



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Supervisão de Controladores

Paulo Jorge Coelho Ramalho Oliveira

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Lisboa, Maio de 1991

Tese submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa
de mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Tese realizada sob a orientação de
João José dos Santos Sentieiro

Professor Associado do
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

A edição desta tese foi realizada recorrendo ao formatador de texto \LaTeX . Por ter sido desenvolvido para a língua inglesa, o \LaTeX dá origem a erros de hifenação quando é usado para editar textos escritos em português. Apesar do cuidado colocado na edição deste trabalho, é possível que persistam algumas incorrecções deste tipo.

À Margarida

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor João José dos Santos Sentieiro que me ajudou a dar os primeiros passos neste longo caminho que é a investigação científica. Só devido ao seu entusiasmo e à aposta nesta área foi possível efectuar este trabalho.

Ao Pedro Lima, com quem partilhei o gabinete e os problemas ao longo de toda a tese.

À Professora Maria Isabel Ribeiro, ao Professor António Pascoal, ao Professor João Lemos e ao Engenheiro Pinto Ferreira que me abriram novos horizontes e me ajudaram sempre que necessário. Agradeço ainda à Professora Maria Isabel Ribeiro ter lido e comentado esta tese.

A todos os colegas do CAPS, pelas discussões frutuosas e pelos momentos de lazer que juntos passámos. Um abraço muito especial ao Ruben Costa, ao José Alberto, ao Carlos Silvestre e ao Ricardo Sanz.

Aos meus pais e à Margarida, pela paciência que tiveram comigo e pelo apoio que sempre me dispensaram.

Agradeço também às instituições que me apoiaram durante a realização deste trabalho. À JNICT que me concedeu uma bolsa de estudo para investigação. Ao programa COMETT que me proporcionou um estágio em Madrid. À DISAM que me facilitou a utilização das suas instalações durante o estágio em Madrid. Finalmente quero agradecer ao Centro de Análise e Processamento de Sinais, que me proporcionou o local de trabalho e todos os meios que utilizei para efectuar esta tese.

Resumo

A substituição dos operadores humanos nas tarefas de operação e supervisão de sistemas de controlo tem constituído, nos últimos anos, um objectivo perseguido por grupos que desenvolvem actividade de investigação na área de Controlo Inteligente.

A maior autonomia dos sistemas de controlo pressupõe a capacidade de neles incorporar artificialmente, sob a forma de uma cadeia de supervisão, o conhecimento que vulgarmente os operadores humanos têm sobre os processos.

A cadeia de supervisão desempenha as acções de planeamento, análise de situação e prescrição das decisões tomadas (**Operação**) e efectua ainda ajustes nas referências e a afinação dos parâmetros dos controladores (**Supervisão**). Para realizar a inclusão de conhecimento em controladores e em sistemas de controlo privilegiam-se como ferramentas, neste trabalho, os Sistemas Periciais e a Lógica Difusa.

Nesta tese introduz-se e discute-se uma arquitectura geral, baseada em Sistemas Periciais, para o desempenho da tarefa de Operação (Capítulo 2) e apresentam-se três arquitecturas para a supervisão de controladores PI e Difusos (Capítulo 4). Estas arquitecturas estão baseados na extracção de características (*features*) da resposta temporal dos sistemas, de entrada única/saída única, a controlar e na utilização da lógica difusa para captar o conhecimento humano acerca da afinação de tais controladores.

Os processos de captação de conhecimento são apresentados como exercício na supervisão de controladores PI e na implementação de um supervisor baseado na lógica difusa a partir de um algoritmo de supervisão.

A avaliação do desempenho destas estratégias de supervisão, foi feita utilizando dois sistemas simulados e um processo piloto à escala.

Palavras Chave- Controlo Inteligente, Supervisão, Sistemas Periciais, Lógica Difusa e Controlo Difuso.

Abstract

The replacement of human operators by artificial mechanisms in the operation and supervision of control systems has been, in recent years, a target pursued by the Intelligent Control research community.

Increases in autonomy depend largely in the hability to incorporate in the Control System (in the form of a supervision loop) the knowledge that operators have about the processes involved.

The supervision loop deals with planning, situation analysis and prescription of the decisions affecting the control system (**Operation**) and also with set-point adjustments and controller parameters tuning (**Supervision**). To implement the inclusion of knowledge in controllers and in control systems, Expert Systems and Fuzzy Logic are privileged as tools, as far as this work is concerned.

In this thesis a general architecture based on expert systems and dedicated to the performance of Operation tasks is introduced and discussed (Chapter 2) and three architectures for the supervision of PI and fuzzy controllers are also presented (Chapter 4). These latter architectures are based on time features of single input/single output (SISO) systems and in the use of fuzzy logic as a methodology to catch the human knowledge about the tuning of those controllers.

