do item anterior, considera-se agora que as funções de pertinência ainda são triangulares, mas com larguras diferentes. Em particular, supõe-se por simplicidade que somente o universo de V é particionado conforme mostrado na figura 11. Considera-se também que as funções são regulares e contínuas. Deste modo procede-se como antes para obter a relação entre entrada e saída:

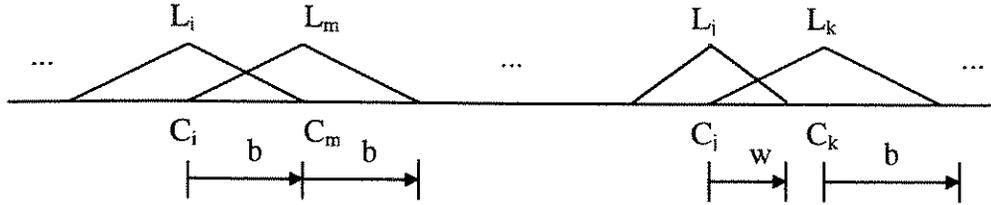


Figura 11. Funções de pertinência.

$$L_i(E) = 1 - \frac{|E - C_i|}{b} = 1 - \frac{|E - ib|}{b} = 1 - \frac{E}{b} + i,$$

$$L_m(E) = 1 - \frac{|E - C_m|}{b} = 1 - \frac{|E - mb|}{b} = 1 + \frac{E}{b} - m = \frac{E}{b} - i,$$

$$L_j(V) = 1 - \frac{|V - C_j|}{w} = 1 - \frac{|V - jb|}{w} = 1 - \frac{V}{w} + j \frac{b}{w},$$

$$L_k(V) = 1 - \frac{|V - C_k|}{b} = 1 - \frac{|V - kb|}{b} = 1 + \frac{V}{b} - k = \frac{V}{b} - j,$$

$$\mu_{i+j} = L_i(E) L_j(V) = \left(1 - \frac{E}{b} + i\right) \left(1 - \frac{V}{w} + j \frac{b}{w}\right),$$

$$\mu_{m+j} = L_m(E) L_j(V) = \left(\frac{E}{b} - i\right) \left(1 - \frac{V}{w} + j \frac{b}{w}\right),$$

$$\mu_{i+k} = L_i(E) L_k(V) = \left(1 - \frac{E}{b} + i\right) \left(\frac{V}{b} - j\right),$$

$$\mu_{m+k} = L_m(E) L_k(V) = \left(\frac{E}{b} - i\right) \left(\frac{V}{b} - j\right),$$

$$C_{i+j} = (i+j)b = (k+i-1)b,$$

$$C_{m+j} = (m+j)b = (k+i)b,$$

$$C_{i+k} = (i+k)b = (k+i)b,$$

$$C_{m+k} = (m+k)b = (k+i+1)b,$$

$$U = \frac{\sum C_q \mu_q}{\sum \mu_q}.$$

Desenvolvendo, vem:

$$U = E + \frac{V(1 - j(\frac{b-w}{w}) + j^2 b(\frac{b-w}{w}))}{1 + (\frac{w-b}{wb})V + j(\frac{b-w}{w})}.$$

Para $j=0$ (partição central da variável V) obtém-se:

$$U = E + \frac{1}{1 + (\frac{w-b}{wb})V} V$$

Assim, considerando um controlador fuzzy PD tem-se:

$$u = g_d (g_e e + (\frac{g_v}{1 + (\frac{w-b}{wb})g_v v}) \frac{\Delta e}{T})$$

A correspondência com um controlador PD clássico é expressa através dos ganhos:

$$K_p = g_d g_e,$$

$$K_d = \frac{g_d g_v}{1 + (\frac{w-b}{wb})g_v v}.$$

Agora, nota-se um comportamento não linear porque o ganho derivativo depende do valor da variação do erro.

De maneira similar, tendo a variável E uma função com largura w, e mantendo-se todas as larguras da variável V em b, considerando novamente um controlador fuzzy PD obtém-se:

$$u = g_d \left(\left(\frac{g_e}{1 + \left(\frac{w-b}{wb} \right) g_e e} \right) e + g_v \frac{\Delta e}{T} \right). \quad (21)$$

Novamente, (21) mostra um comportamento não linear porque o ganho proporcional depende do valor do erro. O termo derivativo é linear porque partições uniformes são usadas para V e U. Definido b, o valor de w pode ser calculado para se estimar uma variação desejada nas características do sistema. Exemplificando, este controlador fuzzy com cinco termos nas partições das variáveis E e V, tendo $g_e=0.1$, $g_v=0.2$ ($g_d=1$), $b=0.5$, $w=0.1$ com a entrada do erro variando em $e=[0.1, 1]$, possui os ganhos equivalentes: $K_d=0.2$ (constante), e $K_p=[0.1, 0.5]$ alterando-se em função do erro. Assim, a frequência de canto (W_c) equivalente deste controlador fuzzy varia de aproximadamente 0.5 até 2.5 rd/s, e o módulo (assintoticamente) em baixa frequência tem uma variação aproximada de -20 até -6 dB. Agora, efetivamente as características do controlador se modificam com a intensidade dos sinais de entrada. Esses mesmos resultados também se aplicam em controladores fuzzy tipo PI ou PID. Parte dessas análises foram reportadas em Pinheiro e Gomide (1999_b).

Os resultados das análises efetuadas neste capítulo mostram que controladores fuzzy convencionais com ações lineares são obtidos quando se usam partições uniformes. As análises não consideram efeitos de saturação que podem ocorrer quando as variáveis do controlador estão próximas dos limites (bordas) dos universos de discurso. Quando as funções de pertinência não têm partições uniformes, o comportamento do controlador fuzzy torna-se não linear. No caso de ações lineares, é difícil justificar alguma melhora de performance dos controladores fuzzy no lugar de compensadores lineares clássicos. Entretanto, em sistemas dinâmicos que apresentam variações devido a alterações de parâmetros ou não linearidades, a utilização de leis de controle não lineares pode ser vantajosa. Assim, controladores fuzzy que contenham comportamentos não lineares podem produzir melhores resultados que os compensadores lineares. A formulação aqui desenvolvida permite estimar alguns parâmetros dos controladores fuzzy convencionais visando compensar sistemas que apresentem variações.

3.4 Resumo

É possível implementar, sob determinadas condições, controladores fuzzy convencionais com um mínimo de conjuntos fuzzy. Utilizando funções de pertinência triangulares, simétricas e de larguras iguais, obtém-se leis de controles equivalentes às de compensadores lineares clássicos. Se as funções de pertinência tiverem larguras diferentes, os controladores fuzzy terão seus ganhos alterados em função da magnitude dos sinais de entrada. As variações desses ganhos podem ser estimadas através de formulações simples. Então, para efeito de projeto e sintonia de sistemas de controle fuzzy, os fatores de escala dos controladores fuzzy convencionais influenciarão a dinâmica de malhas de controle. Porém, nem sempre é fácil obter resultados analíticos dos efeitos de diferentes tipos de funções de pertinência, regras, inferências, técnicas de defuzificação, etc. Assim um método que permita estimar quantitativamente essas características é de grande interesse.

Capítulo 4

Análise de sistemas de controle fuzzy no domínio da frequência

4.1 Introdução

No capítulo 2 foram mencionadas algumas referências que tratam os controladores fuzzy como sistemas não lineares. São vários os aspectos que contribuem para isto: formas e tipos de funções de pertinência; fatores de escala; limites dos universos de discurso; conjunto de regras; métodos de inferência; e técnicas de defuzificação. No capítulo 3 mostrou-se analiticamente que sob certas condições, é possível ajustar e estimar algumas características não lineares de controladores fuzzy convencionais. Entretanto, a obtenção de expressões analíticas genéricas para os diversos aspectos envolvidos não é uma tarefa trivial. Alguns pesquisadores têm empregado métodos de sistemas de controle não lineares em sistemas fuzzy, particularmente para análise de estabilidade. Na teoria de sistemas de controle, não existe um método geral para análise de sistemas não lineares. Entre as técnicas mais frequentemente citadas para sistemas fuzzy, estão os métodos de Lyapunov e das funções descritivas. Uma das dificuldades é obter equações diferenciais ou a diferenças, que representem os sistemas fuzzy para a utilização dessas técnicas. Em sistemas fuzzy do tipo T-S-K ou com matrizes relacionais, é possível obter aproximações por variáveis de estado (o que geralmente não ocorre com regras lingüísticas). Nestes casos o método de Lyapunov pode então ser aplicado caso seja resolvida outra dificuldade desta técnica, que é encontrar funções de Lyapunov adequadas. Em sistemas fuzzy com regras lingüísticas, as abordagens que utilizam o método da função descritiva encontram uma outra dificuldade, a de obter analiticamente as séries de Fourier envolvidas nesta técnica. Isto é fácil para sistemas não lineares relativamente simples. Porém, em sistemas complexos esta etapa não é trivial.

Atherton (1993) apresentou uma técnica numérica para avaliar a função descritiva em análise de estabilidade de sistemas de controle fuzzy com plantas lineares. A limitação deste método é que o sistema tem que apresentar simetria ímpar. Wang et al. (1993) relacionaram alguns métodos de identificação no domínio do tempo e da frequência. Eles desenvolveram uma

técnica usada em analisadores dinâmicos para a obtenção de funções de transferência de sistemas lineares e não lineares em geral. O método é baseado em técnicas de modulação, convolução, e filtragem digital de sinais. Os autores estabeleceram paralelos entre este método e a técnica da função descritiva. Taylor e Lu (1993) desenvolveram um procedimento numérico para obter a função descritiva de sistemas não lineares usando um algoritmo que necessita de testes de convergência das integrais numéricas envolvidas no processamento. Ele foi usado na análise de estabilidade e compensação de plantas não lineares, onde o compensador utilizado também era não linear.

Neste capítulo será apresentada uma técnica [Pinheiro e Gomide (1997)] para a obtenção de resposta em frequência de sistemas de controle fuzzy não lineares. Esta técnica não necessita de testes de convergência, condições de simetria ímpar, modulação, convolução, e filtros especiais. É fácil de implementar e apresenta resultados práticos promissores. A técnica baseia-se nos conceitos de função descritiva e transformada rápida de Fourier (FFT). Com este método torna-se mais fácil verificar as influências de diversos aspectos dos controladores fuzzy convencionais. Analisar condições de estabilidade de sistemas de controle fuzzy, e estabelecer procedimentos de sintonia tornam-se também factíveis.

4.2 Procedimento para obter a resposta em frequência de sistemas não lineares

Os métodos do domínio da frequência são muito empregados na análise e projeto de sistemas de controle desde o início dos fundamentos da teoria de controle. Formalizados inicialmente para sistemas lineares, foram desenvolvidas extensões para sistemas não lineares, variantes no tempo, multivariáveis, etc. A função descritiva é uma técnica do domínio da frequência que pode lidar com não linearidades simples ou múltiplas. Um sistema não linear pode ser representado através de uma função descritiva N (figura 12). O sistema sendo excitado com uma entrada tipo $x(t)=X\sin(Wt)$, tem sua saída expressa através de uma série de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(W_n t + \varphi_n). \quad (22)$$

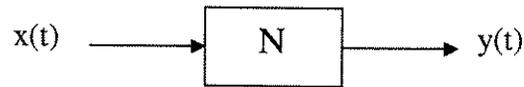


Figura 12. Função descritiva de sistema não linear.

Considerando apenas a frequência fundamental, vem:

$$y(t) = Y_1 \sin(Wt + \phi_1) , \text{ ou}$$

$$N = \frac{Y_1}{X} \angle \phi_1 . \quad (23)$$

Esta aproximação é aceitável pois as componentes harmônicas geralmente têm amplitudes menores que a fundamental. Além disso, a maioria das plantas reais apresenta características passa-baixa que atenuam essas componentes harmônicas. A resposta em frequência de sistemas não lineares depende tanto da frequência como da amplitude de entrada: $N(X,W)$. A obtenção da função descritiva ou resposta em frequência de sistemas não lineares está ilustrada na figura 13. Ela é facilmente implementada em linguagens de programação ou em sistemas de simulação. Seu procedimento numérico está indicado algoritmicamente nos passos a seguir.

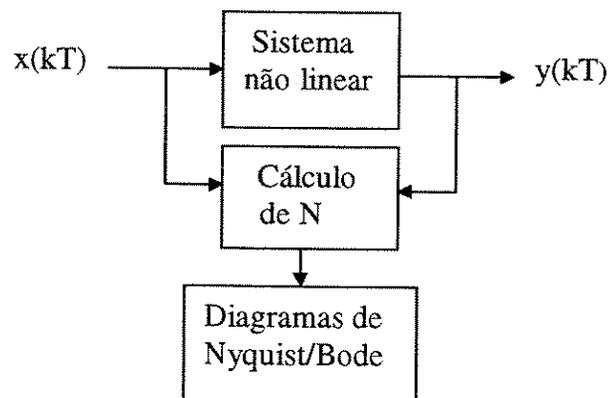


Figura 13. Resposta em frequência de sistema não linear.

[Passo 1]

A faixa de interesse de frequência (W) e amplitude (X) são definidas.

[Passo 2]

Sinais $x(kT)=X\sin(WkT)$ são gerados em alguns períodos de W , tendo A amostras por período (usando a taxa de amostragem $T=2\pi/WA$), com valores específicos de X e W .

[Passo 3]

Sinais $y(kT)$ são simulados, calculados, ou medidos durante alguns períodos de tempo.

[Passo 4]

Um ciclo de $y(kT)$ em regime permanente é armazenado. Se existirem variações de *offset*, corrigir para valores fixos, ou executar uma filtragem passa-faixa com ganho unitário e sem defasagem na banda passante.

[Passo 5]

Com este ciclo de $y(kT)$, executar um algoritmo de FFT. Para as componentes espectrais (W_n) obtidas, armazenar os valores de amplitude e fase da componente fundamental (W). Se necessário, converter o valor da fase ao quadrante adequado.

[Passo 6]

Para outros valores na faixa de interesse de X e W repetir os passos 2 até 5.

[Passo 7]

Com os valores das amplitudes e fases armazenadas, imprimir os valores da função descritiva, ou gerar diagramas de Nyquist / Bode.

A precisão dependerá do algoritmo de FFT, número de amostras, intensidade e periodicidade dos sinais. Como a maioria dos sistemas práticos apresenta comportamentos aproximadamente periódicos no tempo, o uso da FFT (definida para funções periódicas) é satisfatória. Para sistemas

não periódicos é possível usar a transformada wavelet [Chui (1992)] em vez da FFT. A transformada wavelet pode ser considerada uma extensão das transformadas de Fourier, servindo tanto para sinais periódicos como não periódicos.

4.2.2 Aplicação em sistema não linear

Para exemplificar a eficiência do procedimento que estima uma função descritiva (FD) genérica, ou a resposta em frequência de sistemas não lineares, será usada a função indicada pela figura 14. A figura 14(a) representa um sistema não linear e a figura 14(b) sua resposta no tempo. A expressão (24) é a FD analítica da figura 14(a) na forma de (23), com módulo (/ /) e fase (/ _). A tabela 5 contém valores exatos (N_E) desta função e os estimados numericamente (N_N) através dos dados da resposta no tempo do sistema. Neste trabalho foram usadas 256 amostras por período dos sinais, e a rotina FFT padrão do programa MATLAB™

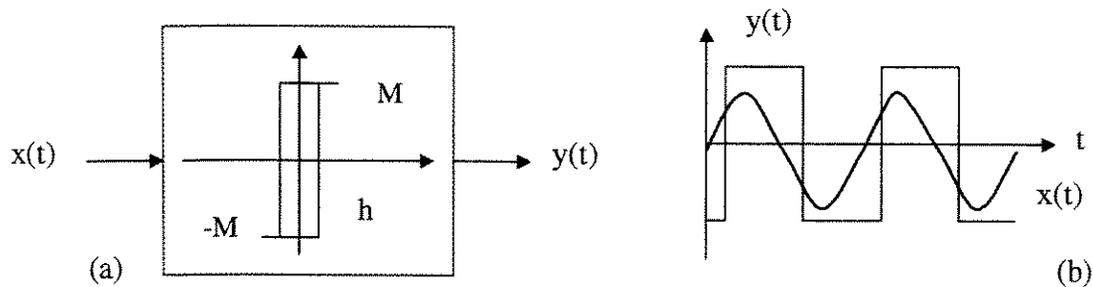


Figura 14. Exemplo de sistema não linear.

$$N = \frac{4M}{\pi X} \angle -\sin^{-1} \frac{h}{X} \quad (24)$$

Analisando os dados da tabela 5 para diferentes parâmetros do sistema não linear do exemplo, verifica-se que os resultados numéricos obtidos pelo procedimento são promissores. Os valores de módulo não divergem em três casas decimais, e os de fase de no máximo 1.8° (precisão satisfatória para análise e projeto de sistemas de controle, onde as fases variam

™ Marca registrada da Math Works, Inc.

tipicamente na faixa de 0^0 até $\pm 180^0$). A precisão pode ser melhorada aumentando-se o número de amostras, mas com um incremento no tempo de processamento da rotina FFT. Outros tipos de sistemas não lineares foram testados, obtendo-se precisão semelhante.

Tabela 5. Valores de FD exatos (N_E), e estimados numericamente (N_N).

M	h	X	$ N_E $	$\angle N_E$	$ N_N $	$\angle N_N$
1	0.5	1	1.273	-30.0	1.273	-31.6
1	0.7	1	1.273	-44.4	1.273	-45.7
2	0.3	1	2.546	-17.5	2.546	-18.9
2	0.3	0.5	5.093	-36.9	5.093	-38.7
1	0.5	2	0.637	-14.5	0.637	-16.2

4.2.3 Justificativas teóricas na aplicação do procedimento em controladores fuzzy

O método do item 4.2 foi proposto para estimar respostas em frequência de sistemas não lineares em geral e de sistemas de controle fuzzy em particular. A seguir, será justificada formalmente a idéia de se utilizar apenas informações das componentes fundamentais das respostas de controladores fuzzy durante a obtenção de suas características no domínio da frequência.

Para justificar teoricamente o uso de conceitos de resposta em frequência no procedimento proposto, assume-se um controlador fuzzy com a forma $u(t) = h(e(t), \Delta e(t)) = F(t)$. Recordando dos sistemas não lineares e da teoria de controle [Shahian e Hassul (1993), Vidyasagar (1993), Schwartz et al. (1996)], dois sistemas p e q com o mesmo sinal de entrada r são equivalentes se suas funções de correlação são tais que $\Psi_{r,p} = \Psi_{r,q}$, onde:

$$\Psi_{u,v} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)v(t+\tau)dt.$$

Em adição tem-se os seguintes resultados conhecidos, expressos aqui em uma forma conveniente para o propósito do trabalho:

Proposição 1 – Um controlador não linear F tem sua resposta em frequência caracterizada pela função f_1 , a componente fundamental da expansão de Fourier de F.

É fácil verificar a proposição. Considerando um controlador não linear F com entrada $r(t) = X \sin(Wt)$, sua função de correlação é

$$\Psi_{r,F} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T r(t) F(t + \tau) dt,$$

e expandindo F em série de Fourier tem-se

$$\Psi_{r,F} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X \sin(Wt) (C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(kW(t + \tau)) + B_k \cos(kW(t + \tau))) dt,$$

$$\begin{aligned} \Psi_{r,F} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T C_0 X \sin(Wt) dt + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\int_0^T X \sin(Wt) A_k \sin(kW(t + \tau)) dt + \int_0^T X \sin(Wt) B_k \cos(kW(t + \tau)) dt \right) dt + \\ \int_0^T X \sin(Wt) (A_1 \sin(W(t + \tau)) + B_1 \cos(W(t + \tau))) dt \end{aligned}$$

Claramente, a primeira integral e a do somatório são ambas nulas. Assim

$$\Psi_{r,F} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X \sin(Wt) (A_1 \sin(W(t + \tau)) + B_1 \cos(W(t + \tau))) dt.$$

Que denotando por f_1 o termo fundamental da expansão da série de Fourier de F, vem

$$\Psi_{r,F} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T r(t) f_1(t + \tau) dt = \Psi_{r,f_1}.$$

Portanto, para uma entrada senoidal, o controlador F tem sua resposta equivalente a descrita por f_1 , a primeira componente harmônica. Note-se que a similaridade da correlação dos sistemas não implica em igualdade, mas sim, do ponto de vista de análise tomado neste trabalho, que as características de suas respostas em frequência estão correlacionadas no sentido que o comportamento de F pode ser previsto do comportamento de f_1 . Isto é bastante importante porque significa que a técnica de balanço harmônico também tem um papel importante em sistemas de controle não lineares. Assim, conclui-se da Proposição 1 que conceitos do domínio

da frequência podem ser usados para analisar e projetar controladores fuzzy não lineares. A proposição seguinte mostra que a análise e projeto de sistemas não lineares podem ser realizadas similarmente como se faz para sistemas lineares.

Proposição 2 – A resposta $Fr(t)$ de um controlador não linear F para uma dada entrada r , é equivalente à resposta $Cr(t)$ de um compensador linear C , no sentido ótimo da minimização do critério de erro quadrático:

$$E(C) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (Fr(t) - Cr(t))^2 dt.$$

Para prontamente verificar a proposição, seja G um sistema linear invariante no tempo. Assim, a resposta $Gr(t)$ do sistema para uma função de entrada r é definida através da convolução

$$Gr(t) = \int_0^t G(t-\tau)r(\tau)d\tau.$$

Definindo $Dr(t)$ como segue

$$Dr(t) = Gr(t) - Cr(t) = \int_0^t D(t-\tau)r(\tau)d\tau,$$

tem-se

$$E(G) - E(C) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T ((Fr(t) - Gr(t))^2 - (Fr(t) - Cr(t))^2) dt,$$

ou

$$E(G) - E(C) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (Dr(t)^2 + 2Dr(t)(Cr(t) - Fr(t))) dt.$$

Claramente, C minimiza o critério de erro se e somente se $E(G) \geq E(C)$. Desde que a expressão anterior é não negativa, este é o caso se e somente se o termo linear $Dr(t)$ é nulo, o qual é

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T Dr(t)(Cr(t) - Fr(t)) dt = 0.$$

Seja $e(t) = Cr(t) - Fr(t)$. Da expressão acima tem-se

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^t D(\tau)r(t-\tau)e(t)d\tau dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^T r(t-\tau)e(t)dt \right) D(\tau)d\tau = 0.$$

Como $D(\cdot)$ é uma resposta arbitrária ao impulso, o fator que multiplica $D(\tau)$ precisa ser zero, assim

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{\tau}^T r(t-\tau)e(t)dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T r(t)e(t+\tau)dt = \psi_{r,e} = 0, \quad \forall \tau \geq 0,$$

de onde conclui-se que $\psi_{r,e} = 0 = \psi_{r,C} - \psi_{r,F}$, ou $\psi_{r,F} = \psi_{r,C}$.

Portanto, C é a melhor aproximação de F para uma dada entrada r . A resposta de um sistema não linear geralmente depende tanto da frequência como também da magnitude dos sinais de entrada. O que a Proposição 2 mostra é que, para uma dada amplitude de entrada, um controlador não linear é equivalente (no mesmo sentido como explicado anteriormente) a um compensador linear. Para diferentes amplitudes de entrada o controlador não linear equivale a um controlador linear com parâmetros variáveis (uma forma de adaptação). Pensando em resposta em frequência como uma ferramenta de análise e sintonia, isto significa que pode-se projetar um controlador fuzzy não linear, pensando em termos de comportamento, similarmente ao que se faz com compensadores lineares no domínio da frequência. A próxima seção explica e mostra a utilidade de métodos de resposta em frequência na análise de controladores fuzzy.

4.3 Análise de controladores fuzzy no domínio da frequência

Os métodos do domínio da frequência aplicados a sistemas fuzzy foram praticamente usados somente em análise de estabilidade. Agora, utilizando o procedimento e considerações dos itens anteriores deste capítulo, serão obtidas respostas em frequência de controladores fuzzy baseados em regras. Elas servirão para indicar as influências de aspectos como: tipos e formas de funções de pertinência; fatores de escala; conjunto de regras; métodos de inferência; etc. Inicialmente, serão usadas funções de pertinência triangulares (partição uniforme), com os limites dos universos de discurso normalizados em $[-1, +1]$, e cinco grânulos em cada partição para cada variável (tabela 6). As estruturas dos controladores fuzzy serão semelhantes aos das figuras² 2 e 6(a), usando composição max-min, e defuzificação com o método da altura. As amplitudes de entrada são $X=e=1$. Qualquer outra alteração será indicada no texto.

² Páginas 14 e 24.

Tabela 6. Exemplo de base de regras.

U		E				
		NL	NM	ZE	PM	PL
V	NL	NL	NL	NL	NM	ZE
	NM	NL	NL	NM	ZE	PM
	ZE	NL	NM	ZE	PM	PL
	PM	NM	ZE	PM	PL	PL
	PL	ZE	PM	PL	PL	PL

- *Influência de fatores de escala (ganhos):*

Um controlador fuzzy (CF) tipo PI, semelhante ao da figura 6(a), tem os diagramas de Bode da figura 15. Os gráficos correspondem aos seguintes ganhos de escala: $g_v=0.05$ e $g_e=0.1$, $g_v=0.1$ e $g_e=0.1$, $g_v=0.1$ e $g_e=0.025$. Observando os gráficos é fácil notar a semelhança com um PI clássico (equações (16), (17) nas páginas 29, 30, e apêndice). As frequências de canto são $W_c=g_v/g_e$ (0.5; 1; 4 rd/s respectivamente)^{a, b, c}, nos pontos onde as curvas das fases estão em -45° . Os valores das curvas dos módulos para frequências altas são $M_d=20\log_{10}g_e$ (-20, -20, -32 dB respectivamente)^{a, b, c}. As inclinações das curvas dos módulos são de -20 dB/década:

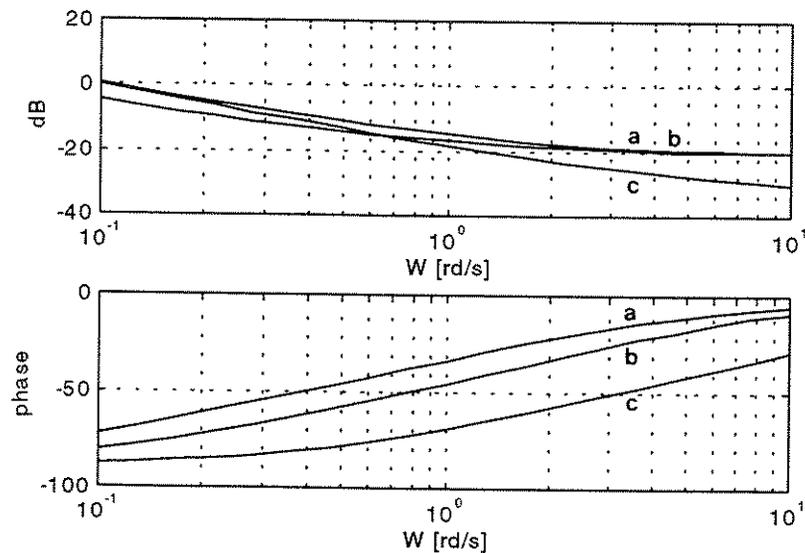


Figura 15. Diagramas de Bode de um CF-PI para diferentes ganhos.

Um CF tipo PD, semelhante ao da figura 2, usando os ganhos $g_e=0.05$ e $g_v=0.1$, $g_e=0.1$ e $g_v=0.1$, $g_e=0.1$ e $g_v=0.025$, tem as respostas em frequência da figura 16. É fácil observar a semelhança com um PD clássico. As frequências de canto são $W_c=g_e/g_v$ ($0.5; 1; 4$ rd/s)^{a, b, c}, nos pontos onde as curvas das fases estão em $+45^\circ$. As curvas dos módulos para frequências baixas estão em $M_d=20\log_{10}g_e$ ($-26, -20, -20$ dB)^{a, b, c}. As inclinações das curvas dos módulos são de $+20$ dB/década:

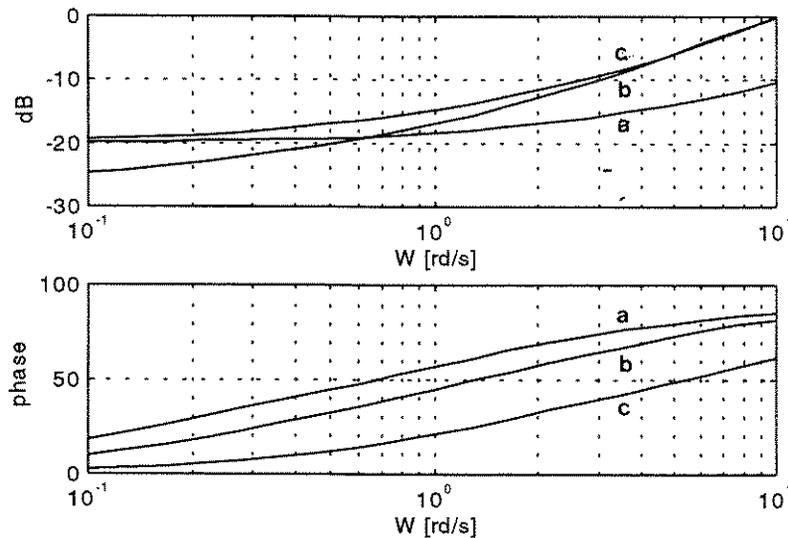


Figura 16. Diagramas de Bode de um CF-PD para diferentes ganhos .

As curvas das figuras 15 e 16 permanecem análogas para outras amplitudes com valores na faixa $X=[0.1, 1]$. Nesta faixa de operação e com os ganhos de escala usados, estes controladores fuzzy possuem comportamentos essencialmente lineares. Curvas para um CF-PID podem ser geradas da mesma forma. Se as variáveis de um controlador fuzzy ultrapassarem os valores limites dos universos de discurso, ocorrem efeitos de saturação. Um CF-PD ($g_e=g_v=0.1$) tem as respostas em frequência da figura 17 para amplitudes $X=[1; 3]$ ^{d, e}. Um comportamento de saturação ocorre na entrada de maior magnitude. Este efeito pode ser minimizado aumentando-se os valores limites dos universos de discurso.

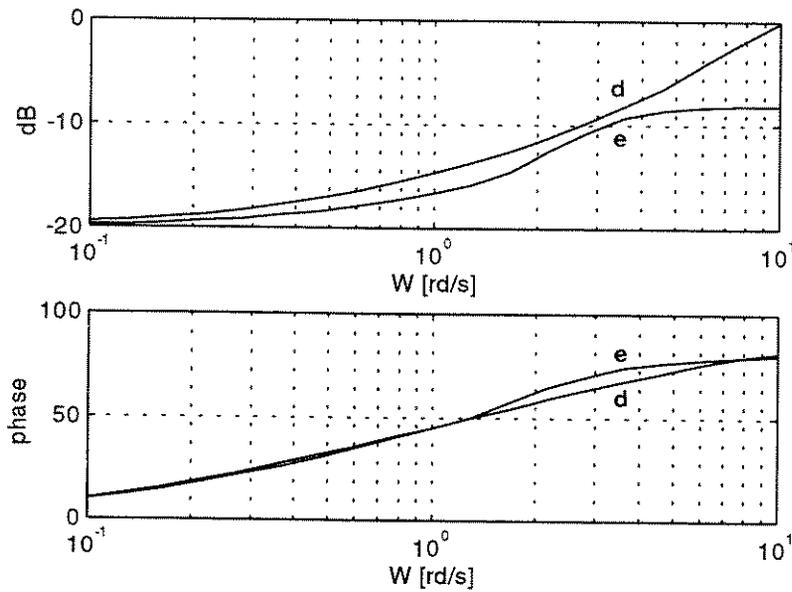


Figura 17. Efeito de saturação em um CF-PD devido a amplitude de entrada.

- Influência de métodos de inferência:

Os métodos de composição mais usados em controladores fuzzy convencionais são max-min e max-produto. Um CF-PD ($g_e=g_v=0.1$) com essas composições tem os diagramas de Bode da figura 18. As respostas possuem comportamentos semelhantes: $W_c=1$ rd/s e $M_d=-20$ dB. E conforme a previsão resultante das análises teóricas do capítulo 3, o comportamento de controladores fuzzy convencionais com funções de pertinência de partição uniforme não apresenta alterações significativas devido a modificações nas amplitudes de entrada (no caso $X=[0.1, 1]$), desde que as mesmas tenham valores dentro dos respectivos universos de discurso.

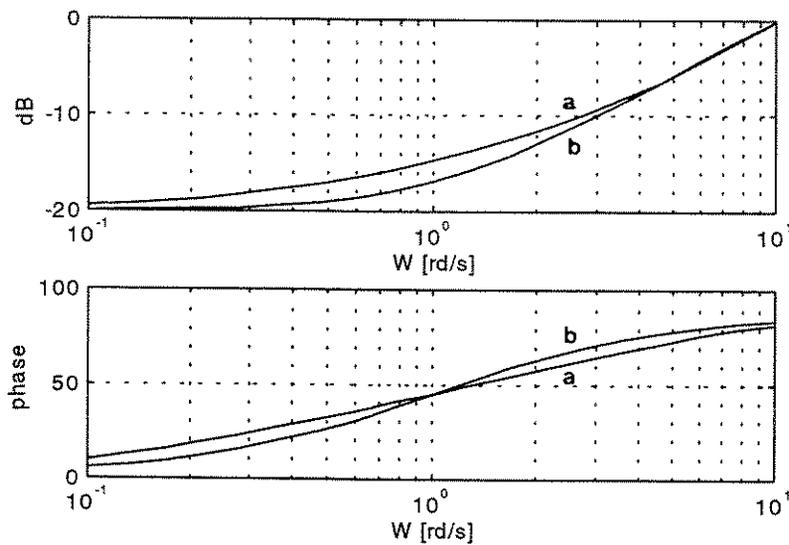


Figura 18. Respostas do CF-PD com composições max-min^a e max-produto^b.

- Influência do número de regras:

Uma base de regras semelhante à da tabela 6, pode ser reduzida (ampliada) utilizando partições com números menores (maiores) de grânulos conforme a tabela 7 (tabela 2), seguindo uma distribuição simétrica dessas regras. Para os mesmos universos de discurso em $[-1, +1]$, observa-se na figura 19, que as respostas em frequência de um CF-PD ($g_e=g_v=0.1$, composição max-produto) com 3, 5, e 7 grânulos são praticamente as mesmas. Porém, alterações no arranjo das regras na tabela (posições diferentes dos consequentes), podem gerar respostas diversas. Isto será mostrado no capítulo 5.

Tabela 7. Base de regras reduzida.

U		E		
		N	Z	P
V	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

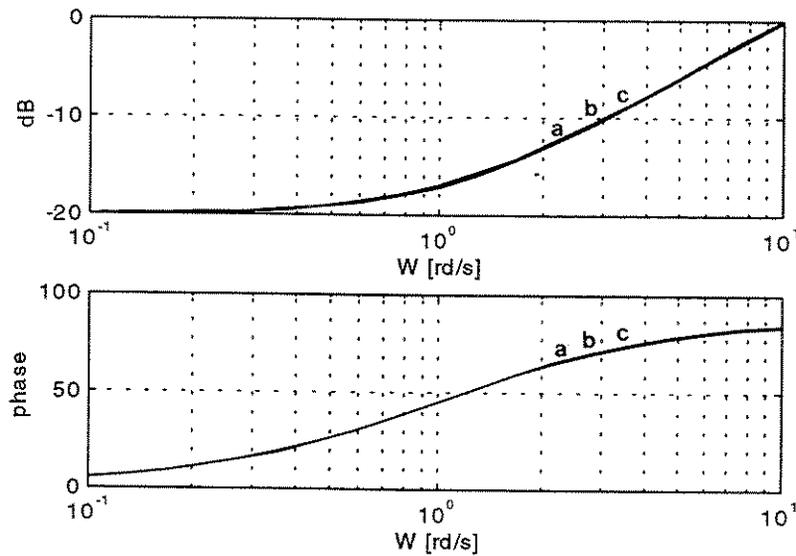


Figura 19. Respostas de um CF-PD com 3, 5, e 7 grânulos^{a, b, c} nas suas variáveis.

- Influência do tipo e forma de funções de pertinência:

As funções de pertinência (FP) tipo triangulares e Gaussianas são muito utilizadas em controladores fuzzy. Uma comparação entre as respostas de um CF-PD ($g_e=g_v=0.1$, composição max-produto), com FP triangulares (partição uniforme), e Gaussianas está na figura 20. As funções Gaussianas são do tipo:

$$FP(x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{D_0} \right)^2} \quad (25)$$

Os valores modais (x_0) das funções estão em -1, -0.5, 0, 0.5, e 1 respectivamente, e as dispersões em $D_0=0.3$ (valor que as aproxima de funções de pertinência triangulares). Assim, as respostas resultantes são bem semelhantes. Porém, outros valores de desvios, posições, ou larguras podem gerar respostas diferentes. Exemplificando, um CF-PD ($g_e=0.1$ e $g_v=0.2$) com FP da figura 21 (as variáveis V e U permanecem com FP de larguras iguais), tem as respostas em frequência da figura 22. Uma resposta é para a amplitude de entrada $X=0.1$ obtendo-se $W_c=0.5$ rd/s e $M_d=-20$ dB, a outra é para a amplitude $X=1$ obtendo-se $W_c \approx 2$ rd/s e $M_d \approx -9$ dB. Esses valores estão próximos dos resultados estimados teoricamente no item 3.2 usando-se $b=0.5$ e $w=0.1$.

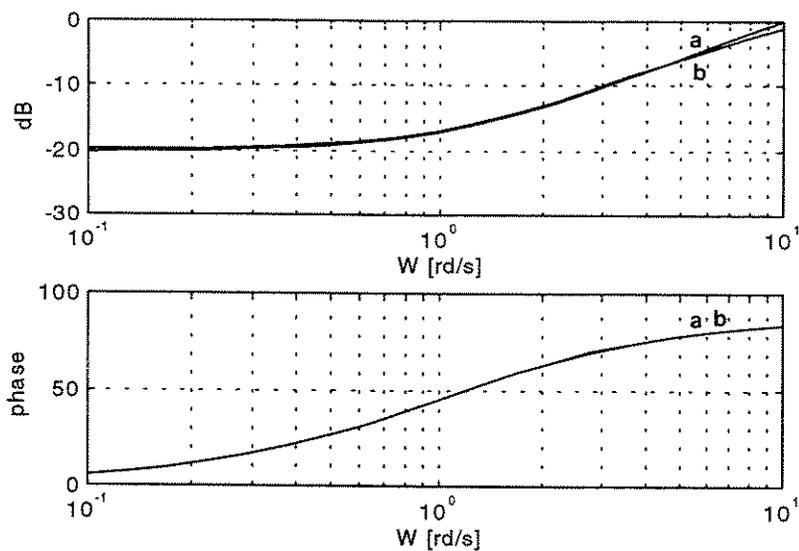


Figura 20. Respostas de um CF-PD com FP triangulares^a e Gaussianas^b aproximadamente iguais.

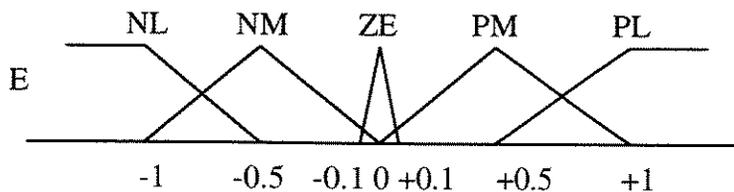


Figura 21. FP com larguras diferentes.

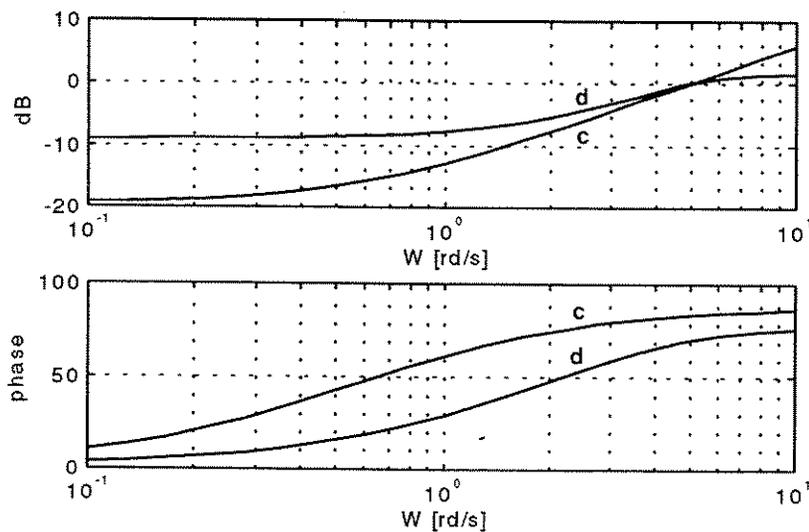


Figura 22. Respostas de um CF-PD dependente da amplitude de entrada $X=[0.1; 1]$ ^{c, d}.

As alterações das características de controladores fuzzy em função das amplitudes das entradas poderão servir para compensação de sistemas não lineares, já que eles geralmente também tem suas respostas dependentes da magnitude das entradas.

Foram experimentadas funções de pertinência trapezoidais, técnicas de defuzificação como a média dos máximos e outras, que não apresentaram modificações significativas nas características (em primeira harmônica) dos controladores fuzzy convencionais.

O procedimento para obter respostas em frequência de sistemas não lineares também serve para analisar controladores fuzzy com regras funcionais, ou baseados em equações relacionais. O controlador fuzzy tipo T-S-K representado por (7), (8), (9), e figura 3 (páginas 15 e 16), tem o diagrama de Bode indicado na figura 23. Verifica-se o comportamento de avanço de fase do sistema. No exemplo foram usados os seguintes coeficientes: $g_{e1}=2$, $g_{v1}=0.5$, $g_{e2}=1.21$, $g_{v2}=1.67$.

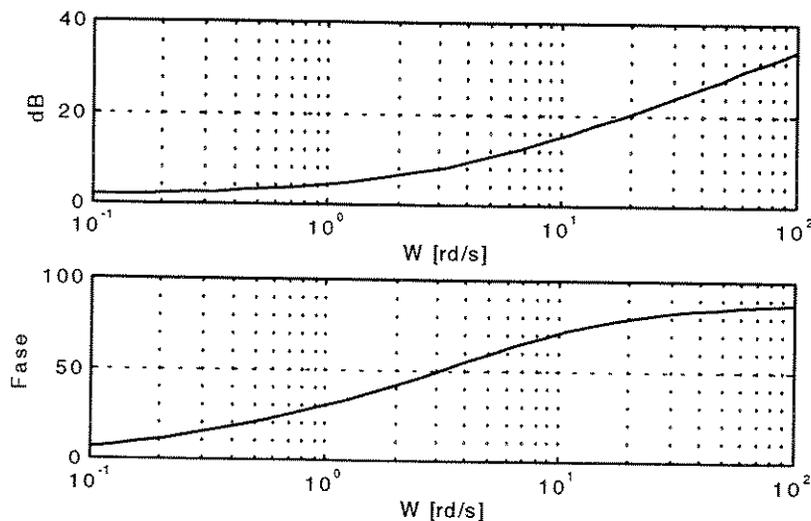


Figura 23. Resposta de um CF tipo T-S-K com avanço de fase.

4.4 Análise de estabilidade de sistemas de controle fuzzy

A maioria das referências que usam métodos do domínio da frequência em sistemas de controle fuzzy têm por objetivo realizar análise de estabilidade. Geralmente os processos controlados são lineares, ou têm seus modelos linearizados, e os controladores fuzzy, como

podem apresentar características não lineares, são tratados por métodos do tipo Popov, critério do círculo, ou função descritiva. No método da função descritiva frequentemente são empregados gráficos no plano complexo, que são extensões de diagramas de Nyquist, construídos a partir das funções do processo $G(j\omega)$ e do controlador não linear $N(X, \omega)$ da malha de controle (figura 24). Com o procedimento do item 4.2 é fácil obter numericamente a função descritiva equivalente de um controlador fuzzy, ou os seus respectivos diagramas de Nyquist / Bode, e assim realizar a análise de estabilidade (exemplo 1) e a sintonia do sistema de controle.

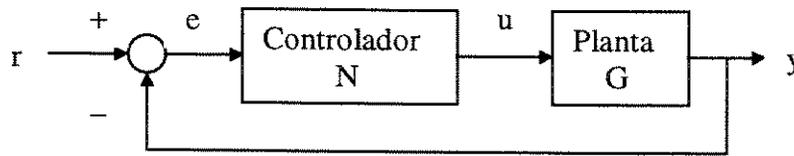


Figura 24. Malha de controle básica.

Exemplo 1:

Deseja-se analisar a estabilidade de uma malha de controle que tem uma planta representada por (26) e um controlador fuzzy tipo PD com os ganhos $g_e=0.36$ e $g_v=0.083$ ($g_d=1$). A entrada do sistema pode variar na faixa $[0.1, 1]$.

$$\ddot{y} + 8\dot{y} + 15y = 100u \quad (26)$$

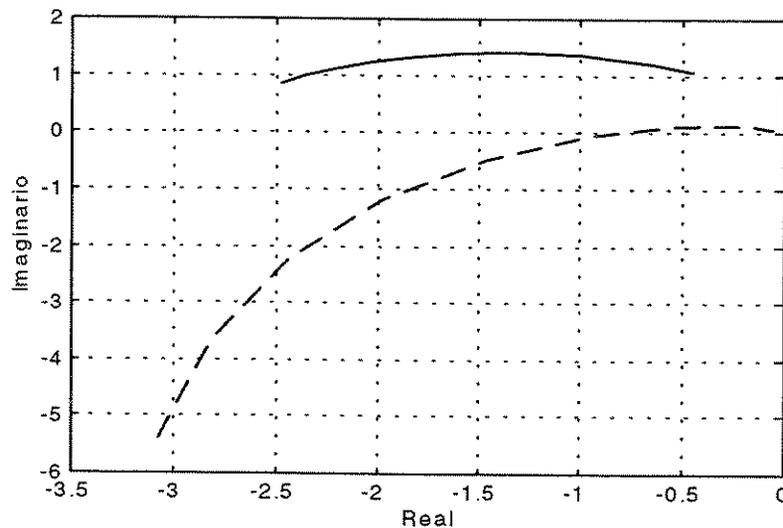


Figura 25. Diagrama de Nyquist do sistema de controle fuzzy.

O diagrama de Nyquist do sistema está indicado na figura 25 para $X=1$ e $1 < W < 10$ rd/s, onde a curva de linha tracejada representa a função do processo $G(jW)$ e a curva de linha cheia, a função do controlador fuzzy $1/N(X,W)$, na qual não há praticamente alterações em $N(X,W)$ na faixa $X=[0.1, 1]$. Como as curvas $G(jW)$ e $1/N(X,W)$ não se interceptam, pelo critério de Nyquist o sistema é estável. Na utilização de diagramas de Bode, a estabilidade é interpretada através de valores de margem de fase e frequência de cruzamento de ganho. No próximo item será visto como obter informações sobre a dinâmica e condições de sintonia de sistemas de controle fuzzy.

4.5 Características dinâmicas de sistemas de controle fuzzy e princípios de sintonia

Através das informações de resposta em frequência de sistemas de controle, é relativamente fácil estimar suas características dinâmicas. É bem conhecido da teoria de controle que a informação de margem de fase (MF) está relacionada com a máxima sobrelevação (M_s) da resposta temporal de um sistema e que a frequência de cruzamento de ganho (W_{cg})³ relaciona-se com o tempo de acomodação (T_a). Mesmo não mantendo uma proporcionalidade em sistemas lineares, geralmente um incremento na margem de fase reduz a sobrelevação e um aumento na frequência de cruzamento de ganho diminui o tempo de acomodação (estas relações estão resumidas no apêndice). Um sistema tende a ser estável quando sua fase é maior que -180° no ponto de frequência igual a W_{cg} , sendo a MF a diferença do valor da fase para -180° neste ponto (figura 26). Estas considerações também são válidas para sistemas não lineares. Logo, também servem para estimar o comportamento de sistemas de controle fuzzy e ajustar os parâmetros dos seus controladores objetivando a sintonia das suas malhas de controle. Conforme visto no capítulo 3 e no item 4.3, os fatores de escala de controladores fuzzy convencionais guardam uma grande semelhança com ganhos de compensadores lineares tipo PD, PI, e PID. Assim, as técnicas de sintonia clássicas podem também ser úteis para estimar os ganhos de controladores fuzzy.

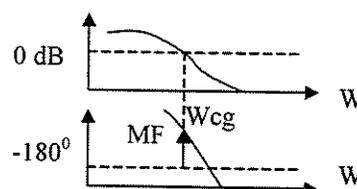


Figura 26. Definição de W_{cg} e MF.

³ Valor onde o módulo passa por 0 dB.

Exemplo 2:

Para a planta modelada através da equação (26), deseja-se que um sistema de controle fuzzy tenha uma margem de fase em 60° , com uma frequência de cruzamento de ganho de 2 rd/s, e uma resposta temporal (para entradas de referência tipo degrau), com máxima sobre-elevação menor que 20%, e um tempo de acomodação igual ou menor que 4s.

Neste exemplo, como a planta é linear, pode-se usar métodos clássicos para obter a resposta em frequência da mesma (figura 27). Os ganhos de um compensador linear podem ser calculados, por exemplo, através da expressão (27) [Shahian e Hassul (1993)]:

$$\frac{e^{j(MF-180^\circ)}}{G(jW_{cg})} - \frac{K_i}{jW_{cg}} = R + jI = K_p + jW_{cg}K_d,$$

$$K_p = R \quad , \quad K_d = \frac{I}{W_{cg}} . \quad (27)$$

O ganho integral (K_i) está relacionado com o tipo (número de pólos na origem) do sistema e com o erro estacionário (e_s) para respostas ao degrau, rampa, e parábola, onde $(jW)^n K_i G(jW)_{w=0} = 1/e_s$. Com K_i definido, calculando o valor complexo $R+jI$, os ganhos proporcional (K_p) e derivativo (K_d) são determinados. Então, esses ganhos são atribuídos aos fatores g_e , g_v , g_d e g_i de um controlador fuzzy convencional conforme a estrutura PD ou PID usada. Como o sistema têm um pólo na origem, o erro em regime permanente tende a zero, não sendo necessária a parte integral. Da figura 27 obtém-se $G(j2) \approx 8 \text{ dB} / _ -145^\circ$:

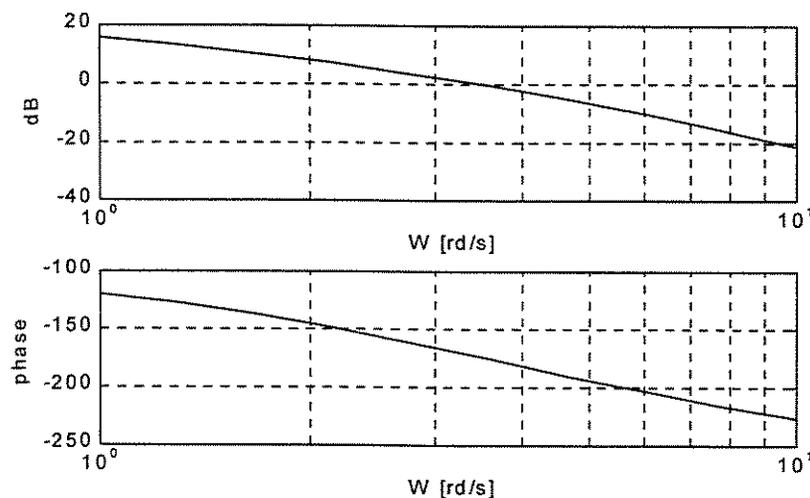


Figura 27. Diagrama de Bode da planta modelada através da equação (26).

Para um PD ($K_i=0$), usando as expressões de (27), vem $K_p=g_e=0.36$, e $K_d=g_v=0.083$ ($g_d=1$). Esses valores, em um controlador fuzzy convencional tipo PD, levam à resposta no tempo da figura 28. As características dinâmicas estão dentro do especificado: sobreelevação próxima de 10% e tempo de acomodação próximo de 2.5s. Essas características se mantêm para uma faixa de referência em $r = [0.1, 1]$. Como os limites dos universos de discurso estão em $[-1, +1]$, as variáveis do controlador terão limitações de valores nesta faixa. Para uma referência em $r = 4$, tem-se a resposta normalizada (y/r) do sistema indicada na figura 29. Em relação à figura 28, verifica-se uma resposta com uma M_s menor, e um tempo de acomodação um pouco maior. Isto se deve a um efeito de saturação relacionado aos limites dos universos de discurso. Utilizando o procedimento do item 4.2, tem-se na figura 30 os diagramas de Bode do sistema para as amplitudes $X=[1; 4]$ correspondentes às referências r . A curva superior de módulo é praticamente constante para amplitudes na faixa $X=[0, 1]$, e a informação da fase praticamente não sofre alterações significativas, mas para amplitudes maiores ($X > 1$) a curva de magnitude tem variações, como em $X=4$ caracterizando um sistema com saturação. Para a faixa $X=[0.1, 1]$ é fácil verificar que as especificações no domínio da frequência são atingidas ($MF=60^\circ$ e $W_{cg}=2$ rd/s). Para a curva de módulo de $X=4$ ocorre um aumento da MF e diminuição da W_{cg} , o que explica a diminuição da M_s e um pequeno aumento no T_a , mas a estabilidade continua preservada pois a margem de fase aumentou. Esse efeito de saturação é ajustado alterando-se os limites dos universos de discurso e pode ser útil em sistemas de controle que devam ter algum tipo de limitação de comando.

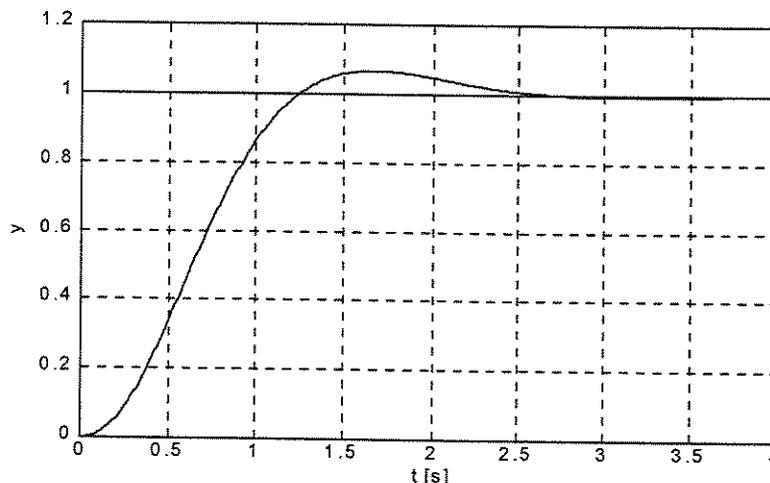


Figura 28. Resposta no tempo do sistema de controle fuzzy para $r = 1$.

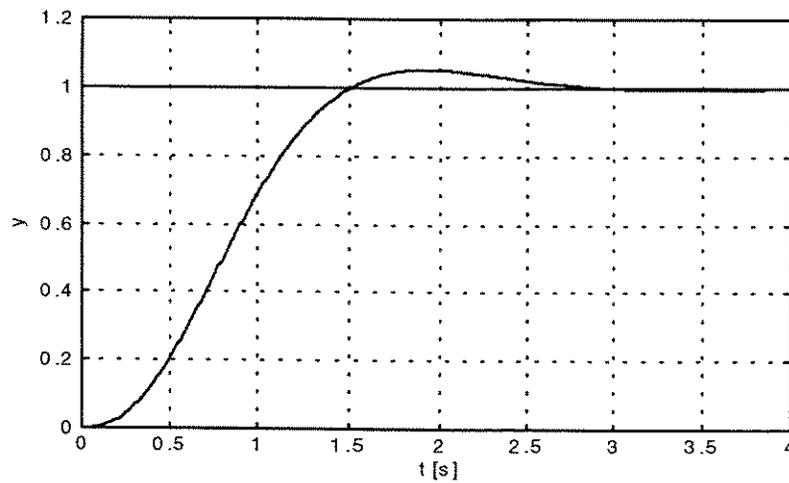


Figura 29. Resposta normalizada (y/r) do mesmo sistema de controle fuzzy para $r=4$.

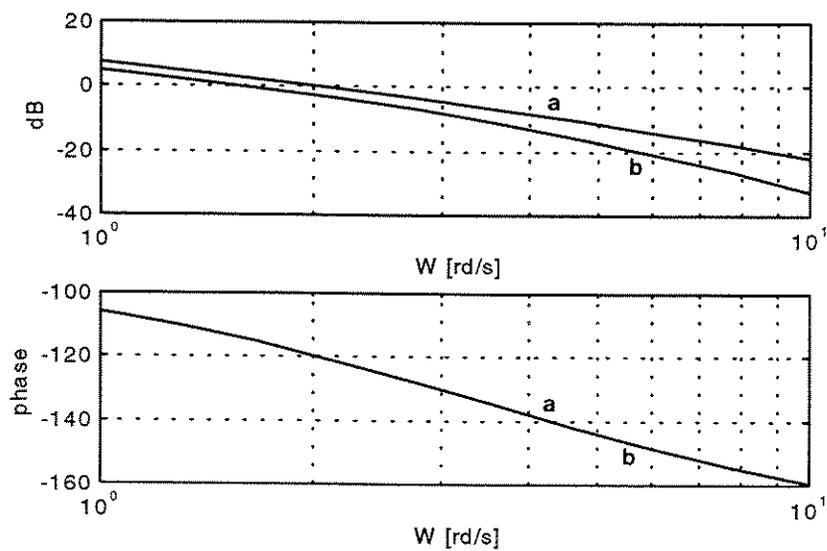


Figura 30. Diagramas de Bode do sistema de controle fuzzy para $X=1^a$ e $X=4^b$.

Exemplo 3:

Alguns sistemas de amortecimento, dispositivos hidráulicos de posicionamento, ou mecanismos de transmissão mecânica têm modelos não lineares análogos às expressões (28). Para uma malha de controle com este modelo, deseja-se atender as seguintes especificações: $MF \approx 65^\circ$ e $W_{cg} \approx 1.5$ rd/s ($M_s < 20\%$ e $T_a < 8$ s). A referência está na faixa de $r = [0.1, 1]$.

$$\ddot{x} + 4\dot{x} + 3x^3 = 20u ,$$

$$y = \int x dt . \quad (28)$$

Compensadores lineares tradicionais do tipo PID podem não atender as especificações para toda a faixa de operação da referência, pois o comportamento de sistemas não lineares é dependente das amplitudes das entradas. Respostas em frequência do modelo expresso por (28), para amplitudes de entrada em $X=[0.1; 1]$, estão na figura 31:

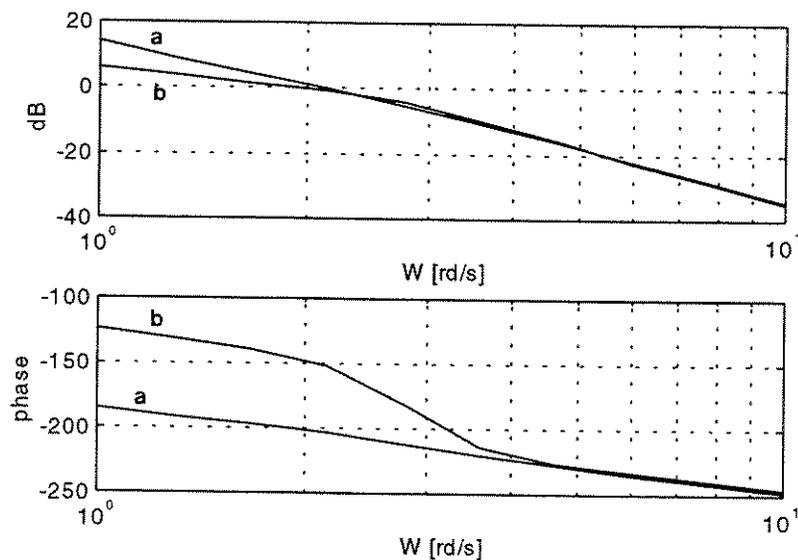


Figura 31. Respostas do processo modelado por (28) para $X=[0.1; 1]^{a,b}$.