The knowledge acquisition processes are presented as exercises, in the PI controllers supervision and in the implementation of a fuzzy based supervisor derived from an algorithmic supervisor.

The performance of the supervision strategies was evaluated using two different simulated systems and one scaled pilot plant.

Key Words- Intelligent Control, Supervision, Expert Systems, Fuzzy Logic and Fuzzy Control.

Contents

1	Introdução	4
1.1	Motivação Histórica	4
1.2	Controlo Inteligente	7
1.3	Sistemas Supervisionados	9
1.4	Ferramentas de Construção de Supervisores	12
1.5	Contribuições	13
1.6	Organização	14
2	Sistemas Periciais Aplicados à Supervisão de Processos	16
2.1	Sistemas Periciais	16
2.2	Base de Dados	16
2.3	Base de Regras	18
2.4	Motor de Inferência	18
2.5	<i>Interface</i> com o Utilizador	19
2.6	Sistemas Periciais Aplicados a Controlo	20
2.7	Exemplo	23
3	Controlo Difuso	25
3.1	Evolução histórica do Controlo Difuso	25
3.2	Conceitos de Controlo Difuso	26
3.3	Motivação	26
3.4	Controlo Difuso Directo	28

3.4.1	Estrutura do Controlador Difuso	28
3.4.2	Exemplo de aplicação do Controlo Difuso	33
3.5	Equivalência entre os Controladores Difusos e os Controladores Lineares Clássicos	39
4	Supervisão de Controladores	43
4.1	Introdução	43
4.2	Supervisão Difusa de um PI – SPI	49
4.2.1	Estrutura do SPI	49
4.2.2	Resultados com o SPI	54
4.2.3	Comentários	60
4.3	Supervisão Algorítmica de um Controlador Difuso – SAD	62
4.3.1	Estrutura do SAD	62
4.3.2	Resultados com o SAD	66
4.3.3	Comentários	73
4.4	Supervisão Difusa de um Controlador Difuso – SDD	74
4.4.1	Estrutura do SDD	74
4.4.2	Resultados com o SDD	77
4.4.3	Comentários	79
5	Conclusões	83
5.1	Comentários aos Resultados Obtidos	83
5.2	Desenvolvimentos Futuros	85
A	Fundamentos de Controlo Difuso	86
A.1	Fundamentos de Lógica Difusa	86
A.2	Aplicação da Lógica Difusa ao Controlo	91
B	Sistemas Utilizados	97
B.1	Sistema 1	97
B.2	Sistema 2	98

B.3 Sistema 3	98
-------------------------	----

Chapter 1

Introdução

1.1 Motivação Histórica

O conceito de sinal aparece, numa grande variedade de áreas, associado a grandezas físicas mensuráveis representáveis de forma abstracta por funções matemáticas de uma ou mais variáveis independentes. Os sistemas físicos recebem estímulos do exterior (representáveis na forma de sinais) interagem com o ambiente que os envolve sofrendo modificações no seu estado (representáveis também na forma de sinais). A acústica, as telecomunicações, a engenharia electrotécnica, a engenharia mecânica, a engenharia química, são áreas em que os conceitos de sinal e de sistema estão vulgarizados.

A Engenharia é a ciência que caracteriza o comportamento dos sistemas físicos e implementando estratégias de controlo modifica o seu funcionamento de acordo com os objectivos a atingir.

Na estratégia mais simples um operador humano supervisiona as variáveis relevantes do sistema físico e actua nele sempre que for necessário corrigir o seu comportamento.

Numa abordagem de controlo automático as variáveis relevantes são comparadas com os valores pretendidos para as mesmas (ditos de referência), gerando sinais de erro utilizados para actuar o sistema (Figura 1.1). O dispositivo que implementa esta operação é usualmente denominado por controlador.

A estrutura do controlador, que operando sobre o sinal de erro gera o sinal de con-

trola, era no início deste século, muito simples. Os controladores limitavam-se a realizar um ganho constante, pelo que o sistema era actuado por um sinal proporcional ao erro instantâneo. Nos anos 30 vulgarizou-se a utilização de controladores incorporando termos

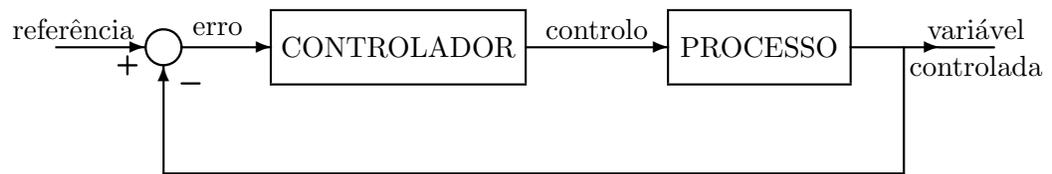


Figure 1.1: Estrutura de um controlador clássico

proporcional, integral e derivativo do erro (denominados controladores PID). Este controlador tem memória do passado (efeito integral) e é capaz de actuar com antecipação (efeito derivativo). Processos sistemáticos de afinação dos parâmetros que ponderam os três termos foram estabelecidos nos anos 50 [38].