Controladores fuzzy com características não lineares geralmente podem ser úteis para tais sistemas. Neste exemplo, um controlador de avanço de fase (PD) é adequado para compensar o processo. Como a fase da planta aumenta com a amplitude de comando, é necessário um compensador que aumente sua frequência de canto também em função da amplitude. O CF-PD modelado pela expressão (21) deduzida no capítulo 3 (página 37) tem esta característica. Juntamente com a equação (27), servirá para estimar os ganhos do controlador fuzzy a fim de se cumprir as especificações desejadas. Verifica-se através de (21) que, para amplitudes pequenas, o ganho da parte proporcional é dado por g_e . Assim é possível calcular os ganhos através da resposta do processo para a menor amplitude ($X=0.1$). Da figura 31 obtém-se $G(j1.5) = 10 \text{ dB} / -187^\circ$, que em (27) fornece $K_p=g_e=0.1$, e $K_d=g_v=0.2$ ($g_d=1$). Em um compensador clássico isto

leva a uma frequência de canto de $W_c=0.5$ rd/s, e uma fase em torno de 72° para $W_{cg}=1.5$ rd/s. Na compensação da curva de fase para a maior amplitude ($X=1$), o controlador deve ter agora uma fase próxima de 22° , o que leva a um deslocamento da frequência de canto para $W_c \approx 2.5$ rd/s. Assim, mantendo-se $K_d=0.2$, vem $K_p=0.5$, que, na equação (21) com $b=0.5$, fornece $w=0.1$ para $e=1$. Respostas em frequência do sistema compensado estão na figura 32 para amplitudes $X=[0.1; 1]$. Observa-se que as especificações foram razoavelmente atingidas: $55^\circ < MF < 72^\circ$ e $1.25 < W_{cg} < 1.5$ rd/s. Essas curvas são a soma aproximada dos gráficos da figura 31 com os da figura 22, gerando:

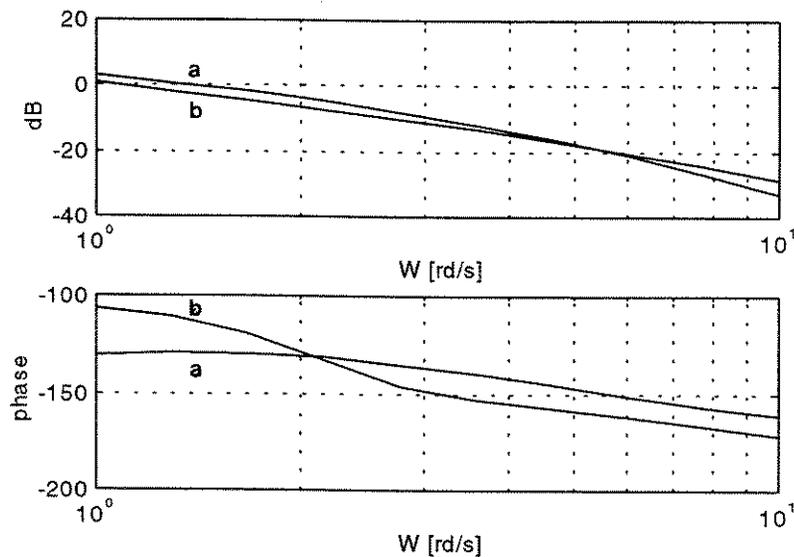


Figura 32. Respostas do sistema de controle fuzzy compensado para $X=[0.1; 1]^a, b$.

Respostas temporais normalizadas do sistema de controle em malha fechada estão na figura 33. Observa-se que as especificações de máxima sobrelevação e tempo de acomodação estão dentro da faixa desejada: $M_s < 20\%$ e $T_a < 8s$ (referências em $r = [0.1; 0.5; 1]$).

Parte das análises realizadas neste capítulo estarão reportadas em Pinheiro e Gomide (2000).

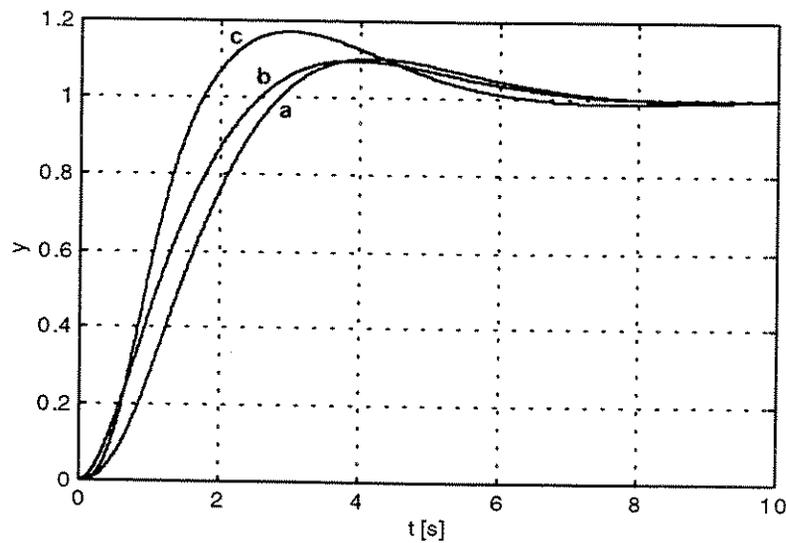


Figura 33. Respostas normalizadas (y/r) do sistema fuzzy para $r = [0.1; 0.5; 1]^{a, b, c}$.

4.6 Resumo

Este capítulo apresentou um procedimento numérico para obtenção da resposta em frequência de sistemas não lineares em geral, e de sistemas fuzzy em particular. Foram apresentadas justificativas teóricas para o emprego do método em sistemas fuzzy. Demonstrou-se que controladores fuzzy que possuam características não lineares podem ser vistos como conjuntos de compensadores lineares que atuam em função da magnitude de suas entradas.

Utilizou-se o procedimento proposto para obter as características de resposta em frequência de controladores fuzzy convencionais, analisando as influências de fatores diversos como: funções de pertinência; ganhos de escala; métodos de inferência; etc.

Com informações de resposta em frequência de sistemas de controle fuzzy é possível analisar condições de estabilidade, estimar características dinâmicas, e sintonizar malhas de controle. Assim, é possível efetuar o projeto e ajuste dos parâmetros de controladores fuzzy de forma sistemática, objetivando atingir as especificações de controle desejadas.

Foram apresentados alguns exemplos numéricos que mostraram a praticabilidade de se utilizar técnicas do domínio da frequência em sistemas de controle fuzzy. Eles serviram também para mostrar a qualidade dos resultados obtidos com as técnicas utilizadas. Foram comprovadas experimentalmente (através de simulações) algumas previsões teóricas.

Nos próximos capítulos serão apresentados métodos que permitem sistematizar ainda mais o projeto de sistemas de controle fuzzy em condições genéricas de processos não lineares, em plantas com incertezas ou variações em parâmetros, e em sistemas de múltiplas entradas e saídas.

Capítulo 5

Projeto de controladores fuzzy em processos não lineares determinísticos

5.1 Introdução

Em sistemas determinísticos, mesmo conhecendo-se com razoável certeza os coeficientes das equações que os modelam, são de especial interesse os sistemas não lineares. Estes sistemas têm suas respostas dinâmicas dependentes da magnitude dos sinais das entradas. Isto leva à necessidade de métodos de projeto e técnicas de controle mais elaboradas que as tradicionais. Não existe um método genérico para projeto de sistemas de controles não lineares. Várias técnicas tem sido empregadas com sucesso: controles adaptativos; *sliding mode control*; QFT (*Quantitative Feedback Theory*); controladores fuzzy e neurais; etc. Nos controles adaptativos são necessários mecanismos de identificação que estimam parâmetros e eventualmente o estado corrente dos processos para adaptar as leis de comando. Em sistemas de controle não lineares tipo *sliding mode*, é necessário obter determinadas condições que garantam o chaveamento adequado nas estruturas dos controladores. O método QFT modela as não linearidades do processo controlado como entradas de perturbações que devem ser rejeitadas (porém, nem sempre é fácil obter esses modelos). Os controladores fuzzy e neurais geralmente usam técnicas de aprendizado para obter a função inversa do processo, ou para aprender o comportamento de controladores conhecidos, ou usam modelos de referência e técnicas de identificação. Entretanto, nem sempre existe a função inversa do processo e muitas vezes não é fácil obter um controlador equivalente conhecido, e os controladores neurais e fuzzy com identificação *on-line* são tipos especiais de controladores adaptativos.

5.2 Controladores com ganhos não lineares

Taylor e Strobel (1985) propuseram um método para compensar plantas não lineares usando controladores PID com ganhos variáveis (figura 34):

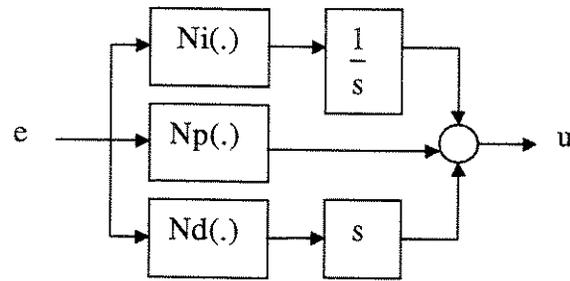


Figura 34. Compensador PID com ganhos variáveis.

A partir das informações de respostas em frequência da planta não linear a ser controlada, são calculados conjuntos de ganhos de compensadores lineares convencionais tipo PID. Esses ganhos correspondem a conjuntos de amplitudes dos sinais de erro (e) e sinais de comando (u). Esses ganhos variando em função do erro são interpretados como funções descritivas. Utilizando conceitos de inversão de funções descritivas obtém-se então as funções $Ni(\cdot)$, $Np(\cdot)$, e $Nd(\cdot)$, geralmente não lineares, que tendem a compensar as não linearidades da planta. O método depende de algumas interpretações do projetista a respeito do formato gráfico destas funções.

Nanka-Bruce (1989), Nanka-Bruce e Atherton (1990) apresentaram uma alternativa que não depende de interpretações e usaram uma estrutura tipo avanço ou atraso (*lead/lag*) de fase no lugar do PID. Isto evita distorções harmônicas adicionais além daquelas proveniente da planta não linear, pois um derivador puro é um filtro passa alta sem limitações nas altas frequências. A estrutura usada está ilustrada na figura 35:

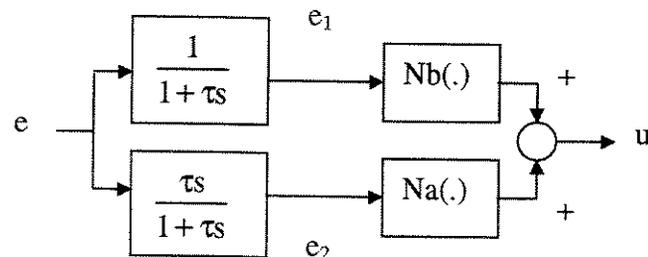


Figura 35. Compensador de avanço/atraso de fase com ganhos variáveis.

Para cada valor de erro (e) e sinal de comando (u), o compensador eqüivale a um compensador de avanço ou atraso de fase expresso por:

$$C(s) = \frac{u}{e} = \frac{K + hK\tau s}{1 + \tau s}. \quad (29)$$

Através de um conjunto de ganhos (K , h), correspondentes a um conjunto de valores de amplitudes de erro (e) ou de seus valores filtrados (e_1 , e_2), são obtidas as funções $N_a(\cdot)$ e $N_b(\cdot)$. Os ganhos como função dos sinais de erro $f_x(e)$ são interpretados como funções descritivas das quais são sintetizadas suas funções inversas correspondentes: $N_y(f_x)$. O cálculo dessas funções inversas envolve integrais de Volterra ou equações de Abel:

$$N_y(f_x) = \frac{1}{2} \int_0^{f_x} \frac{d[e^2 f_x(e)]}{\sqrt{(f_x^2 - e^2)}}.$$

A resolução dessas equações não é uma tarefa trivial. Em compensadores como da figura 35, os autores empregaram métodos gráficos de integração para resolver as funções armazenando os valores em tabelas, e usaram técnicas de interpolação para estimar valores intermediários.

Ambas as estruturas descritas usam métodos do domínio da frequência para calcular os ganhos dos controladores PID ou *lead/lag* equivalentes. Os dois trabalhos mostraram que, para sistemas de controle não lineares, a relação dada por (30) é válida no ponto da frequência W_{cg} que determina as características dinâmicas das malhas de controle. $C(jW_{cg})$ é a expressão de um controlador linear PID ou *lead/lag* equivalente para valores de magnitude dos sinais de erro (e) e de comando (u). O segundo trabalho tratou também de sistemas não lineares multivariáveis.

$$u = |C(jW_{cg})|e \quad (30)$$

5.3 Método de projeto de controladores fuzzy em processos não lineares determinísticos

Os sistemas fuzzy são aproximadores universais. Então, é possível usar sistemas fuzzy para mapear diretamente esses conjunto de ganhos dependentes das entradas, sem a necessidade de sintetizar as funções $N_y(\cdot)$. Assim a estrutura da figura 36 pode implementar um controlador

fuzzy tipo avanço ou atraso de fase para compensar sistemas não lineares. As funções passa-baixa e passa-alta filtram a informação de erro do controle, implementando o comportamento de avanço ou atraso de fase do sistema. O sistema fuzzy tem a função de aproximar os ganhos que são dependentes da magnitude das entradas. Os valores dos ganhos são calculados através de técnicas tradicionais. Aqui o controlador fuzzy pode ter fatores de escala unitários, pois as funções de pertinência e as regras serão ajustadas por meio de técnicas de treinamento, a partir das informações dos ganhos e amplitudes de entrada.

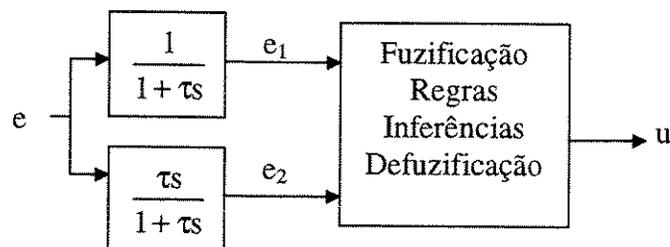


Figura 36. Controlador fuzzy tipo avanço/atraso de fase.

5.3.1 Obtenção de ganhos equivalentes via resposta em frequência

Neste método, tanto as plantas a serem controladas como o controlador fuzzy tipo avanço/atraso de fase proposto podem ser não lineares. Assim o procedimento para obter respostas em frequência do item 4.2 será útil para avaliar as características dos processos e analisar condições de estabilidade e sintonia das malhas de controle. Com informações do domínio da frequência da planta não linear, é possível usar técnicas conhecidas para calcular os ganhos do compensador equivalente. Para os parâmetros da equação (29), pode-se usar as expressões (31), (32), e (33) [Phillips e Harbor (1996)], onde $K=a_0$, $\tau=b_1$, $hK\tau=a_1$.

$$\theta = MF - 180 - \angle G(j\omega_{cg}) \quad (31)$$

$$a_1 = \frac{1 - a_0 |G(j\omega_{cg})| \cos \theta}{\omega_{cg} |G(j\omega_{cg})| \sin \theta} \quad (32)$$

$$b_1 = \frac{\cos \theta - a_0 |G(j\omega_{cg})|}{\omega_{cg} \sin \theta} \quad (33)$$

5.3.2 Técnica de treinamento para funções de pertinência e regras fuzzy

Neste trabalho será usado um método de treinamento para sistemas fuzzy proposto por Wang (1994), mostrado na figura 37. A técnica usa como conjunção o produto algébrico nos antecedentes das regras, e um método de defuzificação tipo centro de área. O algoritmo de treinamento é semelhante a técnicas de retropropagação (*back-propagation*) das redes neurais. O aprendizado é realizado através de um conjunto de dados de entrada e saída $[X_{id}, f_d]$, visando minimizar a função $[f(X_{id}) - f_d]^2$. São ajustados os valores (*singletons*) dos conseqüentes (Y_j) das regras, e as posições (C_{ij}) e larguras (D_{ij}) das funções de pertinência $g_{ij}(X_i)$ que são do tipo Gaussianas. Esses parâmetros podem ser inicializados aleatoriamente ou com valores pré-estabelecidos. O fator de aprendizado (*alf*) define a convergência e velocidade de treinamento.

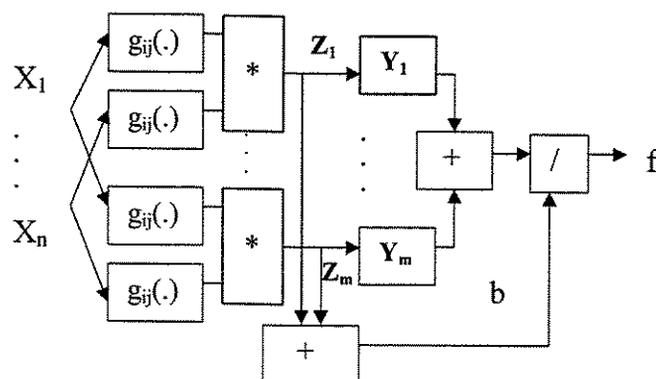


Figura 37. Treinamento de sistemas fuzzy.

$$g_{ij}(X_i) = e^{-\left(\frac{X_i - C_{ij}}{D_{ij}}\right)^2}$$

$$Y_{j\text{Atual}} = Y_{j\text{Anterior}} - \text{alf} \left(\frac{f - f_d}{b} \right) Z_j$$

$$C_{ij\text{Atual}} = C_{ij\text{Anterior}} - \text{alf} \left(\frac{f - f_d}{b} \right) (Y_j - f) Z_j \frac{2(X_{id} - X_{ij})}{D_{ij}^2}$$

$$D_{ij\text{Atual}} = D_{ij\text{Anterior}} - \text{alf} \left(\frac{f - f_d}{b} \right) (Y_j - f) Z_j \frac{2(X_{id} - X_{ij})^2}{D_{ij}^3}$$

5.3.3 Etapas de projeto

A seguir é mostrado de forma algorítmica a sistematização das etapas de projeto deste método de controle para sistemas não lineares determinísticos.

[Etapa 1]

Definir as especificações desejadas do sistema de controle, p. ex., MF, W_{cg} , faixa de valores de comando, etc.

[Etapa 2]

Obter a resposta em frequência do processo não linear a ser controlado para um valor específico de amplitude de comando (u): $G(u, jW)$.

[Etapa 3]

Com as informações do item 2, calcular os parâmetros do compensador de avanço/atraso de fase usando as equações (31), (32), e (33). Na primeira vez que este passo for executado é adotado um valor inicial para a_0 (que ajusta o erro em regime permanente da malha de controle). Nas próximas vezes (para outros valores de amplitude) manter o valor de $b_1 = \tau$, e calcular a_0 , a_1 (K , h).

[Etapa 4]

Repetir as etapas 2 até 4 armazenando os parâmetros K , h , com as correspondentes amplitudes $e_1(jW_{cg})$, $e_2(jW_{cg})$ que são obtidas de $e(jW_{cg})$ através da relação (30).

[Etapa 5]

Usar um conjunto de dados tipo $u = Ke_1 + Khe_2$ para obter o sistema fuzzy.

[Etapa 6]

Simular e testar o sistema de controle.

5.3.4 Exemplo e comparações

Para ilustrar o método proposto, será usado um exemplo de processo não linear (figura 38(a)) proveniente do trabalho de Nanka-Bruce (1989). O sistema representa um dispositivo eletro-mecânico de posicionamento angular. As funções não lineares $F(u)$ e $F(d)$ são ganhos que operam em duas faixas (figura 38(b)), sendo $Ku_1=2$, $Ku_2=1$, $Kd_1=4$, $Kd_2=0.2$ ($x=0.5$). Uma malha de controle usando compensadores de ganhos variáveis foi empregada para compensar o sistema com $MF \approx 45^\circ$, e $W_{cg} \approx 3$ rd/s. As respostas no tempo do sistema ficaram em $17\% < M_s < 25\%$ e $T_a < 2.5s$. As amplitudes de comando estavam na faixa $u=[0.4, 25.6]$.

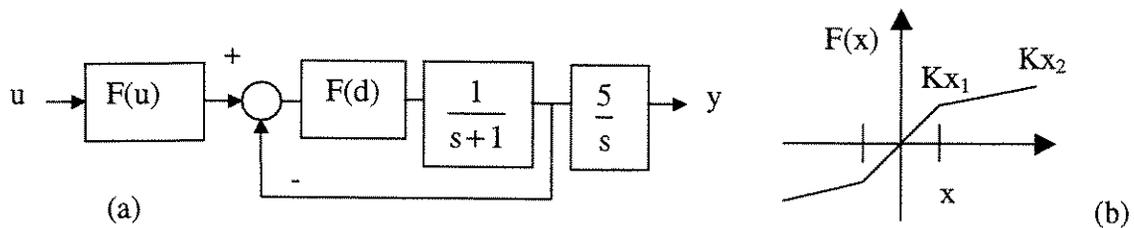


Figura 38. (a): Sistema com duas funções não lineares; (b) Funções não lineares.

Exemplo 4:

Para o mesmo processo da figura 38, será usado agora a estrutura de controlador fuzzy da figura 36, com o método de projeto do item 5.3.3. Através do procedimento para obter resposta em frequência de sistemas não lineares, tem-se na figura 39 os diagramas de Bode do processo da figura 38 para as amplitudes $u=[1.6; 6.4; 25.6]$:

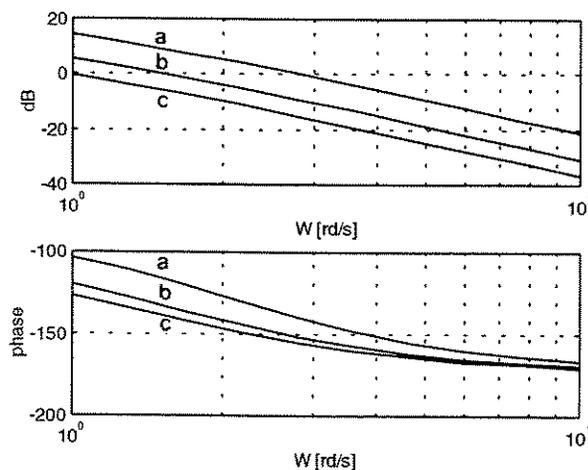


Figura 39. Respostas do processo não linear $G(u, jW)$ da figura 38, para $u=[1.6; 6.4; 25.6]^{a, b, c}$.

Dos diagramas de Bode para $u=25.6$ obtém-se $G(j3) = -16.48 \text{ dB} /_{-156}^{\circ} = 0.15 /_{-156}^{\circ}$. Da equação (31) vem $\theta = 21^{\circ}$ e adotando $a_0=K=4.67$ (para ajuste do erro em regime permanente) em (32), resulta $a_1=2.14$ ($h=2.12$ ou $hK=9.89$). De (33) calcula-se $b_1=\tau=0.22$. Usando (30), vem $e(j3)=3.85$, $e_1(j3)=3.23$, $e_2(j3)=2.1$. Similarmente, para $u=1.6$ tem-se $G(j3) = -0.82 \text{ dB} /_{-142}^{\circ} = 0.91 /_{-142}^{\circ}$, $\theta = 21^{\circ}$. Mantendo $b_1=\tau=0.22$ vem $a_0=K=1$, $a_1=0.29$ ($h=1.34$ ou $hK=1.34$). As respectivas entradas são $e(j3)=1.44$, $e_1(j3)=1.2$, $e_2(j3)=0.78$. Na tabela 8 tem-se um resumo de alguns valores de ganhos e amplitudes:

Tabela 8. Valores de ganhos e amplitudes.

u	e	e ₁	e ₂	K	hK
1.60	1.44	1.20	0.78	1.00	1.34
6.40	1.92	1.61	1.05	2.50	4.75
12.8	2.68	2.25	1.46	3.41	7.00
25.6	3.85	3.23	2.10	4.67	9.89

Dados como os da tabela 8 são usados para treinar o sistema fuzzy na etapa 6 do projeto. Neste exemplo foram empregadas 25 regras. Os valores das funções de pertinência foram inicializados com $C_{ij}=[-3.2; -1.6; 0; +1.6; +3.6]$ e $D_{ij}=1.28$. E os consequentes Y_j das regras em $NL=-32$; $NM=-16$; $ZE=0$; $PM=+16$; $PL=+32$. Esses valores foram escolhidos conforme as faixas de u , e_1 , e_2 (isto leva a um treinamento mais rápido do que o uso de valores inicializados aleatoriamente). O fator de aprendizado usado foi de $\text{alf}=0.001$. Após o treinamento obteve-se:

$$C_{ne1}=[-3.89; -0.007; 0; +0.007; +3.89]$$

$$D_{ne1}=[2.23; 2.33; 2.61; 2.33; 2.23]$$

$$C_{ne2}=[-3.69; -0.018; 0; +0.018; +3.69]$$

$$D_{ne2}=[2.39; 0.96; 1.39; 0.96; 2.39]$$

$$n=[1; 2; 3; 4; 5]$$

Tabela 9. Valores de Y_j .

Yj		e1				
		C _{1e1}	C _{2e1}	C _{3e1}	C _{4e1}	C _{5e1}
e2	C _{1e2}	-32.38	-30.77	-31.42	-15.86	-0.33
	C _{2e2}	-31.13	-31.19	-15.99	-0.81	+15.10
	C _{3e2}	-31.15	-15.21	0	+15.21	+31.15
	C _{4e2}	-15.10	+0.81	+15.99	+31.19	+31.13
	C _{5e2}	+0.33	+15.86	+31.42	+30.77	+32.38

Diagramas de Bode do sistema compensado (processo não linear e controlador fuzzy tipo avanço/atraso) estão na figura 40, para as amplitudes $e=[1.44; 1.92; 2.68]^{a, b, c}$. Observa-se que as especificações no domínio da frequência foram atingidas ($MF \approx 45^\circ$, $W_{cg} \approx 3$ rd/s):

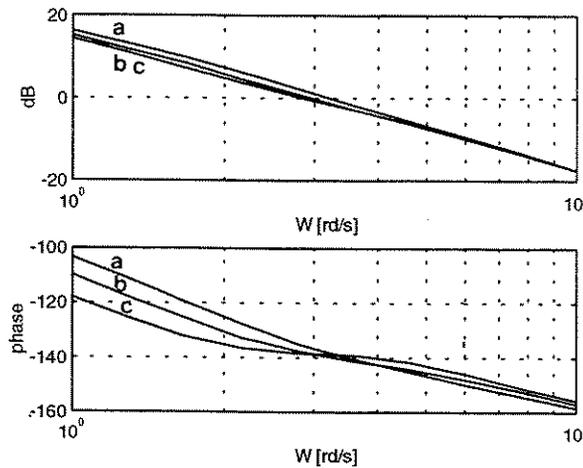


Figura 40. Diagramas de Bode do sistema compensado com o CF tipo avanço/atraso.

Respostas normalizadas (y/r) do sistema no tempo estão na figura 41(a) para alguns valores de referência $r=[0.5; 1.5; 2.5]$. As características dinâmicas são: $15\% < M_s < 19\%$ e $T_a \approx 1.25$ s. Elas são melhores que as respostas do compensador não fuzzy de avanço/atraso de fase com ganhos variáveis do trabalho mencionado. O motivo se deve à continuidade das aproximações dos sistemas fuzzy. As funções de pertinência de e_1 e e_2 após o treinamento estão na figura 41(b).

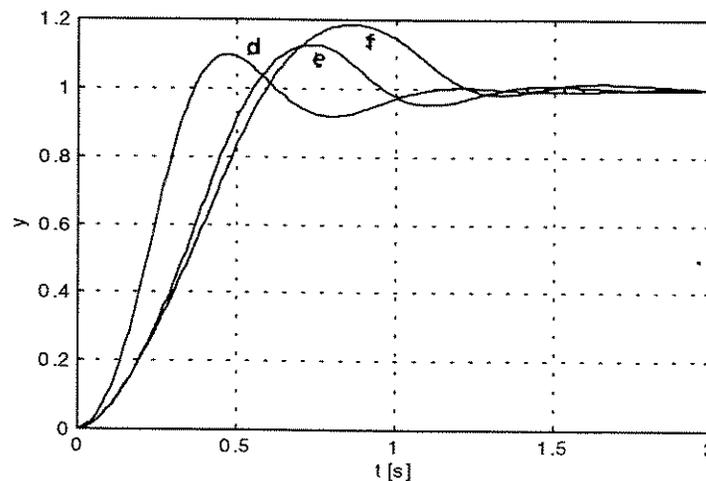


Figura 41(a). Respostas normalizadas (y/r) do sistema para $r=[0.5; 1.5; 2.5]^{d, e, f}$.