Com o aparecimento dos computadores, os controladores analógicos foram sendo substituídos por controladores digitais. Surge assim a área do Controlo Digital Directo [5] – CDD (Figura 1.2). Estes controladores permitem emular um controlador analógico através da sua discretização ou implementar estratégias de controlo mais complexas.

Quando os sistemas a controlar são modelizados como lineares e invariantes no tempo, os controladores sintetizados têm parâmetros fixos [36]. Porém, estes modelos são descrições simplificadas dos sistemas reais, cuja dinâmica é normalmente não linear e/ou variante no tempo. Como consequência desenvolvem-se estudos na área do Controlo Adaptativo, que introduz controladores que se adaptam continuamente ao modelo estimado do sistema. Nesta perspectiva a estrutura do controlador pode entender-se como tendo uma segunda cadeia de realimentação (Figura 1.3) em que são feitas a identificação do sistema controlado e a estimação dos parâmetros do controlador. A estimação, utilizando o modelo identificado do sistema a controlar, é implementada por via algorítmica por forma a minimizar um funcional de custo.

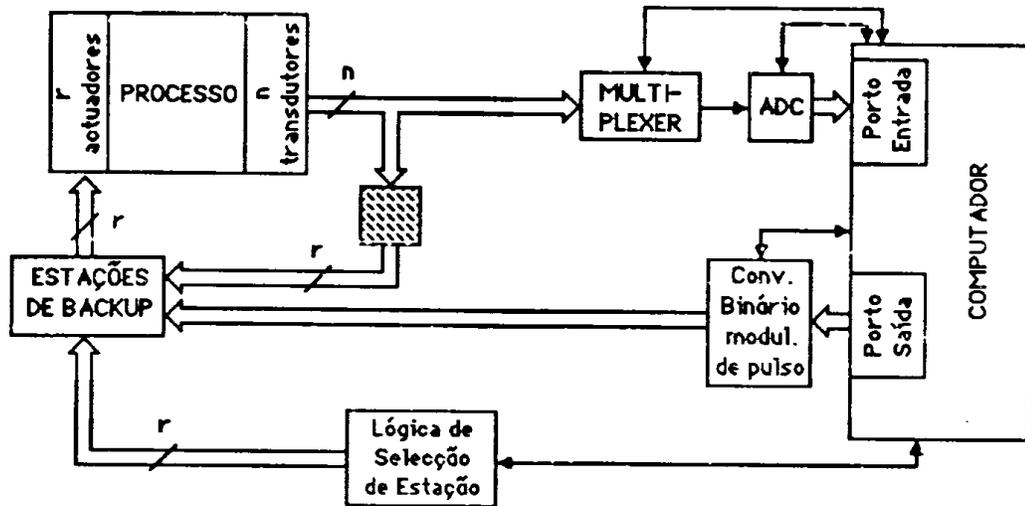


Figure 1.2: Controlo Digital Directo

Com o aumento de complexidade da estrutura do controlador surgem problemas novos, relacionados com a estabilidade do sistema controlado e com a convergência dos parâmetros do controlador. São exemplo a escolha de outros parâmetros auxiliares (intervalo de amostragem, valores iniciais de variáveis internas, etc.) ou a decisão sobre o uso de mecanismos complementares, como a filtragem dos sinais de entrada ou a adição de ruído de excitação.

A evolução da Teoria de Controlo, deixa no entanto em aberto alguns problemas cuja

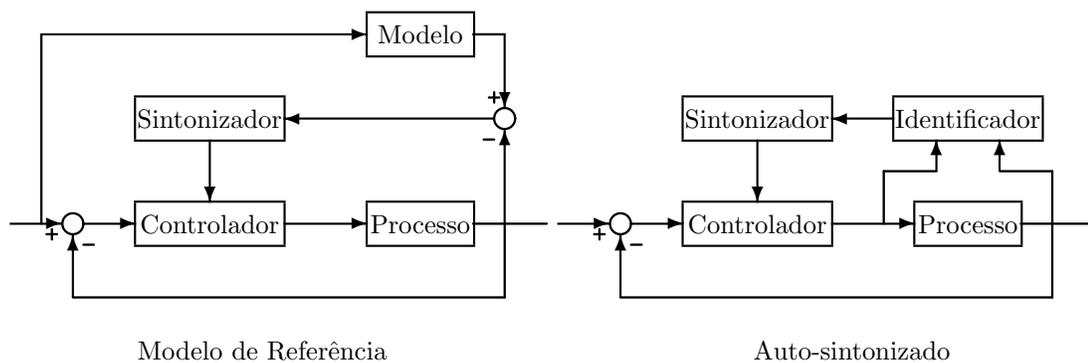


Figure 1.3: Estruturas usuais dos controladores adaptativos

resolução aponta para a inclusão de heurísticas.

Por exemplo, em 1868 o físico J. C. Maxwell estudou vários tipos de comportamento de um sistema realimentado [18], mas não encontrou uma forma sistemática de modificar o *governor* (controlador), para que o sistema global fosse estável.

Já neste século, nos anos 40-50, foram determinadas estratégias de afinação dos parâmetros de um PID. Ziegler e Nichols avançaram propostas nesse sentido [38]. No entanto, um controlador PID afinado para funcionar com bom desempenho para uma dada dinâmica, sofre degradação quando esta se altera, por exemplo, por variação da carga do sistema. Além disso, não é possível efectuar simultaneamente a afinação para cargas diferentes.

Na realidade a maioria dos sistemas variam ao longo do tempo e são intrinsecamente não lineares. O controlo adaptativo também não resolve todos os problemas associados a dinâmicas não lineares e variantes no tempo [36]. O seu uso em casos onde o processo a controlar não é bem conhecido determina a inclusão de heurísticas, sendo o problema resolvido com base em soluções *ad hoc* [36].

À medida que a complexidade dos controladores aumenta, o conhecimento *a priori* incorporado no seu projecto é maior, conduzindo ao aumento da sua componente heurística.

A tentativa de sistematizar a utilização do conhecimento humano na construção de sistemas que funcionem autonomamente, i. e., sem supervisão humana, deu origem a uma nova área da Teoria do Controlo, conhecida como Controlo Inteligente [9].

É nesta área que se desenvolve esta tese. Ela tem como objectivo a supervisão de controladores através da incorporação de conhecimento *a priori* sobre os sistemas a controlar. A implementação recorre a técnicas de Sistemas Periciais e de Controlo Difuso.

1.2 Controlo Inteligente

Durante as duas últimas décadas ganhou grande relevância a investigação na área dos Sistemas Autónomos. Face aos novos problemas decorrentes desta área, a comunidade científica interessada no controlo de sistemas, tem procurado e discutido novas abordagens para a sua resolução.

O Controlo Adaptativo correspondeu a uma tentativa inicial de aumento de autonomia,

em relação aos controladores clássicos. No entanto, a estrutura do controlador e o valor de uma série de parâmetros auxiliares têm de ser escolhidos **à priori**. Métodos especiais de projecto de controladores têm pois de ser usados, com o objectivo de implementar controladores adaptativos. Persiste o problema da incorporação, do conhecimento humano e das heurísticas usadas para a afinação deste tipo de controladores, face a alterações no ambiente circundante.

Além disso, problemas fundamentais para o Controlo Inteligente, como sejam a percepção do “mundo” que rodeia o sistema autónomo e a incorporação de estratégias de decisão e planeamento não são cobertas pelo controlo adaptativo nem por outras metodologias de projecto de sistemas de controlo.

Uma importante conclusão é o facto geralmente aceite de que tem de ser incorporada alguma inteligência no sistema global de controlo, para que os sistemas autónomos possam “sobreviver” em ambientes desconhecidos e/ou hostis.

O estabelecimento de um corpo teórico unificado, onde esses problemas possam ser formalizados e resolvidos, tem sido o objectivo principal de uma nova área de investigação, denominada por **Controlo Inteligente**. Esta, tenta integrar conceitos e metodologias oriundos da Teoria de Controlo e da Inteligência Artificial.

A Inteligência Artificial tem desenvolvido metodologias que podem ser usadas na síntese de “inteligência” básica, proporcionando formas de representar o “mundo”, nomeadamente através de Sistemas Periciais, Lógica de Predicados, Redes Semânticas, Enquadramentos (*frames*), Regras de Produção, etc. Outras metodologias, também desenvolvidas pela Inteligência Artificial, permitem o planeamento de tarefas/trajectórias (baseados em procuras heurísticas como sejam a procura em profundidade, A*, ...), a inferência de novo conhecimento acerca da missão a ser desempenhada e/ou a modificação dos planos gerados.