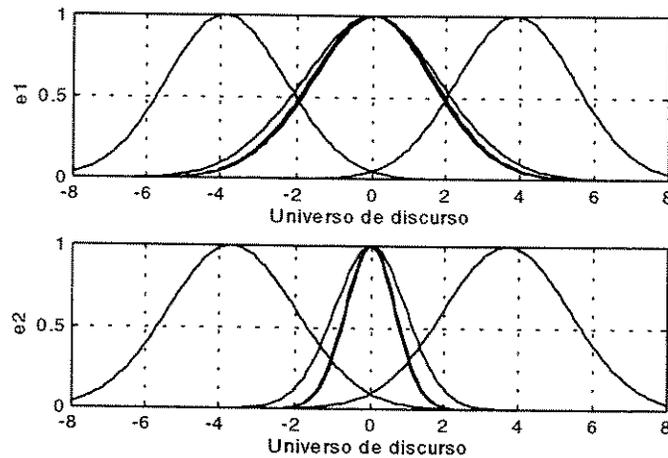


Figura 41(b). Funções de pertinência de e_1 e e_2 após o treinamento.

Parte desses resultados foram reportados em Pinheiro e Gomide (1999_c). Uma alternativa no lugar do sistema fuzzy é utilizar uma rede neural [Pinheiro e Gomide (1999_a)]. Conforme argumentou Wang (1994), o interessante dos sistemas fuzzy em algumas aplicações são as possibilidades de se extrair e incorporar informações lingüísticas.

5.4 Resumo

Este capítulo apresentou um sistema de controle fuzzy para processos não lineares determinísticos, que usa métodos do domínio da frequência e técnica de treinamento. Partindo de dados obtidos através de informações de respostas em frequência, são ajustadas funções de pertinência e regras de um sistema fuzzy visando compensar plantas não lineares. Um exemplo foi usado para ilustrar o método proposto e servir de comparação com outra técnica.

Nos próximos capítulos serão abordados sistemas mais genéricos que, além de não lineares, com incertezas em parâmetros, com múltiplas entradas e saídas, apresentam características importantes quanto a rejeição a distúrbios, robustez, etc.

Capítulo 6

Projeto de sistemas de controle fuzzy para processos com incertezas

6.1 Introdução

Plantas e processos físicos reais podem apresentar efeitos não lineares, variações ou incertezas em parâmetros. Assim, seus sistemas de controle devem ser capazes de considerar tais características garantindo condições de estabilidade e robustez. Em processos onde são conhecidos ou onde se podem avaliar *a priori* esses comportamentos não lineares e/ou as modificações em parâmetros, o uso de compensadores com estruturas convencionais é eficiente. Isto é viável para uma grande variedade de processos físicos. Entretanto, as etapas de projeto e sintonia desses sistemas de controle são mais elaboradas que as de processos lineares e invariantes. Neste capítulo será apresentada uma forma sistemática para projetar sistemas de controle fuzzy para processos gerais (lineares, não lineares, de parâmetros variáveis, etc.). Serão utilizadas técnicas do domínio da frequência para garantir condições de robustez e efetuar a sintonia das malhas de controle. Os exemplos que ilustrarão este capítulo serão comparados com resultados alternativos propostos na literatura. Foi implementada uma montagem em laboratório de um controlador fuzzy para sistemas de tração elétrica, visando mostrar a aplicabilidade da metodologia proposta.

6.2 Técnicas do domínio da frequência para sistemas de controle robusto

As técnicas de projeto de sistemas de controle no domínio da frequência fornecem abordagens eficientes para analisar e estabelecer condições de robustez. Um sistema de controle pode ser representado genericamente conforme ilustrado na figura 42. G é a planta ou processo controlado, onde as entradas d_1 ou d_2 representam algum tipo de distúrbio, e n , interferências (ruídos). C são controladores compostos por um ou mais compensadores básicos em série. F são filtros no ramo de referência (r). H representa transdutores e/ou compensadores/filtros nas malhas de realimentação. No domínio da frequência suas relações são:

$$y = F \frac{L}{1+LH} r + \frac{G}{1+LH} d1 + \frac{1}{1+LH} d2 - H \frac{L}{1+LH} n, \text{ sendo } L=CG, \text{ ou}$$

$$y = F.T.r + G.S.d1 + S.d2 - H.T.n, \text{ onde } S=(1+LH)^{-1}, \text{ e } T=LS. \quad (34)$$

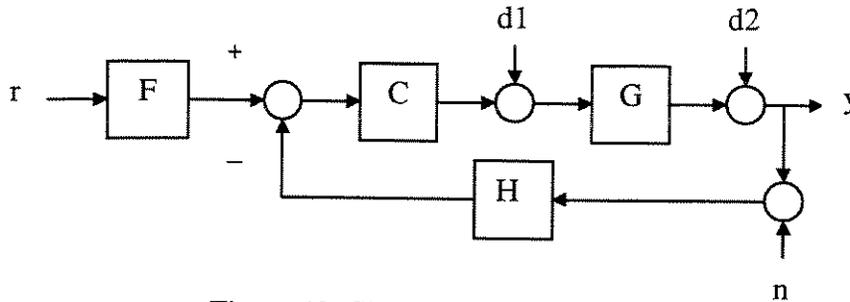


Figura 42. Sistema de controle genérico.

O termo L ou LH (função de malha aberta ou *loop transmisson*) estabelece as condições de estabilidade, rejeição a perturbações, e características de resposta dinâmica através da escolha e ajuste (sintonia) de C e/ou H . O fator FT está relacionado com características dinâmicas em malha fechada, e através de F pode-se ajustar a capacidade (conhecida como *tracking*) das saídas (y) acompanharem modificações nas entradas (r). F não altera a estabilidade do sistema ou a rejeição a distúrbios que foram estabelecidas por meio de C e/ou H . O fator de sensibilidade S indica a capacidade dos sistemas de controle com realimentação negativa de rejeitarem perturbações e variações de parâmetros. Quanto menor esse fator, menores as influências de perturbações ($d1$, $d2$, n). Também menos influência as variações de parâmetros em G terão na função de malha fechada (T); esta relação é dada por:

$$S_G^T = \frac{\partial T}{\partial G} \frac{G}{T} = \frac{1}{1+LH} = S.$$

Khan e Lehman (1996) mostraram que valores de $S(j\omega)$ próximos de 1,3 a 2 (2,28 a 6 dB), são adequados no compromisso de garantir robustez e manter características de resposta dinâmica. Projetar e sintonizar sistemas de controle com esses arranjos consiste de escolher as funções C , F e H adequadamente. Na maioria das vezes as funções H são apenas constantes que relacionam grandezas físicas com sinais dos transdutores usados, mas podem existir também filtros para

minimizar interferências/ruídos (n) dos transdutores, ou mesmo arranjos de compensadores. As técnicas básicas de compensação consistem de escolher LH de forma a cumprir determinadas especificações no domínio da frequência (margem de fase, frequência de cruzamento de ganho, sensibilidade máxima, etc.). Para todas as variações, não linearidades e perturbações da planta G, a resposta do sistema deve estar dentro de uma faixa $[A(j\omega), B(j\omega)]$ de respostas admissíveis de forma que $A(j\omega) \leq FT(j\omega) \leq B(j\omega)$. Quando se necessita usar filtros F, seus valores são dados por:

$$|A(j\omega)| - |T(j\omega)| \leq |F(j\omega)| \leq |B(j\omega)| - |T(j\omega)|. \quad (35)$$

Métodos para sintetizar compensadores e filtros para sistemas de controle com variações em parâmetros ou características não lineares são encontrados em alguns livros e artigos. Por exemplo, Horowitz (1963) elaborou uma metodologia de projeto que usa gráficos no plano complexo para representar modificações em parâmetros e distúrbios da planta controlada. Esta técnica foi posteriormente formalizada em Horowitz e Sidi (1972), ficando conhecida como QFT (*Quantitative Feedback Theory*). Para este método, Krishnan e Cruickshanks (1977) estabeleceram técnicas simples para estimar $F(j\omega)$ a partir de especificações no domínio do tempo, servindo também para outros métodos de projeto. Definindo-se a faixa $[A(t), B(t)]$ de respostas desejadas no tempo, com $M(t) = (A(t) + B(t)) / 2$, obtém-se:

$$F(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{r(j\omega)}. \quad (36)$$

6.3 Método de projeto de controladores fuzzy para processos com incertezas

Foi visto nos capítulos anteriores que os sistemas de controle fuzzy podem ser analisados através de métodos de resposta em frequência. Informações como frequência de cruzamento de ganho (ω_{cg}) e margem de fase (MF) estão ligadas a características dinâmicas como máxima sobre-elevação (M_s) e tempo de acomodação (T_a). Usando técnicas conhecidas da teoria de controle, é possível obter uma forma de projeto sistemática de sistemas de controle fuzzy em processos ou plantas gerais (lineares, não lineares, com variações de parâmetros, etc.). Um

sistema ou processo no domínio da frequência pode ser linear ($G(jW)$); de parâmetros (p) com incertezas ($G(jW,p)$); e não linear dependente das amplitudes (u) das entradas ($G(u,jW)$). De um modo geral, estes sistemas compensados em torno de uma frequência W_x , podem ser agrupados em uma das classes de curvas ilustradas na figura 43. Sistemas com variações em parâmetros ou com características não lineares podem ser representados por um conjunto de curvas de módulo e fase variando genericamente nos extremos $[k, n]$.

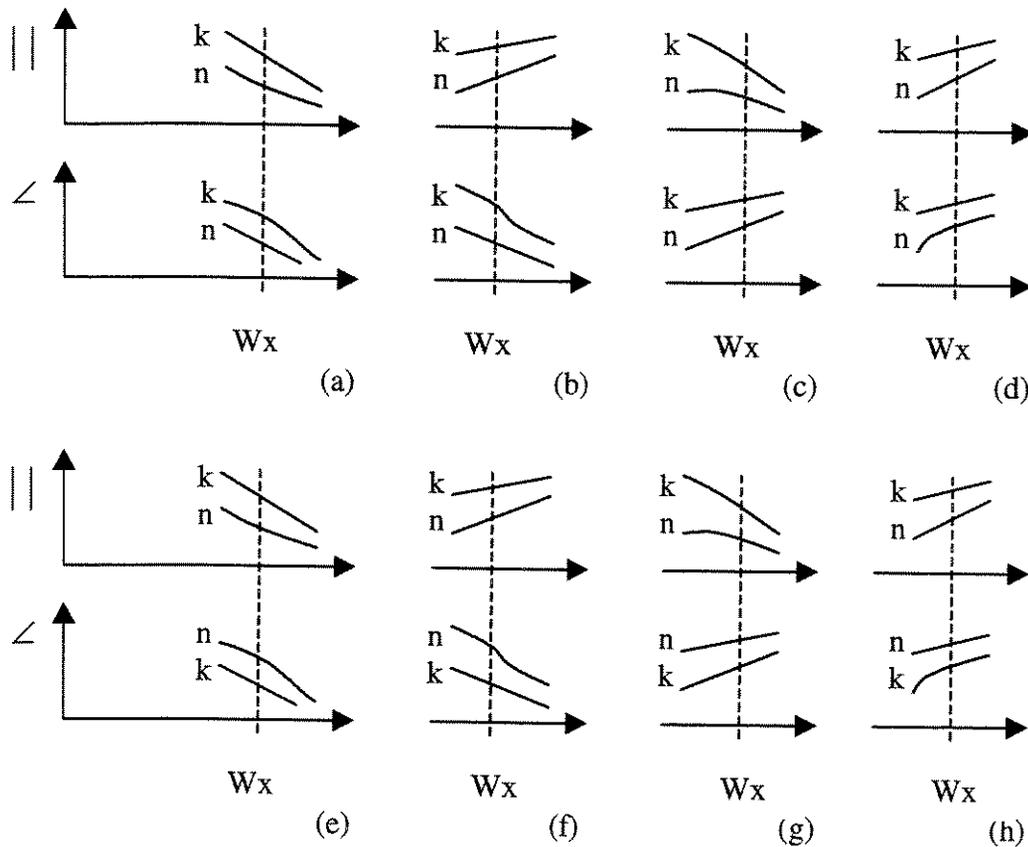


Figura 43. Classes de curvas de módulo e fase genéricas.

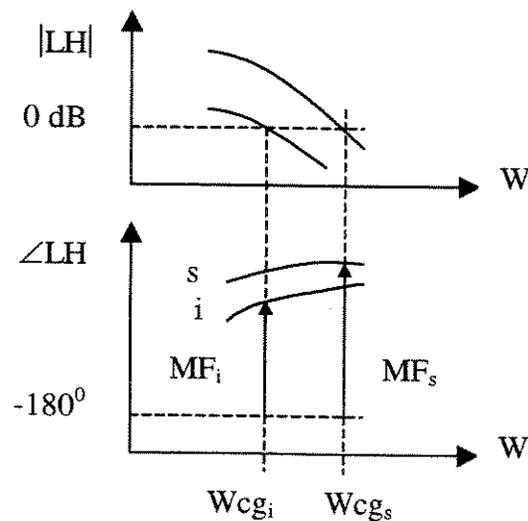
6.3.1 Justificativas teóricas

Para justificar teoricamente o uso de métodos do domínio da frequência em uma abordagem genérica para sistemas de controle fuzzy, os conceitos básicos envolvidos serão expressos aqui em uma forma conveniente para o propósito deste trabalho.

Proposição 3 - Malhas de controle semelhantes à da figura 42, com controladores fuzzy nas funções de compensação C, podem ser projetadas e sintonizadas para compensar processos genéricos, desde que se conheçam os extremos [k, n].

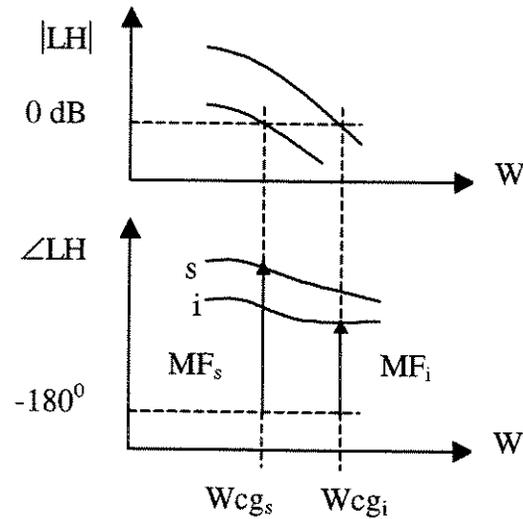
Como os processos podem ter variações em parâmetros e efeitos não lineares, as curvas resultantes das compensações também poderão apresentar alterações. Será admitido que compensações iniciais são efetuadas nas curvas (i) de menor fase (maior solicitação de compensação) nos sistemas representados graficamente abaixo, segundo a classe de curvas genéricas na qual eles estão definidos. As características apresentadas pelos controladores fuzzy, juntamente com utilizações (se necessárias) de filtros F e/ou compensadores adicionais em série, garantem que as especificações sejam mantidas para as curvas (s) de maior fase.

Classes (c) ou (h):



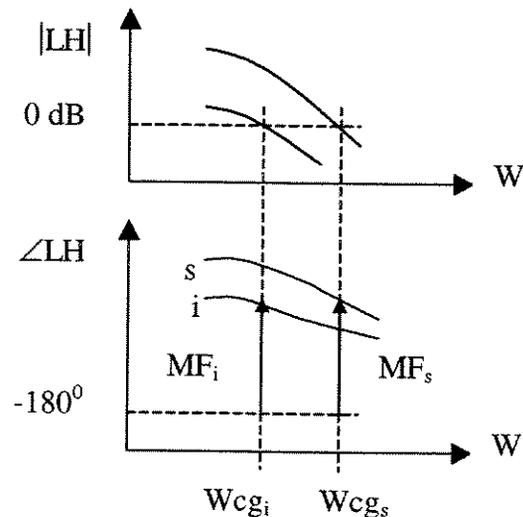
Estando o sistema compensado para i, se houver uma variação para s existe a tendência de $MF_s > MF_i$ garantindo $Ms_s < Ms_i$, e, como $W_{cg_s} > W_{cg_i}$, então $Ta_s < Ta_i$.

Classes (b) ou (e):



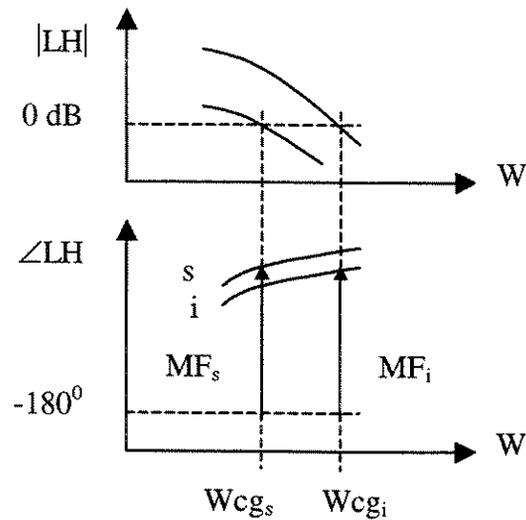
Com uma variação para s , há a tendência de $MF_s > MF_i$ garantindo $Ms_s < Ms_i$. Sendo $\omega_{cg_s} < \omega_{cg_i}$, se $Ta_s > Ta_i$ a inclusão de um filtro F ajusta a largura de faixa do sistema levando Ta para os valores especificados.

Classes (a) ou (f):



Com uma variação para s tem-se $\omega_{cg_s} > \omega_{cg_i}$ garantindo $Ta_s < Ta_i$. Como a curva de fase está diminuindo é necessário verificar se $MF_s < MF_i$; em caso afirmativo pode ser necessário incluir compensadores adicionais em série com o controlador fuzzy para ajustar a fase do sistema.

Classes (d) ou (g):



Com uma variação do sistema para s tem-se $W_{cg_s} < W_{cg_i}$, o que pode levar a $Ta_s > Ta_i$. Neste caso, a inclusão de um filtro F ajusta a largura de faixa do sistema, trazendo Ta para os valores especificados. Como a curva de fase está diminuindo, é necessário verificar se $MF_s < MF_i$; em caso afirmativo pode ser necessário incluir compensadores adicionais em série com o controlador fuzzy para ajustar a fase do sistema.

Assim, é possível projetar e sintonizar malhas de controle fuzzy aplicadas a sistemas genéricos (lineares, não lineares, com variações ou incertezas em parâmetros, etc.), garantindo condições de estabilidade e robustez.

6.3.2 Estágios de projeto e sintonia

Com os conceitos vistos anteriormente, os estágios seguintes de análise, projeto, e sintonia de controles fuzzy são bem diretos e relativamente simples. De forma algorítmica este procedimento geral é:

[Estágio 1]

As especificações das malhas de controle (MF, W_{cg} , faixa de referência, etc.) são definidas. Em plantas com incertezas, estabelecer as variações dos parâmetros. Em plantas não lineares, definir as amplitudes de comando.

[Estágio 2]

Obter as curvas de resposta em frequência da planta. Se a planta for linear, basta um gráfico $G(j\omega)$ por malha. Em sistemas com incertezas em parâmetros, gerar algumas curvas $G(j\omega, p)$ para a faixa de variação dos parâmetros (p). Em processos não lineares, obter alguns gráficos $G(u, j\omega)$ para a faixa de operação das amplitudes de comando (u).

[Estágio 3]

Com as informações da etapa 2, escolher controladores fuzzy tipo PD, PI, PID, ou avanço/atraso de fase, que permitam o sistema atingir as especificações do estágio 1. Se necessário, em compensações de fase maiores que $\pm 90^\circ$, acrescentar outros compensadores lineares em série com os controladores fuzzy. Iniciar com bancos de regras típicas e funções de pertinência de partição uniforme. Definir os universos de discurso para as faixas dos sinais das entradas e saídas de controle, correspondentes às variações dos sinais de erro (e) e comando (u).

[Estágio 4]

Usando técnicas analíticas ou gráficas, estimar/calcular os ganhos de escala das funções de pertinência dos controladores fuzzy, como se fossem compensadores lineares, visando atingir as especificações solicitadas. Idem com os compensadores em série, se forem usados. As compensações devem ser realizada para as maiores solicitações do estágio 2.

[Estágio 5]

Simular as respostas em frequência das malhas de controle fuzzy. As condições de estabilidade e sintonia são então verificadas.

[Estágio 6]

Se as especificações não forem alcançadas modificar os ganhos, as larguras e posições das funções de pertinência, base de regras, e/ou os limites dos universos de discurso. Se necessário, incluir outros compensadores em cascata com os controladores fuzzy nos pontos de frequência solicitados. E repetir o estágio 5.

[Estágio 7]

Obter respostas em malha fechada verificando se as características dinâmicas (M_s e T_a) no domínio do tempo são atingidas. Se necessário, incluir filtros F em série com as entradas de referência. Senão, repetir o estágio 6.

6.3.4 Exemplos

A abordagem proposta neste capítulo tem alguns dos seus estágios de projeto simplificados nos exemplos 1, 2, e 3 resolvidos anteriormente. O método do capítulo 5 (exemplo 4) é mais específico para sistemas não lineares determinísticos que não tenham variações em parâmetros. Os próximos exemplos ilustrarão a aplicação desta abordagem mais genérica para analisar e projetar sistemas de controle fuzzy. Eles serão comparados com resultados de outros trabalhos objetivando mostrar a simplicidade e os valores satisfatórios obtidos pelo método proposto.

Exemplo 5:

O modelo de servo motor elétrico indicado na figura 44 é usado em um sistema de posicionamento angular. Ele contém dois elementos não lineares: uma limitação de ganho na entrada (semelhante ao da figura 38(b) da página 70) com os ganhos $K_{x1}=5 \text{ Nm/V}$, $K_{x2}=1 \text{ Nm/V}$, e ponto de inflexão $x=0.5 \text{ V}$; mais uma comutação $\text{sign}[\delta]$. Os outros parâmetros são $f_c=1 \text{ Nm}$, $J=0.01 \text{ Kg m}^2$, $f_v=0.1 \text{ Nms/rad}$. A entrada de comando (u) do processo vai de 0 até $\pm 15 \text{ V}$. A referência de entrada (*set point*) está na faixa 0.2 até 3.14 rd. Taylor e Strobel (1985) usaram um compensador não linear para controlar este sistema, obtendo respostas dinâmicas com $M_s < 35\%$ e $T_a < 0.4 \text{ s}$. Neste exemplo será usado um controlador fuzzy na malha de controle. As especificações no domínio da frequência são $MF \approx 45^\circ$ e $W_{cg} \approx 35 \text{ rd/s}$.

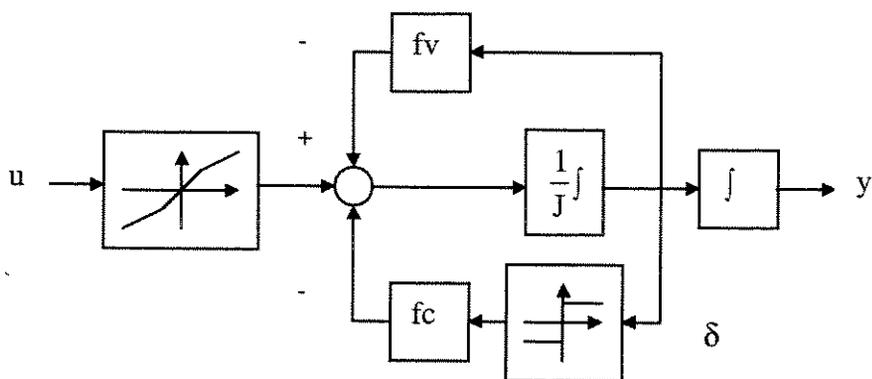


Figura 44. Modelo do servo motor elétrico do exemplo 5.

[Estágio 1]

As especificações estão definidas no enunciado do exemplo.

[Estágio 2]

Usando o método do capítulo 4 para obter respostas em frequência de sistemas não lineares, tem-se na figura 45 as respostas em frequência do processo para entradas $u=[0.5; 15]$.

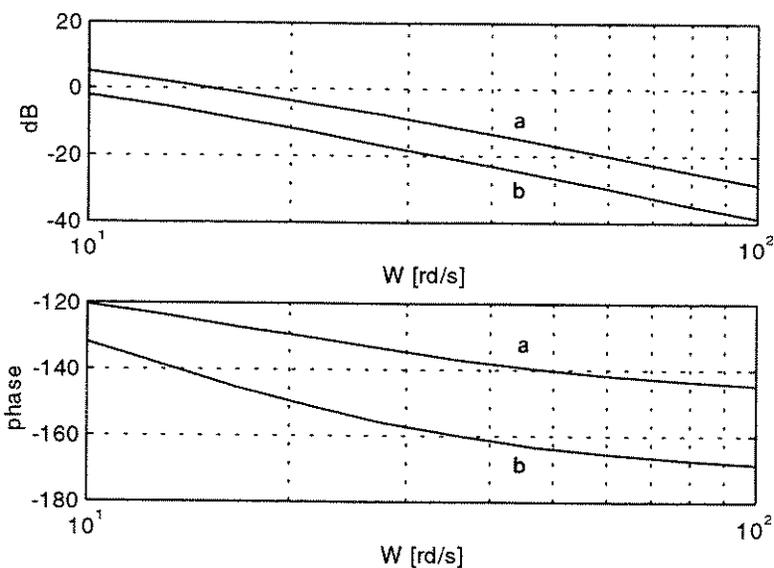


Figura 45. Respostas $G(u, jW)$ do servo motor para $u=[0.5; 15]^{a, b}$.

[Estágio 3]

Um controlador fuzzy tipo PD atende à compensação requerida (pois aumenta a fase do sistema). Os limites dos universos de discurso são definidos em ± 16 para evitar saturação.

[Estágio 4]

A maior solitação de compensação é para $u=15$ (curvas (b) da figura 45); do diagrama de Bode vem $G(j35)=-20 \text{ dB} / -160^\circ$. Usando as expressões (27) da página 57, vem $K_p=g_e=9.1$ e $K_d=g_v=0.12$.

[Estágio 5]

Respostas em frequência do sistema (CF-PD e servo motor) estão na figura 46 para $e=[1.5; 3]$. O valor $e=1.5$ equivale a $u=15$, valor dado por (30)⁴ que fornece a relação entre a magnitude da planta e a entrada do controlador: $u = |C(j35)|e = |9.1 + 0.12j35|e$. O sistema está próximo das especificações ($MF \approx 45^\circ$ e $W_{cg} \approx 33 \text{ rd/s}$) para a maior solitação de fase do estágio 4. Para o outro extremo ($e=3$), a frequência de cruzamento de ganho diminui um pouco, e a margem de fase tem um acréscimo que garante a estabilidade do sistema e a especificação da sobrelevação (Ms).

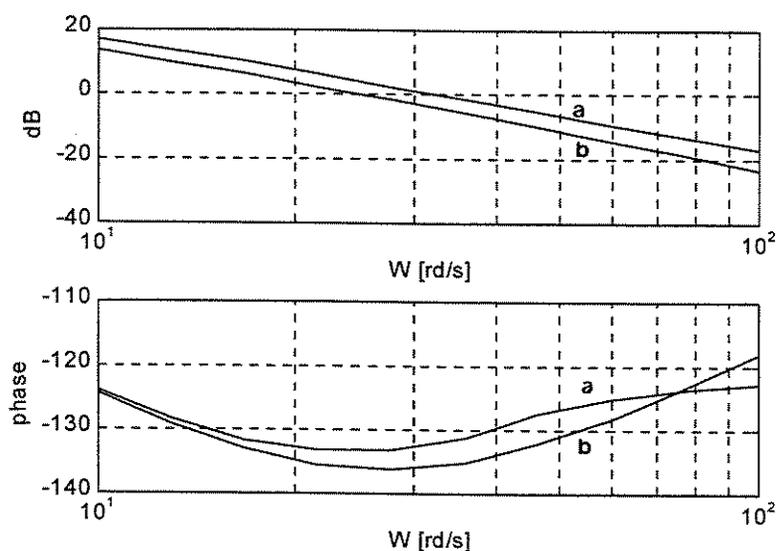


Figura 46. Respostas do sistema (CF-PD e servo motor) para $e=[1.5; 3]$ ^{a, b}.

[Estágio 6] e [Estágio 7]

Com as respostas normalizadas (y/r) do sistema de controle na figura 47 para $r=[1.5; 3]$, observa-se que as características dinâmicas estão boas ($M_s < 25\%$, $T_a < 0.3s$), e se mantêm para

⁴ Página 66.

toda a faixa de referência especificada. Como o tempo de acomodação está adequado para valores maiores de referência, não é necessário acrescentar um filtro F na entrada de *set point*.

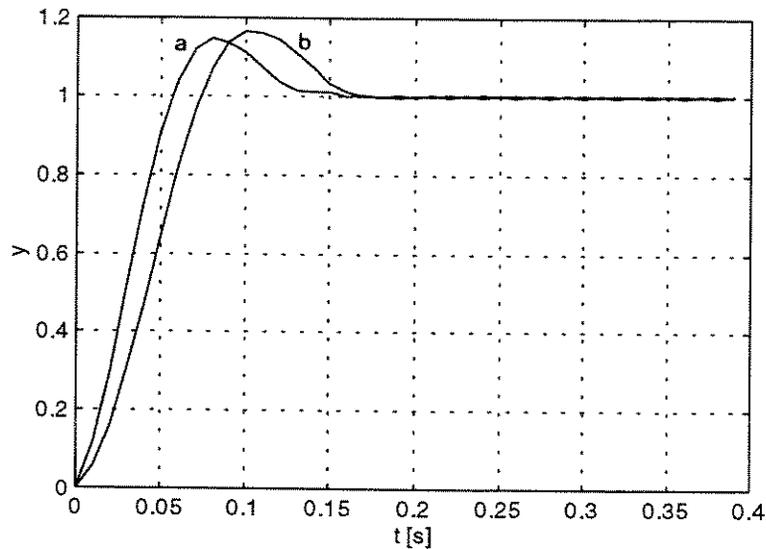


Figura 47. Respostas normalizadas (y/r) do sistema de controle fuzzy para $r = [1.5; 3]^{a,b}$.