Uma arquitectura para **Sistemas Inteligentes** foi apresentada por Meystel [19], sendo definida uma **Estrutura de Informação Hierárquica Aninhada** (*Nested Hierarchical Information Structure*) (Figura 1.4). Nesta arquitectura o reconhecimento, em cada nível, é feito *via* **PERCEPÇÃO**, a actuação *via* **PLANEAMENTO/CONTROLO** e a aprendizagem e a auto-organização *via* **COGNIÇÃO**. Esta arquitectura pretende

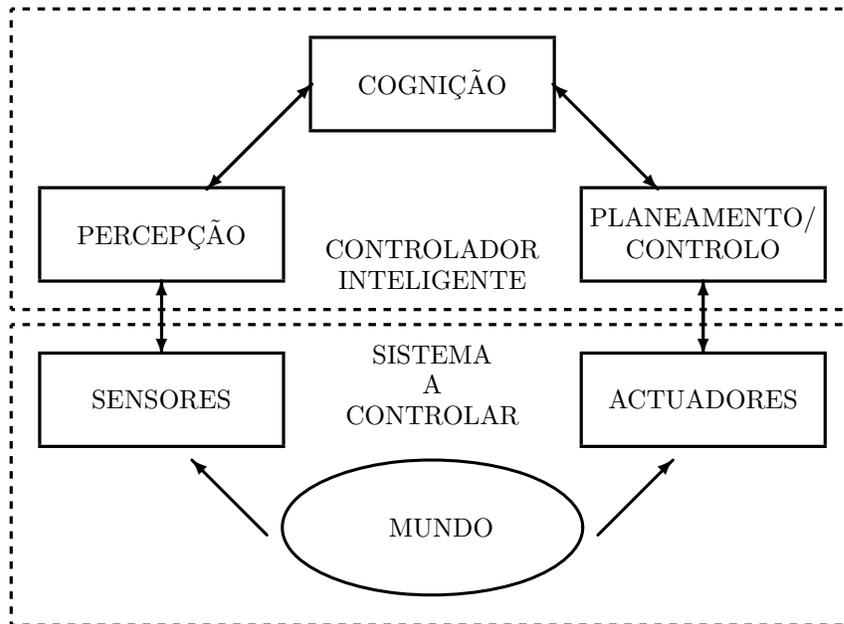


Figure 1.4: Arquitectura para Sistemas Inteligentes, proposta por Meystel

sistematizar uma aproximação hierárquica, sendo constituída por vários níveis associados a representações do mundo com diferentes “granularidades”.

Saridis sugeriu uma outra arquitectura associada ao Controlo Inteligente, com carácter mais conceptual [30]. A estrutura do Controlador Inteligente está hierarquicamente dividida nos níveis de **Organização**, **Coordenação** e **Execução**, como representado na Figura 1.5.

Nesta arquitectura o sistema de controlo, incluído no nível de **Execução**, é supervisionado minimizando a interacção e a supervisão do operador humano. Nos níveis de **Organização** e de **Coordenação**, deve ser usada inferência possibilística e informação qualitativa [35] (abordagem utilizada no Capítulo 4), para que seja simplificada a interacção com o **MUNDO**.

1.3 Sistemas Supervisionados

A concepção e realização de um sistema de controlo desenvolve-se essencialmente nas seguintes quatro vertentes:

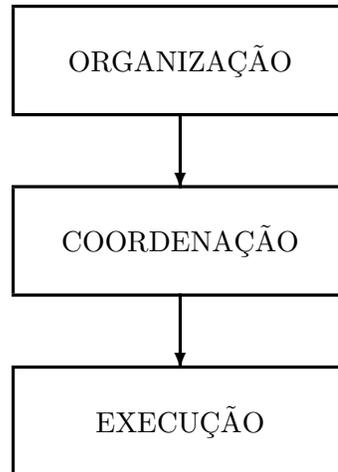


Figure 1.5: Arquitectura para Sistemas Inteligentes, proposta por Saridis

- Modelação do sistema a controlar
- Identificação dos parâmetros do modelo
- Projecto do controlador
- Implementação

A exploração das primeiras duas tem por objectivo a obtenção de um modelo matemático que descreva o sistema a controlar, baseado ou não em pressupostos físicos.

Estabelecido o modelo do sistema a controlar, o projectista escolhe a classe de controladores a utilizar, especificando depois o controlador com base em resultados teóricos e de simulação. Se por um lado a intervenção do computador permitiu desenvolver novos tipos de controladores, não é incorrecto afirmar que, devido à sua simplicidade, na maioria dos casos a solução utilizada, devido à sua simplicidade, é ainda a clássica (PID) [8].

Para que os controladores de uma instalação coloquem o sistema global num ponto de funcionamento estável é exigida a integração de várias acções. Estas incluem a modificação de referências e de valores de parâmetros, a filtragem de sinais, a detecção de alarmes, a escolha ou comutação entre controladores, etc.

A necessidade de decidir acerca de uma série de acções, tarefa fácil para os operadores humanos, só vai ser possível devido à introdução da supervisão. Além disso, a supervisão permite também quer a detecção de condições anómalas, por monitorização dos dados dos sensores e dos efectores, quer a actuação em situações de emergência.

Em [3], tomando como exemplo um controlador muito simples (PID), são enunciados os problemas a resolver aquando da sua implementação:

- Filtragem dos sinais de entrada para aumentar a relação sinal/ruído nos sinais dos sensores;
- Condicionamento dos sinais por forma a permitir a sua leitura pelo computador ou para que não se verifiquem saturações nos transdutores;
- Limitação da saída e da sua variação para evitar danificar o sistema controlado e para permitir a actuação dos efectores;
- Seleção dos modos de operação, nomeadamente para que a transição de manual para automático seja suave;
- Lógica anti-colagem do termo integral do PID;
- Verificação de limiares de alarme;
- Lógica para condições anormais.

Quando o sistema a controlar se torna mais complexo (por exemplo por haver mais do que uma cadeia de regulação) também a complexidade dos problemas associados aumenta. Para os resolver é necessário incorporar, sob a forma de heurísticas, o conhecimento que o operador tem do processo (conhecimento *a priori*). Estas costumam ser introduzidas na forma de estruturas lógicas de selecção:

- *if...then...else...*
- *case...do...*
- *lookup-tables*

A incorporação de heurísticas no controlador é normalmente complicada e morosa. Isto deve-se à inexistência de uma separação clara entre o algoritmo de controlo e os ajustes heurísticos feitos pelo projectista ou pelo operador. Também a detecção de erros nas heurísticas se torna mais difícil quando a complexidade e a quantidade dos casos de excepção crescem.

A supervisão deve ser responsável pelas seguintes tarefas:

- verificação do funcionamento da cadeia de controlo, gerando sinais de alarme sempre que as variáveis relevantes ultrapassem gamas aceitáveis.
- modificação de parâmetros dos controladores, para melhorar o desempenho do sistema que incorpora o controlador e o sistema a controlar.
- modificação de valores de referência, sempre que mudanças no ambiente que envolve o sistema a controlar o torne necessário.
- comutação entre controladores alternativos ou passagem a manual, sempre que o desempenho do controlador se degrade e não seja possível a recuperação do mesmo.

As vantagens da utilização dos Sistemas Periciais na supervisão de processos, residem na facilidade de inclusão das heurísticas bem como na sua compreensão através da análise do programa, na fácil detecção de erros lógicos e na possibilidade de explicação das conclusões obtidas. Além disso o processamento simbólico, característico dos Sistemas Periciais, leva a que dados qualitativos de sensores possam ser incluídos no apoio à decisão (p. e. aspecto da chama em fornos e caldeiras, qualidade do produto fabricado, etc).

O supervisor além de incluir os procedimentos algorítmicos usuais, pode também decidir baseado em informação qualitativa, automatizando o papel do operador humano, ou simplesmente auxiliando este através da integração de mais informação.

1.4 Ferramentas de Construção de Supervisores

As ferramentas, para construção de supervisores, descritas nesta tese são os Sistemas Periciais (Capítulo 2) e a Lógica Difusa (Capítulo 3 e Apêndice A).

Os Sistemas Periciais, umas das áreas de estudo da Inteligência Artificial, são constituídos por uma Base de Dados, uma Base de Regras, um Motor de Inferência e pelo *Interface* com o Utilizador. Na Base de Dados está armazenada informação acerca do domínio e na Base de Regras está armazenado o conhecimento acerca de como o perito resolve problemas nesse domínio. É o Motor de Inferência que, usando a informação da Base de Dados e o conhecimento expresso na Base de Regras, deduz nova informação que permite resolver os problemas surgidos aquando do funcionamento do sistema supervisionado. O *Interface* com o Utilizador serve essencialmente para facilitar a troca de informação entre o engenheiro de processos e o sistema a supervisionar.

O Controlo Difuso, baseado na Lógica Difusa e recebendo também contributos da Inteligência Artificial [37], nomeadamente a representação e a inferência qualitativas, pode ser encarado como um caso particular dos Sistemas Periciais, possuindo de uma forma semelhante a um Sistema Pericial, uma Base de Dados, uma Base de Regras e um Motor de Inferência próprios.