Os resultados obtidos através do controlador fuzzy foram melhores do que os fornecidos pelo compensador não linear do trabalho citado. E como foi mostrado, o procedimento proposto para projeto e sintonia de sistemas de controle fuzzy é bem simples de ser usado.

Exemplo 6:

O processo modelado por (37) tem parâmetros que possuem variações. Ele é proveniente de um exemplo sobre sistemas de controle pelo método QFT apresentado em D'Azzo e Houpis (1988). A resposta do sistema apresenta $M_s = [0, 20\%]$ e $T_a < 2s$ para toda faixa de variação dos parâmetros. Neste trabalho será usado um controlador fuzzy na malha de controle com as especificações no domínio da frequência de $MF \approx 65^\circ$ e $W_{cg} \approx 4$ rd/s, visando atingir as mesmas características de resposta dinâmica do exemplo mencionado.

$$\ddot{y} + B\dot{y} = ABu, \quad A \in [1, 10], \quad B \in [1, 10]. \quad (37)$$

[Estágio 1]

As especificações estão definidas acima.

[Estágio 2]

Respostas em frequência de (37) para $A \in [1; 5; 10]$, e $B \in [1; 5; 10]$ estão na figura 48.

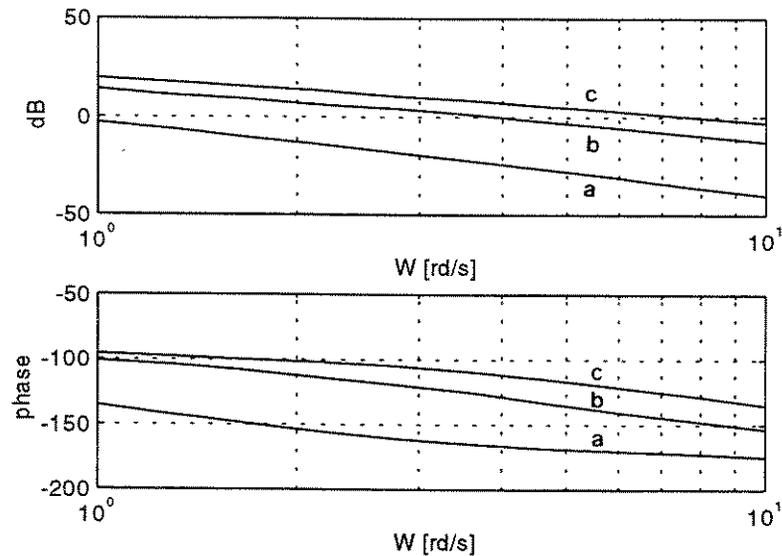


Figura 48. Resposta em frequência de (37) ($A \in [1; 5; 10]$, e $B \in [1; 5; 10]$)^{a, b, c}.

[Estágio 3]

Um compensador de avanço de fase é adequado para a compensação do sistema. É possível usar um controlador fuzzy tipo PD para isto. Mas neste exemplo será usada a estrutura de controlador fuzzy tipo avanço/atraso de fase semelhante a proposta no capítulo 5 (figura 36, página 67). Porém, não serão empregadas técnicas de treinamento para ajustar as funções de pertinência. Fatores de escala (g_{e1} , g_{e2}) nas respectivas entradas (e_1 , e_2) terão esta finalidade. Os limites dos universos de discurso são definidos em ± 16 . As funções de pertinência serão do tipo Gaussiana com dispersões em 4.8 para uma maior uniformidade.

[Estágio 4]

A maior solicitação de compensação é para $A=1$ e $B=1$, curvas (c) nos diagramas de módulo e fase da figura 48. Usando as expressões (29), (31), (32), e (33)⁵ calculam-se os fatores de escala do controlador fuzzy como se fosse um compensador linear. Para $G(j4) = -26.56 \text{ dB} / -166^\circ$, vem $\theta=51^\circ$, $a_0=K=6$ (valor adotado para ajustar o erro em regime permanente do sistema), $a_1=5.63$ (ou $h=8.53$), $b_1=\tau=0.11$. Assim $g_{e1}=K=6$, $g_{e2}=hK=51.18$.

⁵ Páginas 66 e 67.

[Estágio 5]

As respostas em frequência do controlador fuzzy de avanço/atraso e da planta compensada estão indicadas nas figuras 49 e 50 respectivamente (para $e=1$). Verifica-se que as curvas da figura 50 são a soma aproximada das figuras 48 e 49, indicando a compensação do sistema.

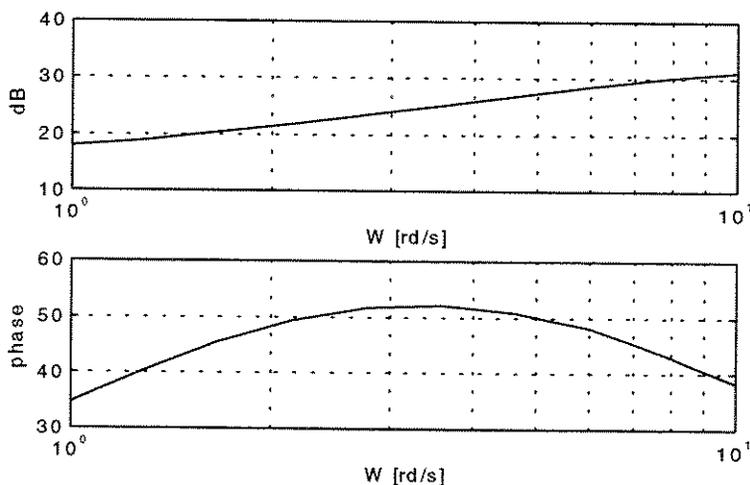


Figura 49. Resposta em frequência do controlador fuzzy tipo avanço ou atraso de fase.

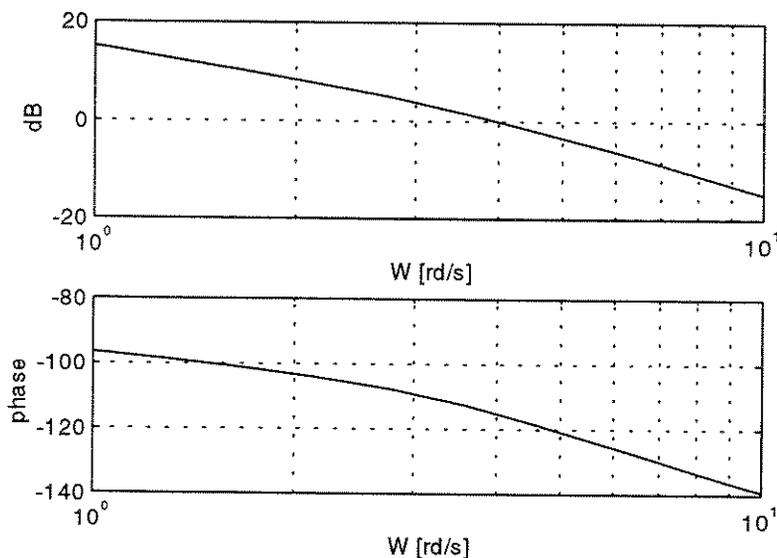


Figura 50. Resposta do sistema compensado para a maior solicitação ($A=1$, $B=1$).

[Estágio 6] e [Estágio 7]

Verificando as respostas para outros valores de parâmetros observa-se que algumas delas não são satisfatórias, sendo necessário a inclusão de um filtro no ramo da referência. O filtro

escolhido é um passa-baixa $(\tau s + 1)^{-1}$ com $\tau = 0.1$. Respostas ao degrau unitário da malha de controle fuzzy estão na figura 51 para alguns valores de parâmetros da planta: $A \in [1; 10; 10]$, e $B \in [1; 1; 10]$. Nota-se que as características dinâmicas estão dentro das especificações: $0 < M_s < 20\%$ e $T_a < 2s$ (isto se verifica também para toda a faixa de variações dos parâmetros do processo). O sistema apresentou um comportamento robusto na presença de variações de parâmetros e o projeto foi realizado com um esforço computacional menor que o do exemplo da referência mencionada, pois não foi necessário representar as variações dos parâmetros em cartas de Nichols na etapa de sintonia.

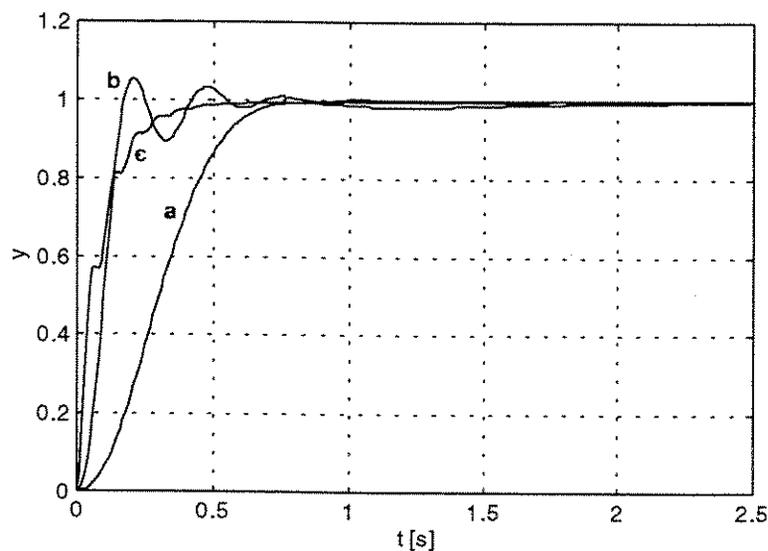


Figura 51. Respostas ao degrau unitário da malha de controle fuzzy
 $(A \in [1; 10; 10], e B \in [1; 1; 10])^{a, b, c}$.

Exemplo 7:

Neste exemplo será mostrado um sistema de controle fuzzy real que usará os procedimentos de análise e projeto desenvolvidos. Além de simulações em computador uma montagem em laboratório foi implementada. O processo físico utilizado foi escolhido por diversos motivos: que apresentasse comportamento não linear e perturbações variáveis; tivesse relevância em aplicações práticas; fosse comparado com algum outro trabalho; e que apresentasse facilidade de implementação com equipamentos disponíveis na maioria dos laboratórios de engenharia elétrica. As máquinas de corrente contínua com excitação série são muito utilizadas em aplicações de tração elétrica tais como trens e metrô. Essas máquinas apresentam

característica de torque variando de forma inversa com a velocidade (o torque é função quadrática da corrente). Isto permite que modificações de carga (torque) não acarretem elevadas variações de corrente nas máquinas e nas suas fontes de energia (conjuntos diesel-gerador, ou linhas elétricas do tipo catenárias e coletores) [Martignoni (1970), Toledo e Martins (1976)]. Em locomotivas as variações de torque são atribuídas a modificações de esforços mecânicos envolvidos no deslocamento das composições. Esses esforços (E) são devidos ao atrito das rodas com os trilhos (f_r), com o ar (f_a), resistência à inclinações (f_s), e resistência à curvas (f_c):

$$E = P(f_r + f_a + f_s + f_c).$$

Onde P é o peso da composição, e os fatores de atrito são dados por:

$$f_r = C_r, \quad f_a = C_a S_t v^2, \quad f_s = I, \quad f_c = C_c \frac{D}{R}.$$

Sendo C_x coeficientes; S_t e v^2 respectivamente a seção transversal e velocidade do veículo; I a inclinação ou declive do percurso; D a distância (bitola) entre as rodas nos trilhos e R o raio da curvatura de um trajeto. Portanto, as cargas (torques) dos motores de tração elétrica em trens possuem variações diversas. Em função das bitolas, trajetos, e outras características construtivas das estradas e trens, existe a necessidade de controlar as velocidades de operação das composições a fim de se evitar problemas de fricção, arrasto, deslizamento, patinagem, e aderência. Em Rao (1986) mostra-se a estrutura básica de sistemas de controle de locomotivas elétricas. Além de malhas de controle de velocidade, são usadas também malhas de controle de corrente devido as altas potências envolvidas, e também para estabelecer características de fricção e arrasto. Guillemín (1996) mostrou um sistema de controle fuzzy acionando motores elétricos universais aplicados a eletrodomésticos. Estes motores operam tanto com corrente alternada ou contínua e são considerados motores com excitação série, que geralmente apresentam altas rotações e baixas correntes de operação. O artigo apresentou as vantagens que controladores fuzzy podem trazer quando aplicados em acionamento de processadores de alimentos, mas não apresentou nenhum método de sintonia ou de rejeição a distúrbios.

Este exemplo usa uma máquina de corrente contínua com excitação série de aplicação industrial. Perturbações de torque foram implementadas através de um gerador síncrono acoplado ao eixo do motor de corrente contínua. A estrutura da montagem está indicada na figura 52:

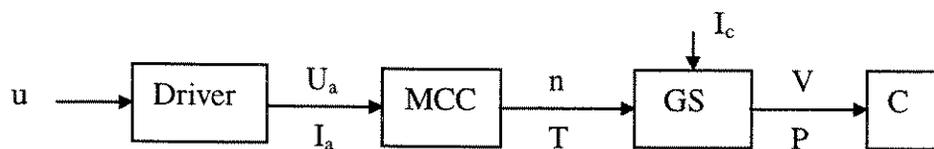


Figura 52. Estrutura da montagem em laboratório.

Um driver de potência tiristorizado fornece a tensão de alimentação (U_a) variável para acionamento do motor de corrente contínua (MCC). A entrada (u) de comando varia de 0 a 5V, modificando a tensão de alimentação de 0 até 110V. A rotação (n) e o torque resultantes acionam um gerador síncrono (GS) que gera tensões (V) cujos níveis podem ser controlados pela corrente de campo (I_c) da máquina síncrona. A potência (P) fornecida a um conjunto de cargas (C) compostas por resistências ou lâmpadas elétricas implementa variações de carga (distúrbios de torque) através de modificações na corrente de campo do gerador, ou por chaveamento das cargas. A malha de controle de velocidade empregada está indicada na figura 53:

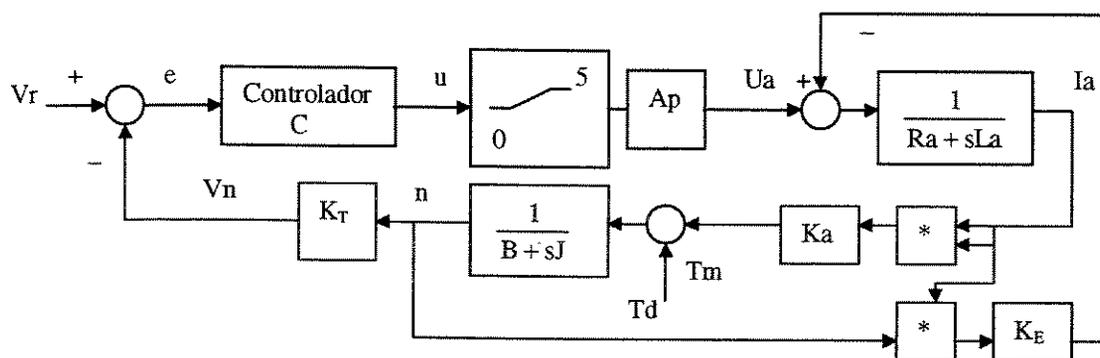


Figura 53. Malha de controle de velocidade aplicada a sistemas de tração.

$A_p=22$ é o ganho do driver, e $K_T=0.0025$ V/rpm a constante do transdutor de velocidade (tacômetro) que fornece sinais de 0 até 5V para rotações de 0 até 2000 rpm. T_m é o torque desenvolvido pelo motor (função quadrática da corrente de armadura I_a), e T_d representa um torque de distúrbio (modificado através de chaveamento das cargas ou pela corrente de campo do

gerador). Os parâmetros do motor: resistência (R_a) e indutância (L_a) devido as bobinas de armadura e excitação série; momento de inércia (J) e atrito (B) do conjunto motor-carga; constante de torque (K_a) e de tensão induzida (K_E) são determinados através de ensaios e dados do fabricante da máquina. Neste exemplo $R_a=10\ \Omega$, $L_a=1.5\ \text{H}$, $K_a=0.1\ \text{Nm/A}^2$, $B=0.0005\ \text{Nm/rpm}$, $J=0.0025\ \text{Nm/rpm}^2$, $K_E=0.003\ \text{V/Arpm}$. A potência mecânica do motor empregado é de 1 HP (para rotações de até 1800 rpm), logo não há necessidade da malha de controle de corrente, pois, devido às impedâncias da máquina as variações de corrente não excedem o valor máximo permitido para este motor ($I_a=15\text{A}$).

As especificações do sistema de controle devem ser $MF \approx 60^\circ$, $W_{cg} \approx 2.5\ \text{rd/s}$ ($M_s < 25\%$, $T_a < 4\text{s}$), e sensibilidade $S(jW) < 2\ \text{dB}$ para rejeição de distúrbios. Usando o procedimento geral para análise e projeto de sistemas de controle fuzzy, vem:

[Estágio 1]

As especificações estão descritas acima.

[Estágio 2]

Respostas em frequência do conjunto driver-motor-transdutor (V_n/u) estão indicadas na figura 54 para sinais de comando em $u=[1.5; 2.5; 5]$.

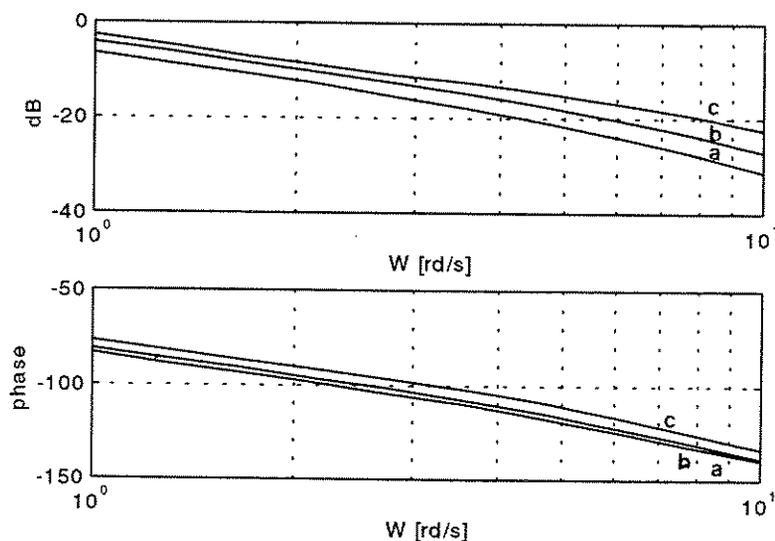


Figura 54. Respostas do conjunto driver-motor-transdutor (V_n/u) para $u=[1.5; 2.5; 5]$ ^{a, b, c}.

[Estágio 3]

Um compensador fuzzy tipo PI, como o da figura 6(a) da página 24, é apropriado para a compensação do sistema. Os limites dos universos de discurso serão definidos em +/- 32 para evitar problemas de saturação.

[Estágio 4]

A maior solitação de compensação é para $u=1.5$ (curvas (a) da figura 54). É possível usar a equivalência com um compensador PI linear para estimar os ganhos do controlador fuzzy. Um acréscimo de aproximadamente 10 dB na curva de módulo leva a resposta do sistema próximo do valor especificado para W_{cg} , e, usando a equação (17) da página 30, vem $K_p=3.16$. Um decréscimo na curva de fase de -25° traz a resposta do sistema para as proximidades do valor especificado para a margem de fase. Isto ocorre para a frequência de canto do controlador próxima de 1.25 rd/s, de onde, através da equação (16) vem $K_i=3.95$. Como as curvas de módulo e fase do processo aumentam com a amplitude do sinal de comando, se o controlador fuzzy puder ter sua frequência de canto deslocando para a esquerda com o aumento da amplitude de entrada, a margem de fase do sistema tenderá a se manter. Usando as expressões deduzidas no capítulo 3 é possível estimar larguras para as funções de pertinência de modo que esta característica ocorra. Um valor de $w=26$ na partição central da função de pertinência (correspondente a variável integral) produz este efeito.

[Estágio 5]

As respostas em frequência do controlador fuzzy tipo PI, da planta compensada, e da sensibilidade do sistema estão mostradas nas figuras 55, 56, e 57 respectivamente. Esses gráficos são para a amplitude $e=0.5$, que se relaciona com $u=2.5$ através da expressão (30). Verifica-se que as curvas da figura 56 são a soma aproximada das figuras 55 e 54 (curvas (b) do gráfico para $u=2.5$), indicando uma compensação razoável ($MF=57^\circ$, $W_{cg}=2$ rd/s). Várias outras amplitudes foram simuladas, obtendo-se resultados semelhantes.

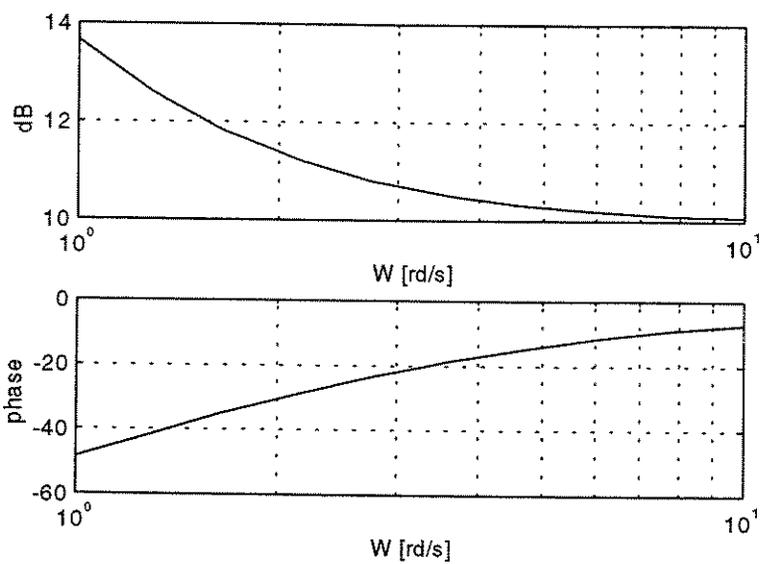


Figura 55. Resposta do CF-PI para $e=0.5$.

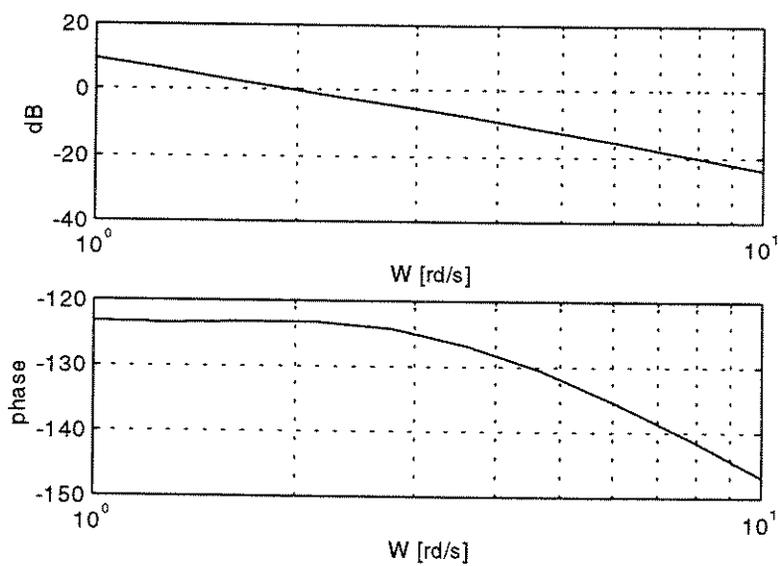


Figura 56. Resposta do sistema compensado para $e=0.5$.

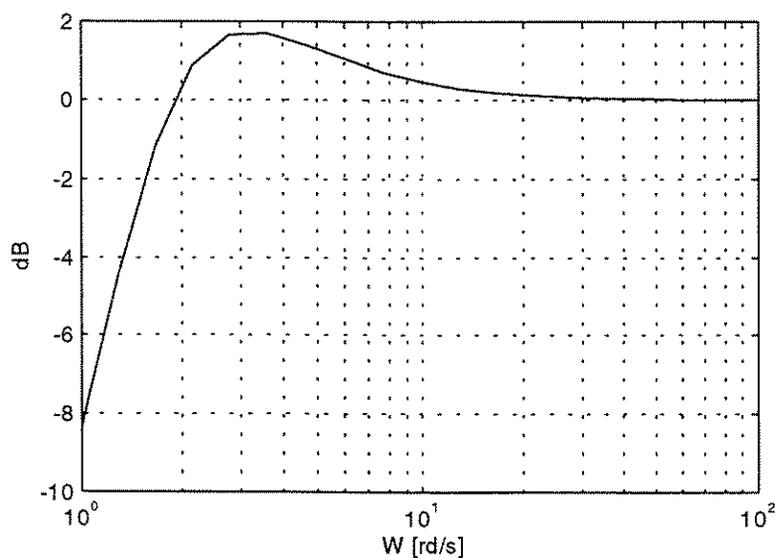


Figura 57. Sensibilidade do sistema $S(jW) < 2$ dB conforme especificado.

[Estágio 6] e [Estágio 7]

A resposta normalizada (V_n / V_r) simulada da malha de controle fuzzy está na figura 58 para uma referência de velocidade de 1000 rpm ($V_r=2.5V$), e $T_d=0$. Observa-se que as características dinâmicas estão boas: $M_s < 25\%$ e $T_a < 4$ s.

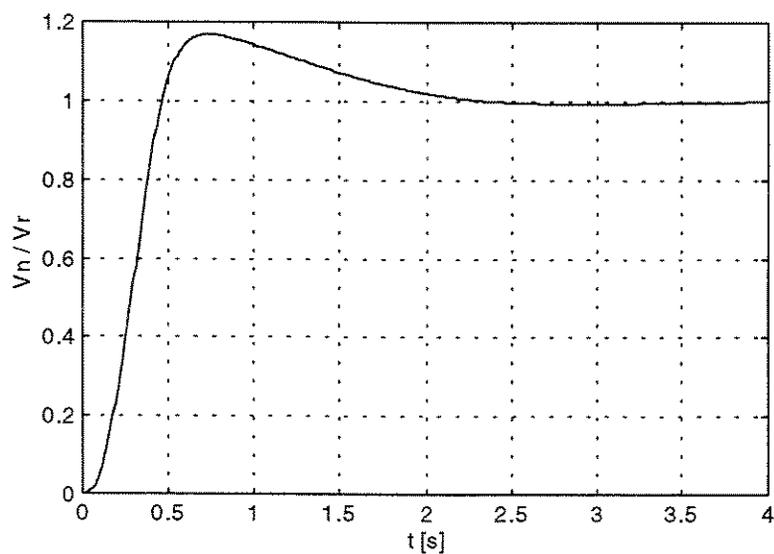


Figura 58. Resposta normalizada do sistema para referência relativa a 1000 rpm.

A seguir serão mostradas medidas experimentais da malha de controle de velocidade implementada em laboratório. O hardware do controlador, um PI clássico e um fuzzy, foi implementado em um microcomputador acoplado a conversores analógicos-digitais (A/D) e digitais-analógicos (D/A), como na figura 59:

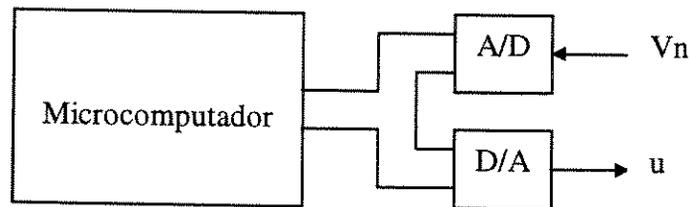


Figura 59. Hardware do controlador (C) da figura 53.

A resolução dos conversores é de 8 bits, equívulendo a precisões de 0.4%. Programas escritos em linguagem C++ implementam os controladores deste exemplo. Além de realizar as malhas de velocidade, os programas também registram informações para construção de gráficos de resposta dinâmica do sistema ensaiado. A resposta normalizada da malha de controle fuzzy para uma referência de 1000 rpm e motor a vazio ($T_d=0$) está registrada na figura 60, sendo fácil notar que a resposta obtida é bem semelhante a simulada na figura 58, mostrando que os parâmetros do sistema foram razoavelmente estimados:

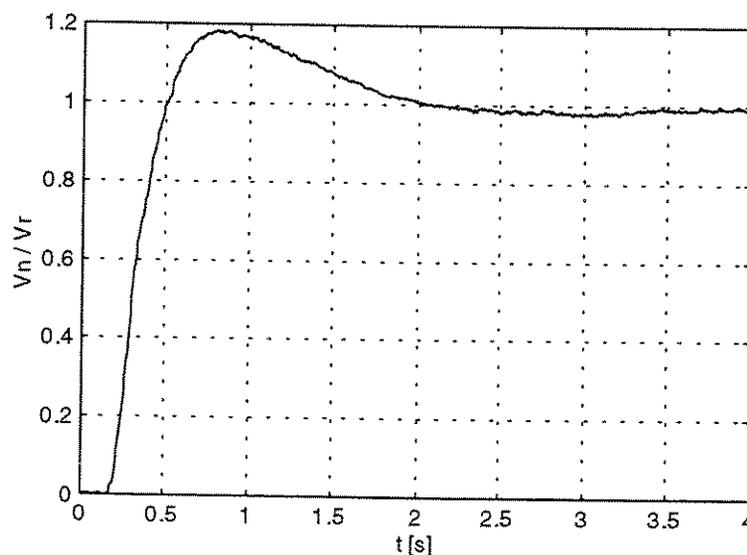


Figura 60. Registro da resposta normalizada (V_r/V_n) para referência de 1000 rpm.

As figuras 61 e 62 são, respectivamente, registros das respostas (normalizadas) de um compensador PI linear e do controlador fuzzy para referências relativas a 600 e 1400 rpm. É fácil observar que as respostas do controlador fuzzy apresentam desempenho melhor do que as fornecidas pelo compensador PI clássico (usando os mesmos ganhos equivalentes K_p , K_i , g_e , g_v), isto porque o controlador fuzzy apresenta característica não linear, que tende a compensar a não linearidade do processo.

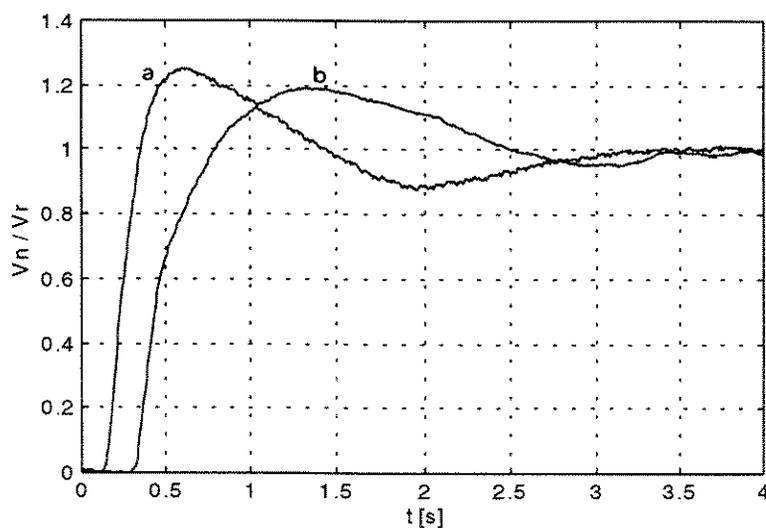


Figura 61. Registro de respostas com um PI clássico para referências em 600^a e 1400^b rpm.

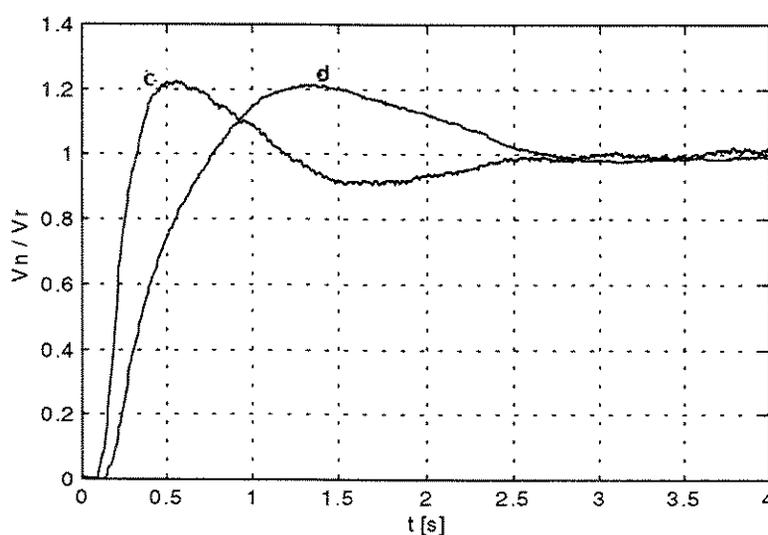


Figura 62. Registro de respostas com um CF-PI para referências em 600^c e 1400^d rpm.

A figura 63 traz o registro da resposta do sistema de controle fuzzy na presença de distúrbios. O motor parte a vazio ($T_d=0$) e após 6s é aplicada uma carga com torque de $T_d=1$ Nm; em $t=11$ s a carga é retirada ($T_d=0$). O sistema apresenta características de robustez (rejeitando variações) em conformidade com a especificação de $S(j\omega)$, sendo a referência de velocidade relativa a 1000 rpm (as modificações no sinal de comando do sistema estão mostradas na figura 64). A figura 65 é a resposta do sistema com o motor partindo agora em carga constante de $T_d=1$ Nm, e a figura 66 registra o respectivo sinal de comando (u).

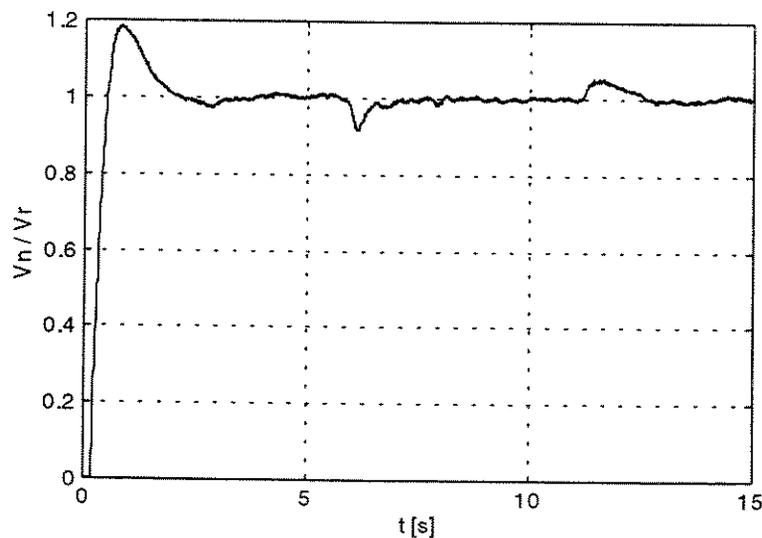


Figura 63. Resposta da malha fuzzy para variações em T_d nos tempos $t=[6; 11]$ s.

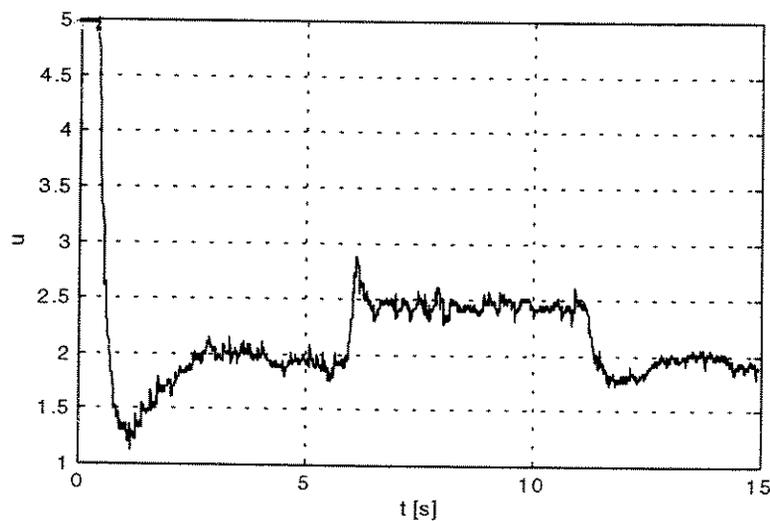


Figura 64. Sinal de comando (u) do sistema.

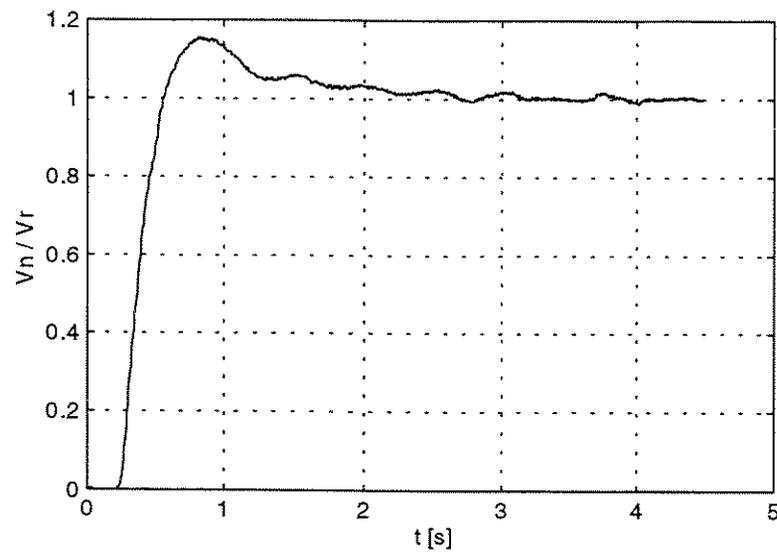


Figura 65. Resposta do sistema de controle fuzzy com o motor partindo com carga $T_d=1$ Nm.

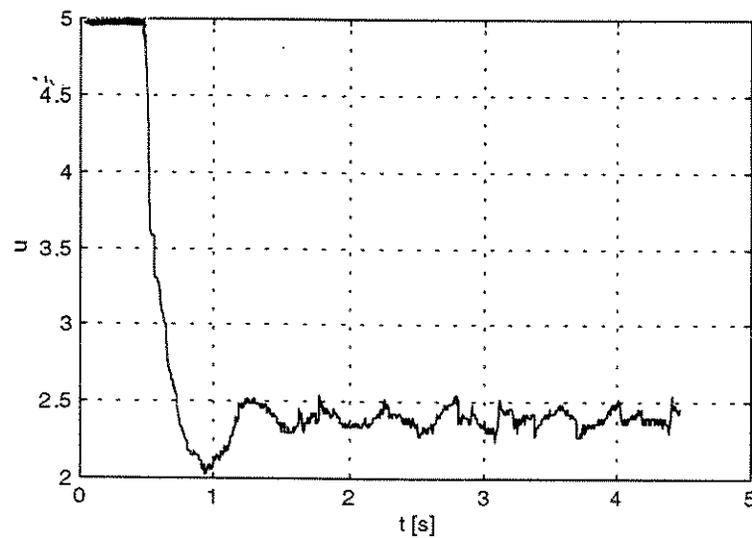


Figura 66. Sinal de comando (u) com o motor partindo sob carga.

A montagem de laboratório mostrou que a metodologia proposta para análise e projeto de sistemas de controle fuzzy é razoavelmente precisa e simples para ser aplicada a sistemas práticos. O método utiliza procedimentos fáceis para tratar de questões de sintonia e robustez em sistemas de controle fuzzy que geralmente não são abordados por outros trabalhos.

6.4 Resumo

A metodologia de análise e projeto de sistemas de controle fuzzy para processos com incertezas proposta neste capítulo apresentou resultados promissores. Com um embasamento calcado em técnicas consagradas do domínio da freqüência, este método se mostrou fácil de usar e interpretar. Apresentou resultados semelhantes ou superiores a algumas técnicas disponíveis na literatura, e incorpora também uma forma eficiente para abordar problemas de robustez associados a não linearidades, variações de parâmetros e perturbações em sistemas físicos. Assim, a análise e sintonia de sistemas de controle fuzzy pode ser realizada de uma forma simples e sistemática. Procurou-se usar alguns exemplos para ilustrar o emprego do método proposto, sendo um deles efetivamente implementado em laboratório para confirmar a aplicabilidade do método a sistemas reais.

Capítulo 7

Análise e sintonia de controladores fuzzy para sistemas MIMO

7.1 Introdução

O propósito deste capítulo é utilizar conceitos do domínio da frequência para analisar e sintonizar malhas de controle fuzzy em sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO). Existem algumas técnicas para tratar de sistemas de controle MIMO que são bem conhecidas na literatura. Por exemplo, extensões do método QFT foram realizadas para sistemas não lineares, multivariáveis, etc., [Horowitz (1991)] onde processos não lineares são modelados como entradas adicionais de perturbações a serem rejeitadas, mas a obtenção dessas entradas equivalentes não é trivial. Como solução alternativa, Nataraj et al. (1997) empregam equações de Volterra e funções descritivas para modelar de modo mais direto processos não lineares. Para sistemas MIMO existem vários métodos que consideram interações entre malhas, desacoplamentos, etc. MacFarlane (1979) reuniu as técnicas básicas para análise e projeto de sistemas de controle multivariáveis lineares e não lineares. Nanka-Bruce (1989) mostrou que, para sistemas não lineares MIMO, o uso de técnicas de funções descritivas com as entradas do sistema excitadas em amplitudes iguais permite prever (em alguns tipos de sistemas) a ocorrência de ciclos limites e, portanto, a estabilidade do sistema. Maciejowski (1990) sugere que, em sistemas MIMO, antes de se empregar técnicas como vetores inversos de Nyquist (*Rosenbrock's inverse Nyquist array*), lugares característicos (*MacFarlane's characteristic locus*), e outras, tente-se projetar as malhas ignorando a natureza multivariável do problema. Não se usam inicialmente processamentos para tornar a matriz que representa o processo diagonalmente dominante, e não se empregam estruturas de desacoplamento. Compensadores de entradas e saídas singelas (SISO) são especificados e sintonizados para pares de variáveis de entradas e saídas como se o sistema fosse diagonal. Gjoseter et al. (1997) mostraram que controladores diagonais podem ser mais simples e robustos (apesar de uma redução nas características de regulação do sistema) do que controladores com desacoplamento, onde a regulação é melhor, mas que podem não apresentar robustez na presença de variações de parâmetros. No artigo foram

comparadas as respostas de compensadores PID diagonais, controladores com desacoplamento, e controladores tipo μ -ótimo. Outros métodos também usados em sistemas MIMO são LQG, H_∞ , e μ -síntese [Shahian e Hassul (1993)].

7.2 Procedimento para análise e sintonia de controladores fuzzy em sistemas MIMO

Neste trabalho serão utilizadas técnicas semelhantes às aquelas empregadas em Nanka-Bruce (1989) e Maciejowski (1990) para sistemas de controle MIMO não fuzzy: análise por conceitos de funções descritivas e sintonia das malhas de controle como se o sistema MIMO fosse composto por múltiplos sistemas SISO. Isto permite a utilização da abordagem proposta no capítulo 6 para cada malha de controle fuzzy individualmente. Os próximos exemplos ilustrarão a utilização destes conceitos, e os resultados obtidos serão comparados com soluções alternativas encontradas na literatura.

7.3 Exemplos

Os dois modelos deste capítulo são sistemas MIMO de duas variáveis de entrada e duas de saídas com acoplamento entre as variáveis, sendo provenientes de trabalhos encontrados na literatura. Um deles possui funções lineares e não lineares distintas (apesar do acoplamento), e utiliza compensadores não lineares com ganhos variáveis. O outro é altamente não linear, modelando um sistema de pistão de combustão interna de motores a explosão, e emprega controladores fuzzy projetados por técnicas de *cell mapping*. O uso do procedimento proposto neste capítulo visa obter resultados iguais ou melhores aos dos exemplos mencionados.

Exemplo 8:

A planta do sistema de controle MIMO ilustrada na figura 67 é proveniente de Nanka-Bruce (1989). O sistema de duas entradas e saídas, possui dois elementos não lineares (N_1 e N_2), de limitações de ganho, semelhantes aos da figura 38(b) da página 70, com os parâmetros $K_{x1}=1$, $K_{x2}=0.2$ e $x=1$. As respostas dinâmicas obtidas utilizando compensadores não lineares (C_1 e C_2) foram $M_s < 20\%$ e $T_a < 5.5s$ na faixa de referências $r_1=r_2=[0.3, 3.5]$. As funções G_{11} , G_{12} , G_{21} , e G_{22} são:

$$G_{11} = \frac{3}{(s+1)(s+2)}, \quad G_{12} = \frac{2}{(s+1)(s+2)}, \quad G_{21} = \frac{2}{(s+1)(s+2)}, \quad G_{22} = \frac{6}{(s+1)(s+2)}.$$

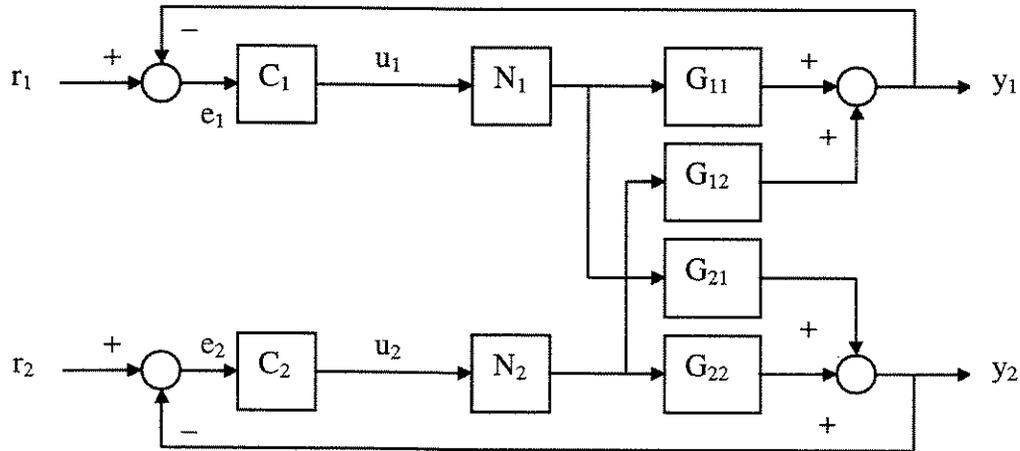


Figura 67. Sistema de controle MIMO com elementos não lineares.

Neste exemplo serão usados dois controladores fuzzy como compensadores C_1 e C_2 . As especificações das malhas de controle são $MF \approx 55^\circ$ e $W_{cg} \approx 2$ rd/s visando alcançar as mesmas características dinâmicas do trabalho mencionado.

[Estágio 1]

As especificações já estão definidas.

[Estágio 2]

Respostas em frequência (y_1/u_1 , y_2/u_2) da planta são mostradas nas figuras 68 e 69 para

sinais de comando com amplitudes $u_1=u_2=[0.3; 3.5]$:

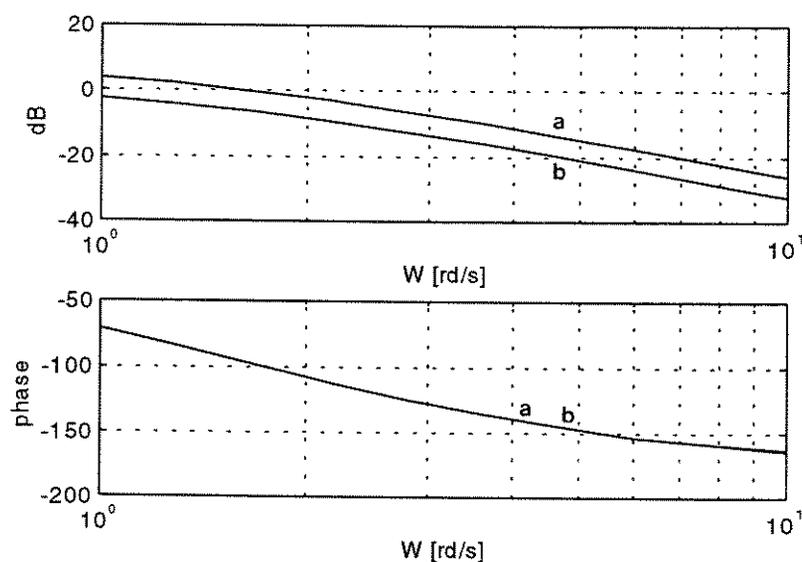


Figura 68. Diagramas de Bode de y_1/u_1 para $u_1=u_2=[0.3; 3.5]$ ^{a, b}.

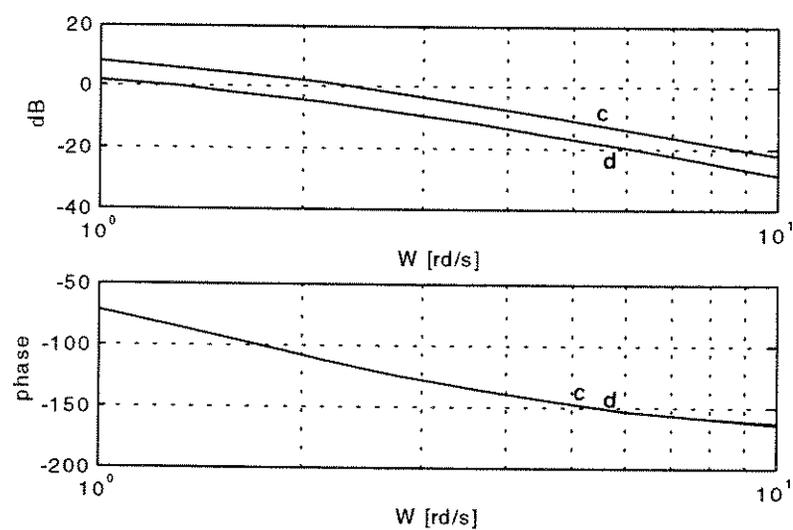


Figura 69. Diagramas de Bode de y_2/u_2 para $u_1=u_2=[0.3; 3.5]$ ^{c, d}.

[Estágio 3]

Como as funções da planta não apresentam pólos na origem, compensadores PI são adequados para compensar o sistema, fazendo com que os erros tendam a zero. Assim, serão

usados controladores fuzzy tipo PI com seus limites dos universos de discurso definidos em ± 32 para evitar problemas de saturação.

[Estágio 4]

As maiores solicitações de compensação são para as curvas de módulo superiores (amplitudes mais intensas), pois com as curvas de módulo menores as margens de fase tendem a aumentar. Usando a analogia com compensadores PI lineares vem: um acréscimo de aproximadamente 3.5 dB na curva de módulo de y_1/u_1 leva a resposta da malha próximo do valor especificado para W_{cg} , e, através da equação (17)⁶, vem $K_{p1}=1.5$. Um decréscimo na curva de fase próximo de -20° traz a resposta do sistema para valores próximos ao especificado da MF. Isto ocorre para a frequência de canto do controlador próxima de 1 rd/s, e através da equação (16), vem $K_{i1}=1.5$. Um decréscimo perto de -6 dB na curva de módulo de y_2/u_2 leva a resposta da malha para um valor próximo do especificado para W_{cg} , e da equação (17) vem $K_{p2}=0.5$. Um decréscimo na curva de fase próximo de -20° traz a resposta do sistema perto do valor especificado da MF. Isto ocorre para a frequência de canto do controlador próxima de 1 rd/s, e da equação (16) vem $K_{i2}=0.5$. Como as curvas de módulo da planta aumentam com as amplitudes dos sinais de comando, se os controladores fuzzy puderem ter suas frequências de canto deslocando-se para a esquerda com o aumento da magnitude das entrada, as margens de fase do sistema tenderão a se manter. Usando as expressões deduzidas no capítulo 3 é possível estimar as larguras para as funções de pertinência de modo que esta característica ocorra. Um valor de $w=12$ nas partições centrais das funções de pertinência (integrals dos erros) produz este efeito.

[Estágio 5]

Obtendo as respostas em frequência do sistema compensado, verifica-se que é necessário deslocar mais a frequência do controlador da malha y_2/u_2 . Fazendo $K_{i2}=0.25$ chega-se a respostas satisfatórias. Os diagramas de Bode das figuras 70 e 71 são, respectivamente, as respostas das malhas y_1/e_1 e y_2/e_2 para as amplitudes $e_1=e_2= [0.3; 3.5]$. As margens de fase e frequências de cruzamento de ganho estão próximas do especificado: $55^\circ < MF < 67^\circ$ e $1 < W_{cg} < 2$ rd/s. Os valores de margem de fase maiores tendem a produzir sobrelevações menores; os valores menores de W_{cg} devem ser testados para verificar se não comprometem os tempos de acomodação exigidos.

⁶ Páginas 29 e 30.

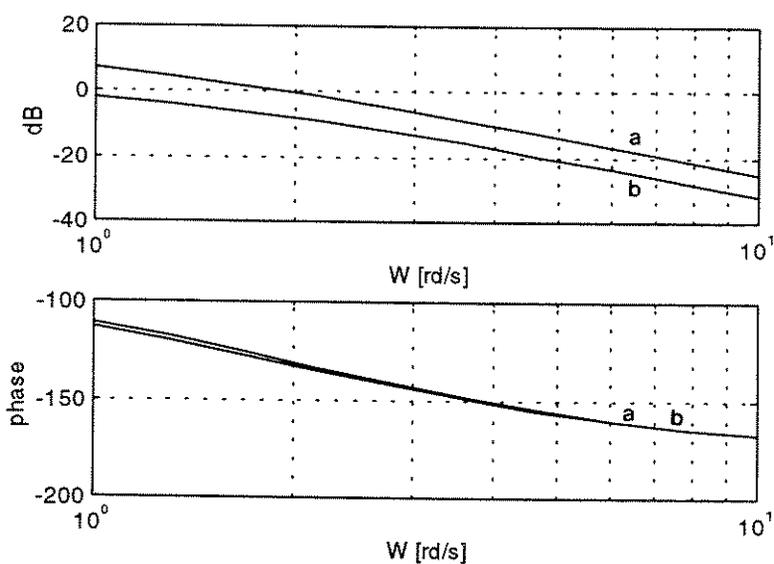


Figura 70. Respostas da malha y_1/e_1 compensada $(e_1=e_2=[0.3; 3.5])^{a, b}$.

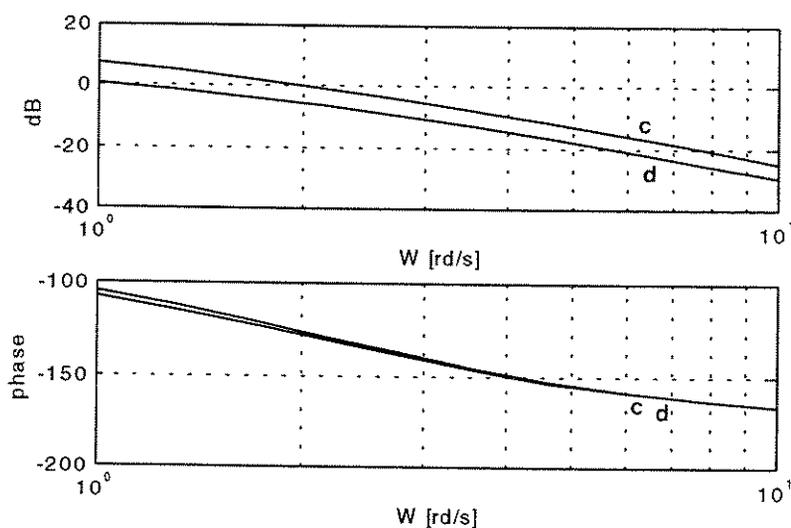


Figura 71. Respostas da malha y_2/e_2 compensada $(e_1=e_2=[0.3; 3.5])^{c, d}$.

[Estágio 6] e [Estágio 7]

Respostas normalizadas (y/r) das malhas de controle fuzzy estão mostradas nas figuras 72 e 73 para referências $r_1=r_2=[0.3; 3.5]$. Observa-se que as características dinâmicas estão boas: $M_s < 20\%$ e $T_a \cong 5$ s. Outras combinações de referências foram testadas com resultados igualmente satisfatórios.

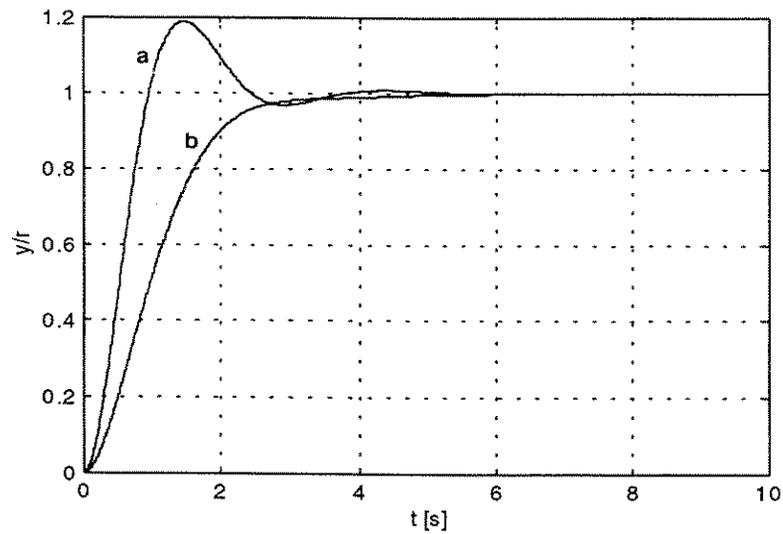


Figura 72. Respostas normalizadas (y_1/r_1) do sistema de controle fuzzy para $r_1=r_2=[0.3; 3.5]^{a,b}$.

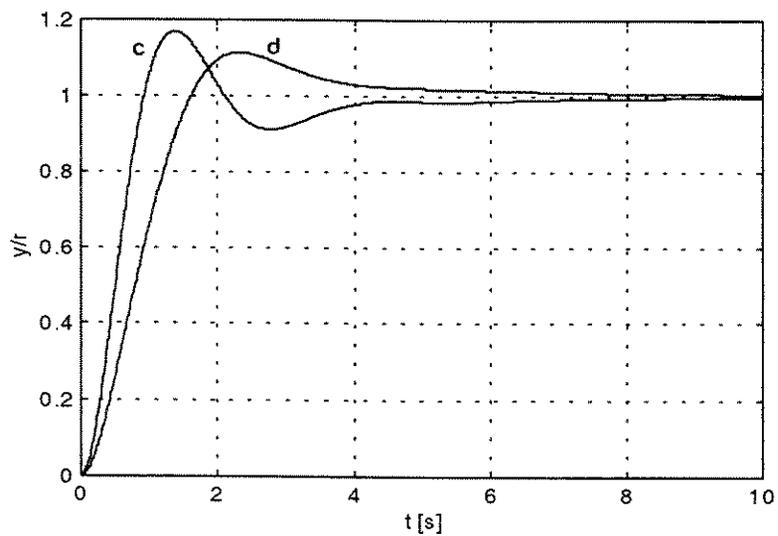


Figura 73. Respostas normalizadas (y_2/r_2) do sistema de controle fuzzy para $r_1=r_2=[0.3; 3.5]^{c,d}$.

Este exemplo mostrou que o procedimento proposto para analisar e sintonizar sistemas de controle fuzzy de múltiplas entradas e saídas é promissor. Os resultados obtidos têm a mesma faixa de precisão dos encontrados no trabalho mencionado e não necessitam de métodos de inversão de funções descritivas para projetar e sintonizar as malhas de controle.