A supervisão pode ser abordada com duas perspectivas distintas [4]: a **estrita** relacionada com o Controlo e a **lata** relacionada com a Operação, o que as permite associar com o Controlo Difuso e com os Sistemas Periciais, respectivamente. Tais associações resultam da facilidade que os Sistemas Periciais têm de representar, na forma de regras, blocos básicos de conhecimento dos operadores humanos e da facilidade que o Controlo Difuso tem de captar o conhecimento respeitante às acções de afinação dos controladores. Na abordagem lata pretende-se conseguir a substituição da supervisão humana, aumentando o grau de autonomia dos Sistemas.

1.5 Contribuições

Nesta tese resolve-se o problema associado à supervisão estrita de controladores e mais especificamente à modificação de parâmetros de controladores. A mesma metodologia poderia ser utilizada na modificação de referências ou na resolução de outros problemas onde fosse necessário incorporar conhecimento humano para melhorar o desempenho do sistema global.

Os contributos originais desta tese surgem

- na proposta de uma arquitectura genérica para a supervisão de controladores;
- na utilização de características da resposta temporal dos sistemas para selecção das regras que estão incorporadas no supervisor dos controladores de baixo nível.

A arquitectura genérica proposta é concretizada em três arquitecturas:

- **SAD**, para supervisão de controladores difusos, implementada utilizando um algoritmo de supervisão.
- **SPI**, para supervisão de controladores PI, baseada em lógica difusa, permitindo captar conhecimento obtido por simulação de sistemas tipo.
- **SDD**, para supervisão de controladores difusos, implementada com um controlador difuso que incorpora o algoritmo utilizado na arquitectura SAD.

1.6 Organização

No Capítulo 2 enquadra-se a aplicação dos Sistemas Periciais na Supervisão de Processos, com ênfase no facto de esta ser feita em tempo real.

No Capítulo 3 e no Apêndice A descrevem-se os fundamentos do Controlo Difuso baseado na Lógica Difusa. Configura-se ainda um controlador difuso, a incorporar numa cadeia de controlo da mesma forma que os controladores clássicos, e faz-se uma análise comparativa entre as abordagens clássica e Difusa.

No Capítulo 4 discutem-se três arquitecturas de supervisão para controladores PI e para controladores difusos, baseadas na Lógica Difusa.

No Capítulo 5 apresentam-se algumas conclusões emergentes da utilização das arquitecturas antes referidas.

No Apêndice B descrevem-se em detalhe os sistemas que serão utilizados para discutir e avaliar o desempenho de cada uma das arquitecturas propostas. Estes sistemas, em número de três, são genericamente caracterizados do seguinte modo:

- Sistema 1 – sistema estável, de fase mínima, exibindo num determinado instante uma mudança brusca na sua dinâmica.
- Sistema 2 – sistema estável de fase não mínima.
- Sistema 3 – sistema piloto (à escala reduzida), para controlo do nível de água num reservatório.

Os sistemas utilizados, embora simples, permitem o estudo das arquitecturas de supervisão e indiciam melhorias no desempenho do controlo de processos, quando aplicadas a sistemas mais complexos.

Chapter 2

Sistemas Periciais Aplicados à Supervisão de Processos

2.1 Sistemas Periciais

Os Sistemas Periciais tentam captar o conhecimento de um ser humano, especialista num domínio específico, bem como a forma como este resolve problemas. Quando utilizados na resolução de problemas reais, a partir do conhecimento da situação, inferem as mesmas conclusões que um perito no domínio e aconselham ou efectuam a correção do problema em causa.

A sua constituição geral foi já definida no capítulo anterior. A descrição mais detalhada de cada um dos seus componentes apresenta-se nas secções seguintes e encontra-se esquematizada na Figura 2.1.

2.2 Base de Dados

Na Base de Dados está armazenada informação acerca do domínio em que se pretende a sua utilização. Esta pode ser estática, sendo imutável durante o período de funcionamento do Sistema Pericial, ou dinâmica, tendo neste caso origem no exterior ao computador onde o Sistema Pericial está implementado ou deduzida ao longo do funcionamento do Sistema