Exemplo 9:

As equações (38) são provenientes de Vachtsevanos et al. (1993) e expressam o modelo de um pistão de combustão interna. Este sistema MIMO tem como entradas o ângulo (θ) da válvula de comando de injeção da mistura ar-combustível, e o ângulo (δ) de avanço da centelha de comando de ignição. As saídas são a pressão (P) na câmara do pistão e a rotação (N) da biela do mesmo. Os parâmetros são: $C_1=0.0197$; $C_2=101.325$; $C_3=0.907$; $C_4=0.0998$; $C_5=-5.968 \cdot 10^{-4}$; $C_6=-0.1336$; $C_7=5.341 \cdot 10^{-4}$; $C_8=1.757 \cdot 10^{-6}$; $C_9=-39.22$; $C_{10}=2708.533$; $C_{11}=-0.0112$; $C_{12}=7.068 \cdot 10^{-5}$; $C_{13}=0.635$; $C_{14}=2.262 \cdot 10^{-3}$; $C_{15}=-1.118 \cdot 10^{-6}$; $C_{16}=1.444 \cdot 10^{-5}$; $C_{17}=0.72$; $C_{18}=12.65$; $T_d=-60$. Os autores usaram um sistema de controle fuzzy para regular a pressão e a rotação em valores definidos nas entradas de referência (figura 74). O projeto do sistema empregou técnicas de *cell-group*. Foram obtidos resultados de respostas dinâmicas do sistema para três situações de projeto: erro mínimo; tempo de resposta mínimo; e energia mínima. Partindo de condições iniciais de pressão e rotação (34 kPa e 1150 rpm), as respostas variaram nos intervalos [18, 40] Kpa e [620, 1150] rpm, até estabilizar nos valores das referências 34 kPa e 750 rpm, com tempos de acomodação menores que 2.5 s.

$$g(P) = \begin{cases} 1 & \text{se } P < 50.66 \\ C_1(C_2P - P^2)^{1/2} & \text{se } P \geq 50.66 \end{cases},$$

$$\dot{m}_{ai} = (1 + C_3\theta + C_4\theta^2)g(P),$$

$$\dot{m}_{ao} = C_5N + C_6P + C_7NP + C_8NP^2,$$

$$T_i = C_9 + C_{10} \frac{\dot{m}_{ao}}{N} + C_{11}\delta^2 + C_{12}\delta N + C_{13}\delta + C_{14}N + C_{15}N^2,$$

$$T_L = C_{16}N^2 + T_d,$$

$$P = C_{17}(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}),$$

$$N = C_{18}(T_i - T_L). \quad (38)$$

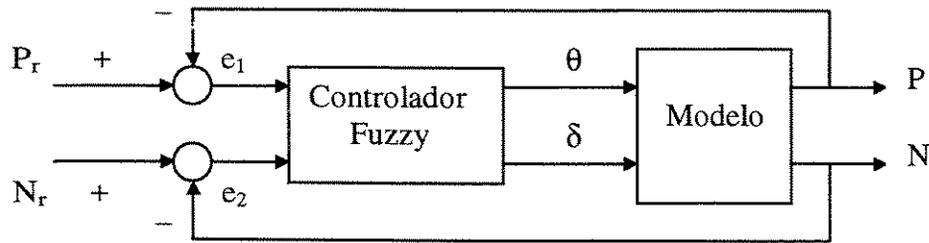


Figura 74. Sistema de controle do exemplo 9.

Neste exemplo será empregado o procedimento proposto para análise e sintonia de sistemas de controle fuzzy MIMO, visando conseguir as mesmas características de resposta dinâmica que as apresentadas no artigo mencionado. Para esta finalidade serão usadas as especificações: $MF \geq 70^\circ$ e $W_{cg} \geq 4$ rds/s.

[Estágio 1]

As especificações estão definidas acima.

[Estágio 2]

Obtendo as respostas em frequência do sistema na faixa de interesse ($1 < W < 10$ rd/s), verifica-se que as curvas de módulo e fase das malhas (P/θ e N/δ) não mudam muito com as amplitudes de entrada. As fases variam de apenas -0.5° até 2° , e os módulos de -20 até -12 dB aproximadamente. A figura 75 ilustra a resposta para a malha de pressão.

[Estágio 3]

Dois controladores fuzzy tipo PI podem ser adequados para compensar o sistema. Para efeito de comparações com o exemplo do artigo mencionado, as funções de pertinência terão limites de 80 para a variável do erro de pressão, e 1500 para a variável do erro de rotação. Com 5 partições por variáveis, as larguras das funções de pertinência são de 40 e 750 respectivamente.

[Estágio 4]

Semelhantemente ao exemplo 8, usando a analogia com compensadores PI lineares pode-se estimar os ganhos dos controladores fuzzy. Para diminuir de -20 dB e -12 dB as curvas de

módulo das malhas do processo, vem $K_{p1}=0.1$ e $K_{p2}=0.25$. Adotando as frequências de canto dos controladores em 10 rd/s, calculam-se $K_{i1}=1$ e $K_{i2}=2.5$.

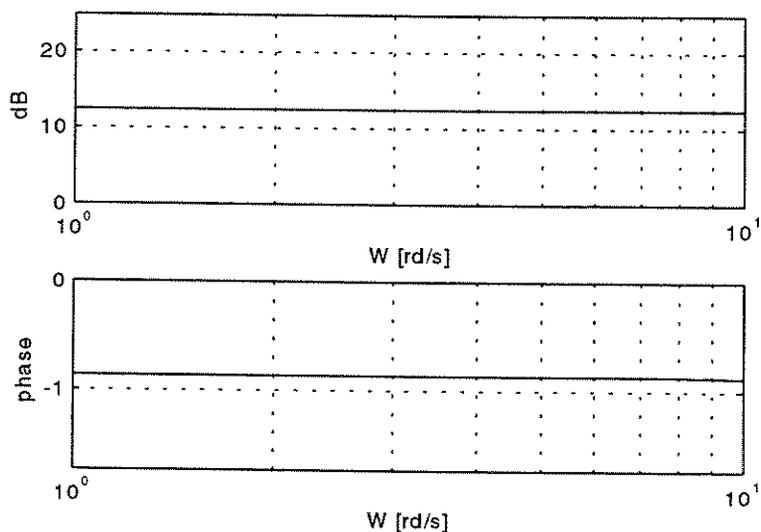


Figura 75. Exemplo da resposta em frequência da malha de pressão.

[Estágio 5]

Obtendo as respostas em frequência do sistema compensado, verifica-se que é necessário deslocar mais a frequência W_c do controlador da malha de rotação. Fazendo $K_{i2}=1$ obtêm-se

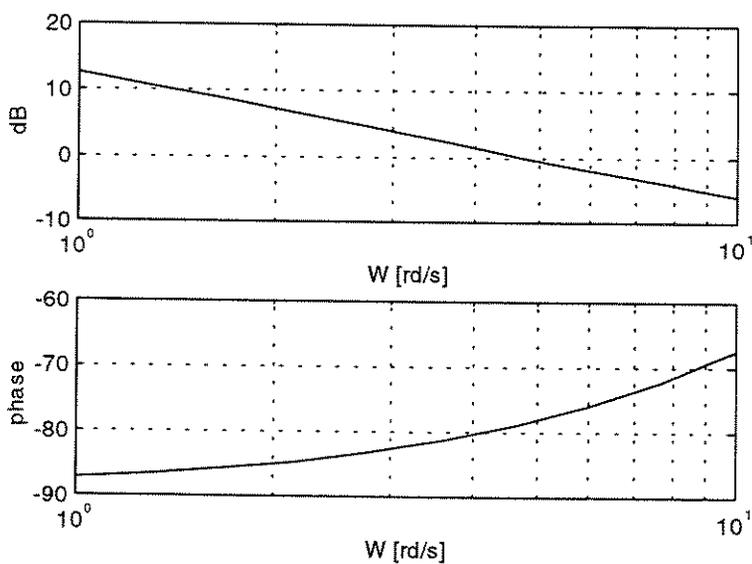


Figura 76. Exemplo da malha de pressão compensada.

respostas satisfatórias. Para incrementar deslocamentos das frequências de canto dos controladores fuzzy com eventuais variações das amplitudes, as larguras das partições centrais das variáveis relativas à pressão e à rotação são ajustadas respectivamente em 35 e 700. O diagrama de Bode da figura 76 ilustra a compensação da malha de pressão (a de rotação é bem semelhante). A margem de fase e a frequência de cruzamento de ganho estão na faixa especificada $MF > 70^\circ$ e $W_{cg} > 4$ rd/s.

[Estágio 6] e [Estágio 7]

Respostas dinâmicas das malhas de controle (com as condições iniciais $P=34$ e $N=1150$), estão na figura 77 para as referências $P_r=34$ e $N_r=750$. Os resultados obtidos estão na mesma ordem de grandeza do trabalho mencionado, e os tempos de acomodação obtidos foram melhores. Outras respostas (ilustradas nas figuras 78 e 79) para diferentes valores de referências mostram a regulação satisfatória do sistema de controle fuzzy sintonizado pela abordagem proposta. Além de ser simples de usar e interpretar, a metodologia apresentada neste capítulo possui esforços computacionais menores do que métodos como o *cell-group*.

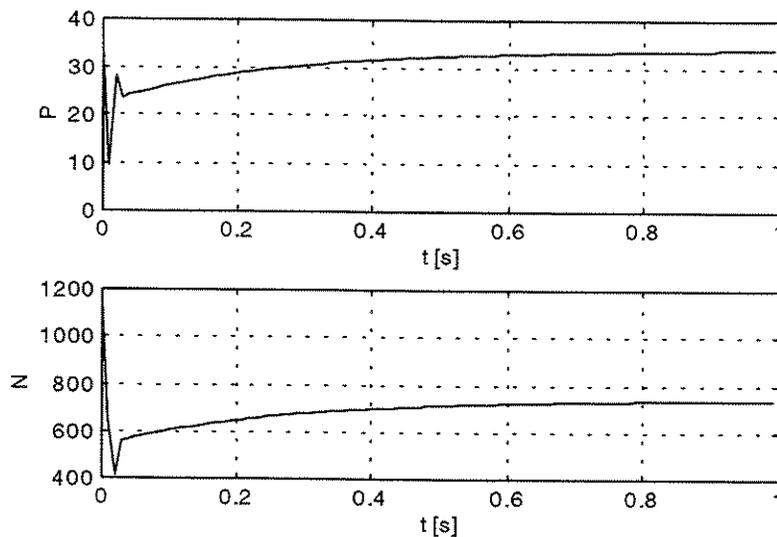


Figura 77. Respostas das malhas de controle fuzzy sintonizadas ($P_r=34$ e $N_r=750$).

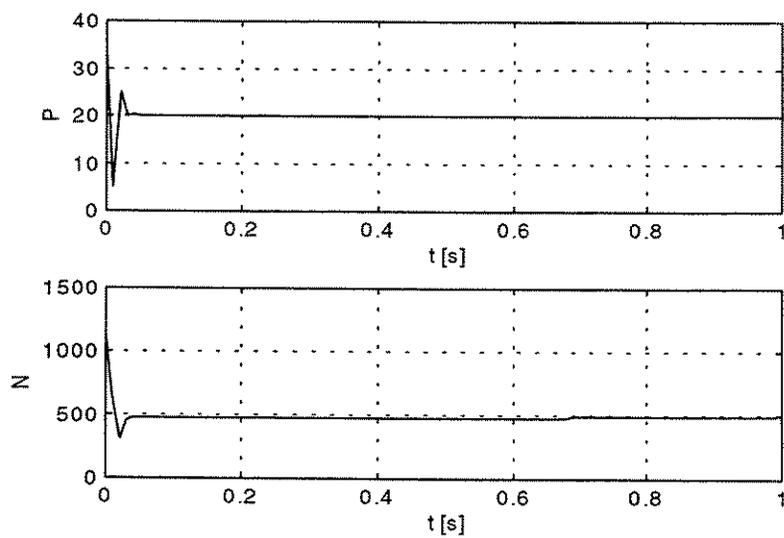


Figura 78. Respostas das malhas de controle fuzzy sintonizadas ($P_r=20$ e $N_r=500$).

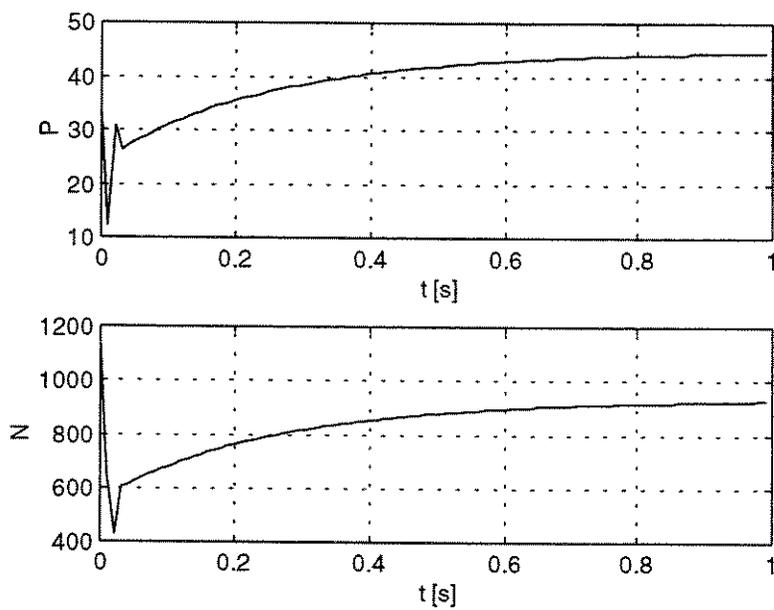


Figura 79. Respostas das malhas de controle fuzzy sintonizadas ($P_r=45$ e $N_r=950$).

7.4 Resumo

A abordagem proposta neste trabalho para análise e sintonia de malhas de controle fuzzy de sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) apresentou resultados promissores. Os valores obtidos mostraram-se semelhantes ou superiores aos obtidos através de métodos alternativos da literatura. A metodologia proposta fornece uma maneira sistemática e intuitivamente fácil para analisar, projetar, e sintonizar sistemas de controle fuzzy, tanto de malhas singelas (SISO) como para sistemas MIMO.

Capítulo 8

Conclusão geral

Neste trabalho foram deduzidas algumas expressões analíticas que mostraram as similaridades entre controladores fuzzy convencionais e compensadores lineares clássicos. Foi desenvolvida uma forma simples para obter respostas em frequência de sistemas de controle fuzzy. Através deste procedimento investigou-se a influência de diversos itens (fatores de escala, funções de pertinência, métodos de inferência, e outros) nas respostas dinâmicas de controladores fuzzy. Foram propostas duas abordagens para projetar, analisar, e sintonizar sistemas de controle fuzzy através de métodos do domínio da frequência: uma para processos não lineares determinísticos e outra mais genérica para sistemas com variações de parâmetros, lineares e não lineares. Os resultados obtidos mostraram-se promissores, proporcionando valores semelhantes ou superiores quando comparados a métodos alternativos propostos na literatura. Um dos exemplos constituiu-se de uma implementação real em laboratório.

As contribuições desta tese podem ser resumidas conforme descrito a seguir. As análises comparando controladores fuzzy com compensadores lineares indicaram em quais situações eles são equivalentes e como as características não lineares dos controladores fuzzy podem ser usadas e ajustadas para compensar processos não lineares, incluindo aqueles com variações de parâmetros. O procedimento para obtenção de respostas em frequência de sistemas não lineares mostrou-se bastante útil para analisar a influência de diversos fatores dos controladores fuzzy. As abordagens propostas para projeto, análise e sintonia de sistemas de controle fuzzy mostraram-se sistemáticas, simples e fáceis de serem usadas, apresentando portanto, um grande potencial prático.

Em trabalhos futuros pretende-se investigar os seguintes tópicos: 1) A aplicação da transformada *wavelet* no lugar da FFT no procedimento para obter respostas em frequência de sistemas não lineares, quando os comportamentos não forem periódicos. 2) A investigação, através de técnicas de resposta em frequência, das influências de estruturas de redes neurais em sistemas de controle. 3) O uso de métodos de computação evolutiva, visando uma maior generalização nas técnicas de sintonia propostas.

Referências Bibliográficas

- Abdelnour, G. M., Chang, C. H., Huang, F. H., Cheung, J. Y. Design of a fuzzy controller using input and output mapping factors. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.21, p.952-960, 1991.
- Abdelnour, G. M., Cheung, J. Y., Chang, C. H., Tinetti, G. Application of describing functions in the transient response analysis of a three-term fuzzy controller. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.23, p.603-606, 1993_a.
- Abdelnour, G. M., Cheung, J. Y., Chang, C. H., Tinetti, G. Steady - state analysis of a three-term fuzzy controller. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.23 p.607-610, 1993_b.
- Abreu, A., Custódio, L., Ferreira, C. P. Fuzzy modelling: a rule based approach. *Proc. 5th IEEE IEEE International Conference On Fuzzy Systems*, p.162-168, 1996.
- Arnould, T. Fuzzy relations for rule modeling. *VI IFSA World Congress*, p.125-128, 1995.
- Aström, K. J., Wittenmark, B. *Adaptive Control*. Addison-Wesley, 1989.
- Atherton, D. P. *Nonlinear Control Engineering*. Nostrand Reinhold, 1975.
- Atherton, D. P. A describing functions approach for the evaluation of fuzzy logic control. *Proc. American Control Conference*, p.765-766, 1993.
- Baaklini, N., Mamdani, E. H. Prescriptive methods for deriving control policy in a fuzzy-logic controller. *Electronic Letters*, v.11, p.625-626, 1975.
- Babuska, R., Verbruggen, H. B. A new identification method for linguistic fuzzy models. *Proc. 4th IEEE International Conference On Fuzzy Systems*, p.905-912, 1995.
- Babuska, R., Fantuzzi, C., Kaymak, U., Verbruggen, H. Improved inference for Takagi-Sugeno models. *Proc. 5th IEEE International Conference On Fuzzy Systems*, p.701-706, 1996.
- Bae, S. W., Park, T. H., Lee, K. S., Park, G. T. An on-line fuzzy identification method utilizing fuzzy model evaluation. *Proc. 5th IFSA World Congress*, p.1226-1229, 1993.
- Bartolini, G., Casalino, G., Davoli, F., Mastretta, M., Minciardi, R., Morten, E. Development of performance adaptive fuzzy controllers with applications to continuous casting plants. In *Industrial Applic. of Fuzzy Control*. North-Holland, p.41-61, 1985.
- Bastian, A. Towards a fuzzy system identification theory. *VI IFSA World*, p.125-128, 1995.
- Batur, C., Kasparian, V. A real-time fuzzy self-tuning control. *Proc. IEEE Int. Conf. on Syst. Engineering*, p.1810-1815, 1989.

- Batur, C., Kaparian, V. Predictive fuzzy expert controllers. *Computers Ind. Eng.*, v.20, p.199-209, 1991.
- Berger, M. A new parametric family of fuzzy connectives and their application to fuzzy control. *Fuzzy Sets and Systems*, v.93 p.1-16, 1998.
- Bitmead, R. R., Gevers, M., Wertz, V. Adaptive optimal control: The thinking man's GPC. Prentice Hall, 1990.
- Bourke, M. M., Fisher, D. G. A predictive fuzzy relational controller. Proc. 5th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.1464-1470, 1996.
- Braae, M., Rutherford, D. A. Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controllers. *Automatica*, v.15, p.553-577, 1979.
- Branco, P. J. C., Dente, J. A. A new algorithm for on-line relational identification of nonlinear dynamic systems. Proc. 2nd IEEE Int. Conference On Fuzzy Systems, p.1173-1178, 1993.
- Buckley, J. J., Ying, H. Fuzzy controller theory: Limit theorems for linear fuzzy control rules. *Automatica*, v.25, p.469-472, 1989.
- Buckley, J. J. Universal fuzzy controllers. *Automatica*, v.28, p.1245-1248, 1992.
- Buckley, J. J. Sugeno type controllers are universal controllers. *Fuzzy Sets and Systems*, v.53, p.299-303, 1993.
- Calcev, G., Gorez, R., Neyer, M. Passivity approach to fuzzy control systems. *Automatica*, v.34, p.339-344, 1998.
- Campello, R. J. G. B., Nazzetta, R. M., Amaral, W. A new methodology for fuzzy model identification. Proc 7th IFSA World Congress, p.366-370, 1997.
- Campello, R. J. G. B. Uma nova metodologia para identificação adaptativa de modelos relacionais fuzzy. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- Campello, R. J. G. B., Amaral, W. Refinement and identification of fuzzy relational models. Proc. 7th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.651-656, 1998.
- Campello, R. J. G. B., Nazzetta, R. M., Amaral, W. C. A Highly adaptive algorithm for fuzzy modelling of systems. *Int. J. Unc., Fuzziness and Knowledge – Based Syst.*, v.6, p.35-50, 1998_a.
- Campello, R. J. G. B., Amaral, W. C., Nazzetta, R. M., Oliveira, G. H. C. Controle preditivo de processos não lineares utilizando modelos dinâmicos nebulosos. XII Congresso Brasileiro de Automática, v.1, p.163-168, 1998_b.

- Cao, S. G., Rees, N. W. Identification of dynamic fuzzy models. *Fuzzy Sets and Systems*, v.74, p.307-320, 1995.
- Cao, S. G., Rees, N. W., Feng, G. Stability analysis of fuzzy control systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B*, v.26, p.201-204, 1996.
- Cao, S. G., Rees, N. W., Feng, G. Analysis and design for a class of complex control systems-Part I: Fuzzy modelling and identification. *Automatica*, v.33, p.1017-1028, 1997_a.
- Cao, S. G., Rees, N. W., Feng, G. Analysis and design for a class of complex control systems-Part II: Fuzzy controller design. *Automatica*, v.33, p.1029-1039, 1997_b.
- Cao, S. G., Rees, N. W., Feng, G. Lyapunov-like stability theorems for continuous-time fuzzy control systems. *Int. J. Control*, v.69, p.49-64, 1998.
- Castro, J. L., Delgado, M. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.26, p.149-152, 1996.
- Chak, C. K., Feng, G., Ma, J. An adaptive fuzzy neural network for MIMO system model approximation in high-dimensional spaces. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B*, v.28, p.436-446, 1998.
- Chalam, V. V. Adaptive control systems. Marcel Dekker Inc., 1987.
- Chen, Y. Y., Tsao T. C. A description of the dynamical behavior of fuzzy systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.19, p.745-755, 1989.
- Chen, C. L., Chen, P. C., Chen, C. K. Analysis and design of fuzzy control system. *Fuzzy Sets and Systems*, v.57, p.125-140, 1993.
- Chen, J. Q., Lu, J. H., Chen, L. J. Analysis and synthesis of fuzzy closed-loop control systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.25, p.881-888, 1995.
- Chen, C. L., Kuo, F. C. Design and analysis of a fuzzy logic controller. *Int. J. Systems Sci.*, v.26, p.1223-1248, 1995.
- Chen, C. L., Chang, F. Y. Design and analysis of neural/fuzzy variable structural PID control systems. *IEE Proc. Control Theory and Applic.*, v.143, p.259-269, 1996.
- Chen, C. L., Wang, S. N., Hsieh, C. T., Chang, F. Y. Theoretical analysis of crisp-type fuzzy logic controllers using various t-norm sum-gravity inference methods. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.6, p.122-136, 1998.
- Chen, C. L., Chang, M. H. Optimal design of fuzzy sliding - model control : A comparative study. *Fuzzy Sets and Systems*, v.93, p.37-48, 1998.

- Chiu, S. L. A. A cluster estimation method with extension to fuzzy model identification. Proc. 3rd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst., p.1240-1245, 1994.
- Cho, H. J., Cho, K. B., Wang, B. H. Fuzzy - PID hybrid control : Automatic rule generation using genetic algorithms. Fuzzy Sets and Systems, v.92, p.305-316, 1997.
- Chui, C. K. An introduction to Wavelets. Academic Press ,1992.
- Chung, H. Y., Chen, B. C., Lin, J. J. A PI-type fuzzy controller with self-tuning scaling factors. Fuzzy Sets and Systems, v.93, p.23-28, 1998.
- Cipriano, A., Ramos, M., Briseno, H., Montoya, F. Comparative analysis of two models identification methods. Proc. 3rd European Control Conf., p.1213-1218, 1995.
- Czogala, E., Pedrycz, W. On identification in fuzzy systems and its applications in control problems. Fuzzy Sets and Systems, v.6, p.73-83, 1981.
- Czogala, E., Pedrycz, W. Control problems in fuzzy systems. Fuzzy Sets and Systems, v.7, p.257-273, 1982.
- Czogala, E., Drewniak, J., Pedrycz, W. Fuzzy relation equation on a finite set. Fuzzy Sets and Systems, v.7, p.89-101, 1982.
- D'Azzo, J. J., Houpis, C. H. Linear control system analysis and design. McGraw Hill, 1988.
- Driankov, D., Hellendoorn, H., Reinfrank, M. An introduction to fuzzy control. Springer-Verlag, 1996.
- Emami, M. R., Turksen, I. B., Goldenberg, A. A. Development of a systematic methodology of fuzzy logic modeling. IEEE Trans. On Fuzzy Systems, v.6, p.346-361, 1998.
- Eykhoff, P. System Identification: Parameter and State Estimation. John Wiley & Sons, 1974.
- Filev, D. P., Yager, R. R. Fuzzy models induced by alternative defuzzification methods. Proc. 5th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.457-462, 1996.
- Fischer, M., Schmidt, M., Biasizzo, K. K. Nonlinear predictive control based on the extraction of step response models from Takagi-Sugeno fuzzy systems. Proc. American Control Conf., Albuquerque, in CD ROM, 1997.
- Fischer, M., Nelles, O., Isermann, R. Predictive control based on local linear fuzzy model. Int. J. of Systems Science, v.29, p.679-697, 1998.
- Galichet, S., Foulloy, L. Fuzzy controllers : Synthesis and Equivalences. IEEE Trans. On Fuzzy Systems, v.3, p.140-148, 1995.
- Gegov, A. Distributed fuzzy control of multivariable systems. Kluwer Acad. Pub., 1996.

- Gegov, A. E. Multilayer fuzzy control of multivariable systems by direct decomposition. *Int. J. of Systems Science*, v.29, p.851-862, 1998.
- Gelb, A., Velde, W. E. V. Multiple input describing functions and nonlinear system design. MacGraw Hill, 1968.
- Georgescu, C., Afshari, A., Bornard, G. Fuzzy predictive PID controllers: A heating control application. *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst.*, p.1414-1418, 1993_a.
- Georgescu, C., Afshari, A., Bornard, G. Fuzzy model based predictive control and its application to building energy management systems. *Proc. 2nd European Control Conf.*, p.487-492, 1993_b.
- Ghalia, M. B. Modelling and robust control of uncertain dynamical systems using fuzzy set theory. *Int. J. Control*, v.68 p.1367-1395, 1997.
- Gjoseter, O. B., Foss, B. A. On the use of diagonal control versus decoupling for ill conditioned processes. *Automatica*, v.33, p.427-432, 1997.
- Glorennec, P. Y. Adaptive fuzzy control. *Proc. IFSA'91*, p.33-36, 1991.
- Gottwald, S. Generalized solvability criteria for fuzzy equations. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.17, p.285-296, 1985..
- Gottwald, S., Pedrycz, W. Solvability of fuzzy relational equations and manipulation of fuzzy data. *Fuzzy Sets and Systems*, v.18, p.45-65, 1986.
- Graham, B. P., Newell, R. B. Fuzzy adaptive control of a first-order process. *Fuzzy Sets and Systems*, v.31, p.47-65, 1989.
- Guillemin, P. Fuzzy logic applied to motor control. *IEEE Trans. On Industry Applications*, v.32, p.51-56, 1996.
- Güvenç, L. Fuzzy logic controller analysis and design for stability using normalized fuzzy sets. *Proc. IASTED Int. Conf.*, p.4-8, 1995.
- Harris, C. J., Moore, C. G. Real time fuzzy based self-learning predictors and controllers. 12th IFAC World Congress, p.180-186, 1990.
- Harris, C. J., Moore, C. G., Brown, M. Intelligent control: Aspects of fuzzy logic and neural nets. World Scientific Publishing Co., 1993.
- Hayashi, S. Auto-tuning fuzzy PI controller. *Proc. IFSA'91*, p.41-44, 1991.

- Hecker, O., Nelles, O., Moseler, O. Nonlinear system identification and predictive control of a heat exchanger based on local linear fuzzy models. Proc. American Control Conference, Albuquerque, in CD ROM, 1997.
- Higashi, M., Klir, G. J. Identification of fuzzy relation systems. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v.14, p.349-355, 1984_a.
- Higashi, M., Klir, G. J. Resolution of finite fuzzy relation equations. Fuzzy Sets and Syst., v.13, p.65-82, 1984_b.
- Hirota, K., Pedrycz, W. Directional fuzzy clustering and its application to fuzzy modeling. Fuzzy Sets and Systems, v.80 p.315-326, 1996.
- Hopgood, A. A., Phillips, H. J., Picton, P. D., Braithwaite, N. S. J. Fuzzy logic in a black board system for controlling plasma deposition processes. Artificial Intelligence in Eng., v.12, p.253-260, 1998.
- Horowitz, I. M. Synthesis of feedback systems. Academic Press, 1963.
- Horowitz, I. M., Sidi, M. Synthesis of feedback system with large plant ignorance for prescribed time domain tolerances. Int. J. Control, v.16, p.287-309, 1972.
- Horowitz, I. M. Survey of quantitative feedback theory (QFT). Int. J. Control, v.53, p.255-291, 1991.
- Hsu, C. S. A theory of cell-to-cell mapping dynamical systems. Trans. ASME J. Applied Mech., v.47, p.931-939, 1980.
- Hwang, G. C., Lin, S. C. A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems. Fuzzy Sets and Systems, v.48 p.279-287, 1992.
- Ikoma N., Hirota, K. Nonlinear autoregressive model based on fuzzy relation. Inf. Sciences, v.71, p.131-144, 1993.
- Jia, L. M., Zhang, X. D. A fuzzy cell mapping based approach to the modelling of multivariable fuzzy systems. Control & Decision, v.8, p.271-277, 1993.
- Jin, Y., Jiang, J., Zhu, J. Neural network based fuzzy identification and its application to modeling and control of complex systems. IEEE Trans. SMC, v.25, p.990-997, 1995.
- Jin, Y. Decentralized adaptive fuzzy control of robot manipulators. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B, v.28, p.47-57, 1998.
- Johansen, T. A. Robust identification of Takagi-Sugeno-Kang fuzzy models using regularization. Proc. 5th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.180-186, 1996.

- Kang, K., Vachtsevanos, G. Adaptive fuzzy logic control. Proc. 1st IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.407-414, 1992.
- Kang, H. Stability and control of fuzzy dynamic systems via cell-state transitions in fuzzy hypercubes. IEEE Trans. On Fuzzy Systems, v.1, p.267-279, 1993.
- Kaymak, U., Souza, J. M., Verbruggen, H. B. A comparative study of fuzzy and conventional criteria in model-based predictive control. Proc. 6th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst., p.907-914, 1997.
- Khan, B. Z., Lehman, B. Setpoint PI controllers for systems with large normalized dead time. IEEE Trans. On Control Systems Technology, v.4, p.459-466, 1996.
- Kickert, W. J. M., Mamdani, E. H. Analysis of a fuzzy logic controller. Fuzzy Sets and Syst., v.1, p.29-44, 1978.
- Kim, S. W., Lee, J. J. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface. Fuzzy Sets and Systems, v.71, p.359-367, 1995.
- Kim, E., Park, M., Ji, S., Park, M. A new approach to fuzzy modeling. IEEE Trans. On Fuzzy Systems, v.5, p.328-337, 1997.
- King, P. J., Mamdani, E. H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. IFAC World Congress, 1975: in Fuzzy Automata and Decision Processes, North-Holland, p.321-330, 1977.
- Kiriakidis, K., Tzes, A., Grivas, A. Peng, P. Y. Modeling, plant uncertainties, and fuzzy logic sliding control of gaseous systems. IEEE Trans. Control Syst. Tech., v.7, p.42-55, 1999.
- Kiszka, J. B., Kochanska, M. E., Sliwinska, D. S. The influence of some fuzzy implication operators on the accuracy of a fuzzy model. Fuzzy Sets and Syst., v.15, Part I: p.111-128, Part II: p.223-240, 1985.
- Kobylarz, T. J., Pachter, M., Houppis, C. H. Fuzzy scheduling of regional QFT controllers. Int. J. of Robust and Nonlinear Control, v.7, p.661-674, 1997.
- Kosko, B. Fuzzy systems as universal approximators. IEEE Trans. On Computers, v.43, p.1329-1333, 1994.
- Krishnan, K. R., Cruickshanks, A. Frequency domain design of feedback systems for specified insensitivity of time domain response to parameter variation. Int. J. Control, v.25, p.609-620, (1977).
- Kroll, A. Identification of functional fuzzy models using multidimensional reference fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems, v.80, p.149-158, 1996.

- Kwok, D. P., Tam, D., Li, C. K., Wang, P. Linguistic PID controllers. Proc. 11th IFAC World Congress, p.192-197, 1990.
- Lee, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-Part I and II. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v.20, p.404-435, 1990.
- Lee, Y. C., Hwang, C., Shih, Y. P. A combined approach to fuzzy model identification. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v.24, p.736-743, 1994.
- Leephakpreeda, T., Batur, C. Stability of a class of fuzzy controllers. Proc. Int. Mechanical Eng. Congress, p.399-415, 1994.
- Levrat, E., Dubois, G., Bombardier, V. Lamotte, M. Generalisation of the resolution of a fuzzy relational equations. Proc. 2nd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems, p.1414-1418, 1993.
- Lewis, F. L., Liu, K. Towards a paradigm for fuzzy logic control. Automatica, v.32, p.167-181, 1996.
- Li, H. X., Gatland, H. B. A new methodology for designing a fuzzy logic controller. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v.25, p.505-512, 1995.
- Li, H. X., Gatland, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B, v.26, p.791-797, 1996.
- Li, H. X., Gatland, H. B., Green, A. W. Fuzzy variable structure control. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B, v.27, p.306-312, 1997.
- Li, H. X. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B, v.27, p.884-889, 1997.
- Li, H. X. Approximate model reference adaptive mechanism for nominal gain design of fuzzy control systems. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part A, v.29, p.41-46, 1999.
- Linkens, D. A., Abbod, M. F. Self - organizing fuzzy logic controllers for real time processes. Proc. IEE Control 91 Conf., p.971-976, 1991.
- Ljung, L. System Identification: Theory for the User. Prentice Hall, 1987.
- Lo, J. C., Kuo, Y. H. Decoupled fuzzy sliding-model control. IEEE Trans. On Fuzzy Syst., v.6, p.426-435, 1998.
- Logan, M. W., Pachter, M. Model - based fuzzy logic control of a nonlinear plant. Int. J. of Robust and Nonlinear Control, v.7, p.643-660, 1997.
- MacFarlane, A. G. J. Frequency response methods in control systems. IEEE Press, 1979.
- Maciejowski, J. M. Multivariable feedback design. Addison Wesley, 1990.

- Maiers, J., Sherif, Y. S. Applications of fuzzy set theory. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.15, p.175-189, 1985.
- Malki, H. A., Li, H., Chen, G. New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems. *IEEE Trans. On Fuzzy Syst.*, v.2, p.245-254, 1994.
- Mamdani, E. H., Assilian, S. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEE, Pt. D*, v.121, p.1585-1588, 1974.
- Mamdani, E. H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man-Mach. Stud.*, v.7, p.1-13, 1975.
- Manoranjan, V. S., Lazaro, A. S., Edwards, D., Athalye, A. A systematic approach to obtaining fuzzy sets for control systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.25, p.206-213, 1995.
- Margaliot, M., Langholz, G. Hyperbolic optimal control and fuzzy control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part A*, v.29, p.1-10, 1999.
- Marin, J. P., Titli, A. Comparative analysis of stability methods for fuzzy controllers. *Proc. EUFIT'94*, p.1183-1187, 1994.
- Marin, J. P., Titli, A. On the use of describing function to analyse and design fuzzy controllers. *VI IFSA World Congress*, p.57-60, 1995.
- Martignoni, A. Máquinas eléctricas de corriente contínua. Editora Globo, 1977.
- Mastorocostas, P., Theocharis, J. Orthogonal least squares fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems. *Proc. 6th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst.*, p.1147-1152, 1997.
- Mouzouris, G. C., Mendel, J. M. Dynamic non-singleton fuzzy logic systems for nonlinear modeling. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.5, p.199-208, 1997.
- Nakamori, Y., Suzuki, K., Yamanaka, T. Model predictive control using fuzzy dynamic models. *Proc. 4th IFSA World Congress*, p.135-138, 1991.
- Nakamori, Y., Ryoike, M. Identification of fuzzy prediction models through hyperellipsoidal clustering. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.24, p.1153-1173, 1994.
- Nanka-Bruce, O., Atherton, D. P. Design of nonlinear controllers for nonlinear plants. *IFAC Congress*, p.75-80, 1990.
- Nanka-Bruce, O. Some computer aided design methods for nonlinear control systems. PhD Thesis, University of Sussex, England, 1989.

- Nataraj, P. S. V., Date, P., Umrani, A. Robust feedback synthesis for nonlinear integro differential equation models using generalized describing functions. *Automatica*, v.33, p.959-962, 1997.
- Nie, J., Linkens, D. A. Fast self - learning multivariable fuzzy controllers constructed from a modified CPN network. *Int. J. Control*, v.60, p.369-393, 1994.
- Nie, J. Constructing fuzzy model by self-organizing counterpropagation network. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.25, p.963-970, 1995.
- Nie, J. Fuzzy control of multivariable nonlinear servomechanisms with explicit decoupling scheme. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.5, p.304-311, 1997.
- Nie, J., Lee, T. H. Self - organizing rule - based control of multivariable nonlinear servomechanisms. *Fuzzy Sets and Systems*, v.91, p.285-304, 1997.
- Nie, J., Lee, T. H. Rule - based control of Wiener - type nonlinear processes through self-organizing. *Int. J. of Systems Science*, v.29, p.275-286, 1998.
- Nola, A., Pedrycz, W., Sessa, S. Some theoretical aspects of fuzzy - relations equations describing fuzzy systems. *Information Sciences*, v.34, p.241-264, 1984.
- Nola, A., Pedrycz, W., Sessa, S., Sanchez, E. Fuzzy relation equations theory as a basis of fuzzy modelling: An overview. *Fuzzy Sets and Systems*, v.40, p.415-429, 1991.
- Oliveira, J. V. Neuron inspired learning rules for fuzzy relational structures. *Fuzzy Sets and Systems*, v.57, p.41-53, 1993.
- Oliveira, J. V., Lemos, J. M. System modelling and fuzzy relational identification. *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.1074-1078, 1993.
- Oliveira, J. V., Lemos, J. M. Fuzzy model based long-range predictive control. *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.378-381, 1994.
- Oliveira, J. V., Lemos, J. M. Long-range predictive adaptive fuzzy relational control. *Fuzzy Sets and Systems*, v.70, p.337-357, 1995_a.
- Oliveira, J. V., Lemos, J. M. Speeding up fuzzy relational identification: the RLS approach. *VI IFSA World Congress*, p.121-124, 1995_b.
- Oliveira, J. V. A design methodology for fuzzy systems interfaces. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, v.3, p.404-414, 1995.
- Oliveira, J. V. Semantic constraints for membership function optimization. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part A*, v.29, p.128-138, 1999.

- Ollenu, A. T., White, B. A. Robust output tracking for MIMO nonlinear systems: An adaptive fuzzy systems approach. *IEE Proc. Control Theory and Applicat.*, v.144, p.537-544, 1997.
- Ortmeyer, T. H., Hiyama, T. Frequency response characteristics of the fuzzy polar power system stabilizer. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, v.10, p.333-338, 1995.
- Palm, R., Rehfuss, U. Fuzzy controllers as gain scheduling approximators. *Fuzzy Sets and Systems* 85, p.233-246, 1997.
- Park, M. K., Ji, S. H., Kim, M. J., Park, A. M. A new identification method for a fuzzy model. *Proc. 4th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.2159-2164, 1995.
- Pedrycz, W. An approach to the analysis of fuzzy systems. *Int. J. Control*, v.34, p.403-421, 1981.
- Pedrycz, W. Numerical and applicational aspects of fuzzy relational equations. *Fuzzy Sets and Systems*, v.11, p.1-18, 1983.
- Pedrycz, W. Identification in fuzzy systems. *IEEE Trans. SMC*, v.14, p.361-366, 1984_a.
- Pedrycz, W. An identification algorithm in fuzzy relational systems. *Fuzzy Sets and Syst.* v.13, p.153-167, 1984_b.
- Pedrycz, W., Czogala, E., Hirota, K. Some remarks on the identification problem in fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*, v.12, p.185-189, 1984.
- Pedrycz, W. Applications of fuzzy relational equations for methods of reasoning in presence of fuzzy data. *Fuzzy Sets and Systems*, v.16, p.163-175, 1985_a.
- Pedrycz, W. On generalized fuzzy relational equations and their applications. *Journal of Math. Analysis and Applications*, v.107, p.520-536, 1985_b.
- Pedrycz, W. Approximate solutions of fuzzy relational equations. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.28, p.183-202, 1988.
- Pedrycz, W. Algorithms for solving fuzzy relational equations in a probabilistic setting. *Fuzzy Sets and Systems*, v.38, p.313-327, 1990.
- Pedrycz, W. Fuzzy modelling: fundamentals construction and evaluation. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.41, p.1-15, 1991.
- Pedrycz, W. Fuzzy control and fuzzy systems. John Wiley & Sons, 1993.
- Pedrycz, W., Oliveira, J. V. Optimization of fuzzy relational models. *Proc. 5th IFSA World Congress*, p.1187-1190, 1993.
- Pedrycz, W., Oliveira, J. V. Fuzzy relational modeling of dynamic systems with regenerative I/O interfaces. *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst.*, p.372-377, 1994.

- Pedrycz, W., Lam, P. C. F., Rocha, A. F. Distributed fuzzy system modeling. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.25, p.769-780, 1995.
- Pedrycz, W., Oliveira, J. V. An algorithmic framework for development and optimization of fuzzy models. *Fuzzy Sets and Systems*, v.80, p.37-55, 1996.
- Pedrycz, W. *Fuzzy modelling - Paradigms and practice*. Kluwer Academic Pub., NY, 1996.
- Pedrycz, W., Gomide, F. A. C. *An introduction to fuzzy sets: Analysis and design*. MIT Press, Cambridge, 1998.
- Penot, N., Mé, L., Trystram, G., Trichard, J. M., Decloux, M. Optimal control of the microfiltration of sugar product using a controller combining fuzzy and genetic approaches. *Fuzzy Sets and Systems*, v.94, p.309-322, 1998.
- Pham, T. D., Karaboga, D. Cross breeding in genetic optimisation and its applications to fuzzy logic controller design. *Artificial. Intelligence in Eng.*, v.12, p.15-20, 1998.
- Phillips, C. L., Harbor, R. *Feedback control systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. Frequency response design of fuzzy controllers. VII IFSA World Congress, v.3, p.434-439, 1997.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. Análise e projeto de controladores fuzzy por resposta em frequência. XII Congresso Brasileiro de Automática, v.6, p.2181-2186, 1998.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. Neural control of nonlinear systems by frequency response. IJCNN Conference, in CD ROM, 1999_a.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. On the equivalence between basic fuzzy and classical controllers. VIII IFSA World Congress, v.2, p.594-597, 1999_b.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. Fuzzy control of nonlinear systems by learning method and frequency response. FUZZ-IEEE Conference, v.1, p.444-448, 1999_c.
- Pinheiro, C. A. M., Gomide, F. A. C. On the tuning of fuzzy controllers. International Fuzzy Systems Conference, 2000 (accepted).
- Postlethwaite, B. Empirical comparison of methods of fuzzy relational identification. *IEE Proc.*, Part D, v.138, p.199-206, 1991.
- Postlethwaite, B. A model-based fuzzy controller. *Chemical Eng. Research & Design*, v.72, p.38-46, 1994.
- Postlethwaite, B. Building a model-based fuzzy controller. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.79, p.3-13, 1996.

- Procyk, T., Mamdani, E. H. A linguistic self-organizing process controller. *Automatica*, v.15, p.15-30, 1979.
- Qin, S. J., Borders, G. A multiregion fuzzy logic controller for nonlinear process control. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.2, p.74-81, 1994.
- Rao, N. U. The General Motors GF6C electric locomotive. *IEEE Trans. On Industry Applications*, v.22, p.502-511, 1986.
- Ray, K. S., Majumder, D. D. Application of circle criteria for stability analysis of linear SISO and MIMO systems associated with fuzzy logic controller. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.14, p.345-349, 1984.
- Raymond, C., Boverie, S., Titli, A. Fuzzy multivariable control design from the fuzzy model. VI IFSA World Congress, p.509-512, 1995.
- Saez, D., Cipriano, A. Design of fuzzy model based predictive controllers and its application to an inverted pendulum. *Proc. 6th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst.*, p.915-919, 1997.
- Sanchez, E. Resolution of composite fuzzy relation equations. *Information and Control*, v.30, p.38-48, 1976.
- Scharf, E. M., Mandic, N. J. The application of a fuzzy controller to the control of a multi-degree-freedom robot arm. In *Industrial Applications of Fuzzy Control - North-Holland*, p.41-62, 1985.
- Schwartz, M., Bennett, W. R., Stein, S. *Communications: Systems and techniques*. IEEE Press, 1996.
- Shahian, B., Hassul, M. *Control system design using MatLab*. Prentice-Hall, 1993.
- Shao, S. Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic processes. *Fuzzy Sets and Systems*, v.26, p.151-164, 1988.
- Shaocheng, T., Tianyou, C. Fuzzy indirect adaptive control for a class of decentralized nonlinear systems. *Int. J. of Systems Science*, v.29, p.149-157, 1998.
- Siler, W., Ying, H. Fuzzy control theory: The linear case. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.33, p.275-290, 1989.
- Sio, K. C., Lee, C. K. Stability of fuzzy PID controllers. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Part A, v.28, p.490-495, 1998.
- Slotine, J. J. E., Li, W. *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, 1991.

- Sugeno, M., Kang, G. T. Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Syst.* v.28, p.15-33, 1988.
- Sugeno, M., Tanaka, K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy Sets and Systems*, v.42, p.315-334, 1991.
- Sugeno, M., Yasukawa, T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.1, p.7-31, 1993.
- Takagi, T., Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.15, p.116-132, 1985.
- Tan, S., Yu, Y. Fuzzy modeling : an adaptive approach. *Proc. 4th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.889-896, 1995.
- Tan, S., Yu, Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems. *Automatica*, v.32, p.637-643, 1996.
- Tanaka, K., Sugeno, M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, v.45, p.135-156, 1992.
- Tanaka, K., Sano, M. Design of fuzzy controllers based on frequency and transient characteristics. *2nd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.111-116, 1993.
- Tanaka, K. Stability and stabilizability of fuzzy-neural-linear control systems. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.3, p.438-447, 1995.
- Tanaka, K., Ikeda, T., Wang, H. O. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: Quadratic stabilizability, H_∞ control theory, and Linear Matrix Inequalities. *IEEE Trans. On Fuzzy Syst.*, v.4, p.1-13, 1996.
- Tanaka, K., Ikeda, T., Wang, H. O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LMI-based designs. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.6, p.250-265, 1998.
- Tang, K. L., Mulholland, R. J. Comparing fuzzy logic with classical controller design. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.17, p.1085-1087, 1987.
- Tanscheit, R., Scharf, E. M. Experiments with the use of a rule - based self - organising controller for robotics applications. *Fuzzy Sets and Systems*, v.26, p.195-214, 1988.
- Taylor, J. H., Strobel, K. V. Nonlinear compensator synthesis via sinusoidal-input describing functions. *Proc. American Control Conference*, p.1242-1247, 1985.
- Taylor, J. H., Lu, J. Computer-aided control engineering environment for the synthesis of nonlinear control systems. *Proc. American Control Conference*, p.2557-2561, 1993.

- Toledo, E. D., Martins, W. W. Tração elétrica. Editora Politécnico, 1976.
- Tong, R. M. Synthesis of fuzzy models for industrial processes: Some recent results. *Int. J. General Systems*, v.4, p.143-162, 1978.
- Tseng, H. C., Hwang, V. H. Servocontroller tuning with fuzzy logic. *IEEE Trans. On Control Syst. Technology*, v.1, p.262-269, 1993.
- Tzes, A., Kyriakides, K. Adaptive fuzzy - control for flexible - link manipulators: a hybrid frequency-time domain scheme. *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Syst.*, p.122-127, 1993.
- Vachkov, G., Hirota, K. Reducing the high dimensionality problem in fuzzy dynamic models. *Proc. 5th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Syst.*, p.1807-1812, 1996.
- Vachtsevanos, G., Farinwata, S. S., Pirovolou, D., K. Fuzzy logic control of an automotive engine. *IEEE Control Systems Magazine*, p.62-68, 1993.
- Vidyasagar, M. *Nonlinear systems analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- Wang, F., Abramovitch, D., Franklin, G. A method for verifying measurements and models of linear and nonlinear systems. *Proc. American Control Conference*, p.93-97, 1993.
- Wang, L. X., Mendel, J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-square learning. *IEEE Trans. Neural Netw.*, v.3, p.807-814, 1992.
- Wang, L. X. *Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis*. Prentice Hall, 1994.
- Wang, L. X. Design and analysis of fuzzy identifiers of nonlinear dynamic systems. *IEEE Trans. On Automatic Control*, v.40, p.11-23, 1995.
- Wang, H. O., Tanaka, K., Griffin, M. F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.4, p.14-23, 1996.
- Wang, L., Langari, R. Complex systems modeling via fuzzy logic. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B*, v.26, p.100-106, 1996.
- Wang, L. X. Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B*, v.26, p.677-691, 1996.
- Wang, L. X. Universal approximation by hierarchical fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Syst.* v.93, p.223-230, 1998.
- Whalen, T., Schott, B., Gin, G. Control of error in fuzzy logic modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, v.80, p.23-35, 1996.

- Willaeys, D., Malvache, N. Contribution of the fuzzy sets to man - machine system. In *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*. North-Holland, p. 481-499, 1979.
- Willaeys, D., Malvache, N. The use of fuzzy sets for treatment of fuzzy information by computer. *Fuzzy Sets and Systems*, v.5, p.323-327, 1981.
- Wong, C. C., Lin, N. S. Rule extraction for fuzzy modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, v.88, p.23-30, 1997.
- Wu, J. C., Liu, T. S. A sliding - mode approach to fuzzy control design. *IEEE Trans. On Control Syst. Thechnology*, v.4, p.141-151, 1996.
- Xu, C. W., Lu, Y. Z. Fuzzy model identification and self - learning for dynamic systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.17, p.683-689, 1987.
- Xu, C. W. Fuzzy systems identification. *IEE Proc.*, Part D, v.136, p.146-150, 1989.
- Xu, J. X., Pok, Y. M., Liu, C., Hang, C. C. Tuning and analysis of a fuzzy PI controller based on gain and phase margins. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Part A, v.28, p.685-691, 1998.
- Yager, R. R., Filev, D. P. Unified structure and parameter identification of fuzzy models. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.23, p.1198-1205, 1993.
- Yager, R. R., Filev, D. P. *Essentials of fuzzy modeling and control*. Jhon Wiley & Sons, 1994.
- Yamazaki, T., Mamdani, E. H. On the performance of a rule-based self-organizing controller. *Proc. IEEE Conf. Applic. of Adaptive and Multivar. Control*, p.50-55, 1982.
- Yamazaki, T. The formulation of a simple fuzzy model tuning predictive controller for MIMO systems. *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.400-405, 1994.
- Yeh, Z. M. Adaptive multivariable fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.86, p.43-60, 1997.
- Yen, J., Wang, L. Simplifying fuzzy rule - based models using orthogonal transformation methods. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Part B, v.29, p.13-24, 1999.
- Yi, S. Y., Chung M. J. Identification of fuzzy relational model and its application to control. *Fuzzy Sets and Systems*, v.59, p.25-33, 1993.
- Yi, S. Y., Chung M. J. Robustness of fuzzy logic control for an uncertain dynamic systems. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.6, p.216-225, 1998.
- Yin, T. K., Lee, C. S. G. Fuzzy model - reference adaptive control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.25, p.1606-1615, 1995.

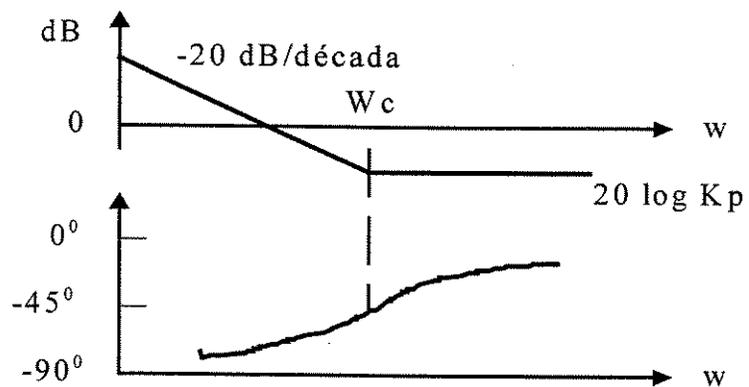
- Ying, H., Siler, W., Buckley, J. J. Fuzzy control theory: A nonlinear case. *Automatica*, v.26, p.513-520, 1990.
- Ying, H. General analytical structure of typical fuzzy controllers and their limiting structure theorems. *Automatica*, v.29, p.1139-1143, 1993_a.
- Ying, H. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains. *Automatica*, v.29, p.1579-1589, 1993_b.
- Ying, H. The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers. *Automatica*, v.34, p.157-167, 1998_a.
- Ying, H. Constructing nonlinear variable gain controllers via the TS fuzzy control. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, v.6, p.226-234, 1998_b.
- Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Inform. and Contr.*, v.8, p.338-353, 1965.
- Zadeh, L. A. A rationale for fuzzy control. *Trans. ASME, J. Dynam. Syst. Measur. Control*, p.3-4, 1972.
- Zadeh, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.3, p.28-44, 1973.
- Zadeh, L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Syst.*, v.1, p.3-28, 1978.
- Zeng, X. J., Singh, M. G. Fuzzy bounded least squares method for the identification of fuzzy systems. *Proc. 6th IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems*, p.403-408, 1997.
- Zhang, T. P., Feng, C. B. Decentralized adaptive fuzzy control for large-scale nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, v.92, p.61-70, 1997.
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., Isaka, S. Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v.23, p.1392-1398, 1993.
- Zhao, J., Wertz, V., Gorez, R. Design a stabilizing fuzzy and / or non-fuzzy state-feedback controller using LMI method. *Proc. 3rd European Control Conf.*, p.1201-1206, 1995.

Apêndice

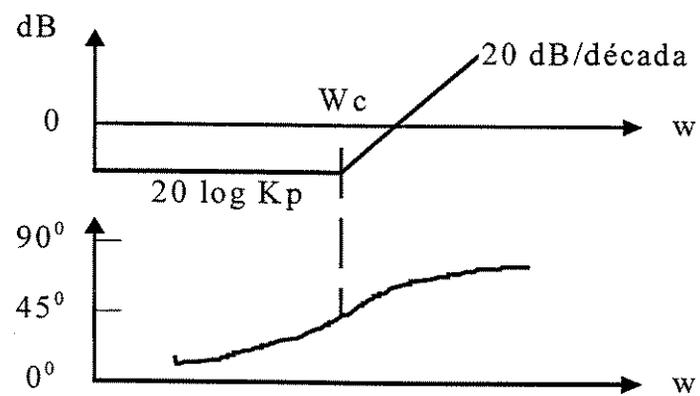
Compensação no domínio da frequência

- Respostas típicas (aproximadas) de compensadores lineares

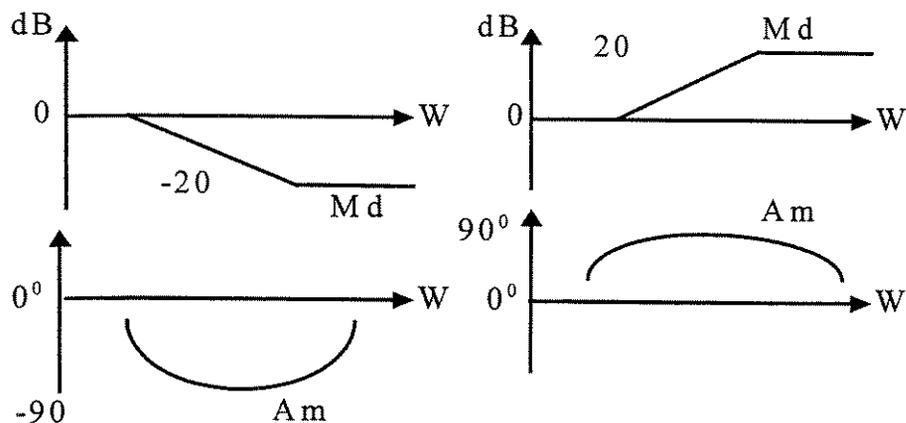
Compensador PI:



Compensador PD:

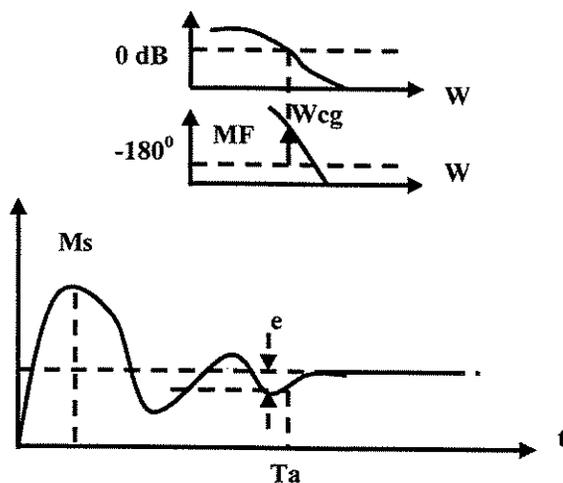


Compensador lag/lead:



- Conceitos de compensação no domínio da frequência

A compensação de um sistema no domínio da frequência é realizada através de alterações nas curvas de fase e de módulo do sistema. Esta etapa é realizada com a inclusão de compensadores (PI, PD, PID, *lag/lead*, etc.) nas malhas de controle. Através das informações de resposta em frequência de sistemas de controle, é relativamente fácil estimar suas características dinâmicas. A informação de margem de fase (MF) está relacionada com a máxima sobrelevação (Ms) da resposta temporal de um sistema e a frequência de cruzamento de ganho (ω_{cg}) relaciona-se com o tempo de acomodação (T_a):



Muitos sistemas reais são modelados (diretamente ou aproximadamente) através da função:

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi W_n s + W_n^2}.$$

O fator de amortecimento (ξ) está relacionado com a máxima sobrelevação (M_s) e a frequência natural de oscilação (W_n) com o tempo de acomodação (T_a):

$$M_s(\%) = 100e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}},$$

$$T_a(e\%) = \frac{C}{\xi W_n},$$

$$\xi \approx 0.01MF,$$

$$W_n \sim W_{cg}.$$

Constantes de tempo em $C=[3, 4]$ definem o erro do sistema (em regime permanente) nos extremos: $e=\pm[2, 5]\%$ (após o tempo T_a).

Com estas informações é possível estabelecer os parâmetros de um compensador de forma que o sistema compensado alcance as características dinâmicas especificadas.