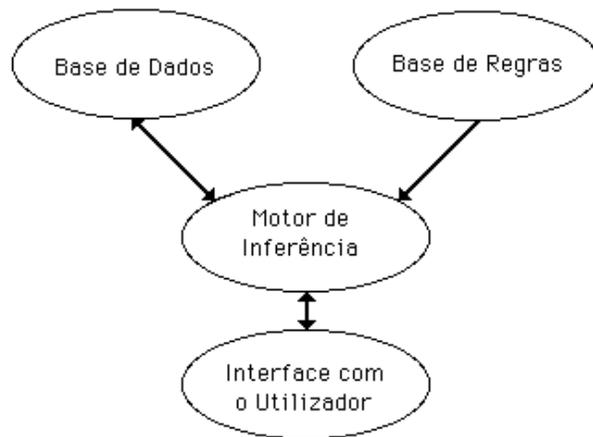


Figure 2.1: Componentes de um Sistema Pericial

Pericial. A informação proveniente do exterior capta conhecimento do utilizador acerca de pormenores do problema que está a ser resolvido, ou conhecimento acerca do ambiente (dados de sensores).

O conhecimento é representado com base em **factos**, **evidências**, **hipóteses** e **objectivos** [3]. Os factos representam a parte do conhecimento que não se altera e são incluídos no início da construção da Base de Dados. As evidências representam alterações que se verificaram no domínio (ex., leituras de sensores). As hipóteses são acrescentadas à Base de Dados como deduções intermédias que permitirão demonstrar os objectivos. Estes representam as conclusões que se pretende que o Sistema Pericial demonstre. A estrutura de representação na Base de Dados, não sendo rígida, pode ser pensada como a de uma frase (*cláusula*) com

sujeito verbo objecto.

2.3 Base de Regras

De uma forma genérica uma regra pode ser escrita como

Se
<premissa>
então
<conclusão>.

A <premissa> é uma função lógica de cláusulas, que se costuma designar por *lado esquerdo* da regra. A <conclusão> é uma cláusula lógica também denominada por *lado direito* da regra.

Na Base de Regras são descritas de uma forma estruturada as heurísticas e os procedimentos que um especialista utiliza para achar a solução dos problemas em causa.

Ao conjunto da Base de Dados e da Base de Regras é usual chamar-se Base de Conhecimento.

2.4 Motor de Inferência

O Motor de Inferência é o componente que conjuga a informação da Base de Dados e da Base de Regras, para deduzir (inferir) novo conhecimento (na forma de dados ou de regras).

Nos Sistemas Periciais clássicos existem dois tipos de inferência – para a frente (*forward inference*) e para trás (*backward inference*).

Na inferência para a frente, ou guiada pelos dados (*data driven*), aplicam-se as regras cujo lado esquerdo é verdadeiro (com base no emparelhamento com o conteúdo da base de dados), para deduzir conhecimento novo (dado pelo lado direito das regras). Este processo é conhecido por *disparo* das regras. Todo o conhecimento assim inferido é pois verdadeiro.

No caso da inferência para trás, ou guiada pelo objectivo (*goal driven*), o lado direito da regra é demonstrado se, recorrendo ao conhecimento armazenado na base de dados fôr verdadeiro o lado esquerdo da regra (se fôr possível o emparelhamento). Se se conseguir

demonstrar o objectivo, então ele é verdadeiro.

Um problema importante é o do critério de paragem na procura da demonstração dos objectivos pretendidos. Na inferência para a frente, quando mais nenhuma das regras pode *disparar* com o conhecimento que está na Base de Dados, pode concluir-se que já se deduziu tudo o que era possível e que se pode parar. Quando não se conseguir provar a existência de alguma das premissas, na inferência para trás, pode concluir-se que o objectivo a provar é falso e parar o processo de inferência.

O motor de inferência pode também ser implementado recorrendo à lógica difusa. Esta metodologia será abordada no capítulo seguinte.

2.5 *Interface* com o Utilizador

Uma componente essencial de um Sistema Pericial é a *interface* com o utilizador. Se um sistema armazena informação sobre um domínio e pode até deduzir nova informação, ele deve ser capaz de a transmitir ao utilizador, de uma forma eficaz.

Exige-se assim que um Sistema Pericial possa explicar *porque* necessita de um dado do problema ou *como* deduziu um novo facto a partir da base de conhecimentos. As vantagens para o utilizador da existência de uma boa *interface* com o utilizador, estão na explicação dos processos de resolução que um especialista utilizaria, bem como na possibilidade de geração automática de relatórios, a vários níveis.

Outra característica, vulgar em sistemas periciais, e importante na manipulação de conhecimento diz respeito à possibilidade de utilização conjunta de informação quantitativa (numérica) e de informação qualitativa (simbólica).

2.6 Sistemas Periciais Aplicados a Controlo

A exploração exaustiva das potencialidades da Teoria do Controlo, obriga à interligação entre a informação expressa na forma de algoritmos de controlo e o conhecimento específico do perito (em controlo). Para que a separação destas duas formas de conhecimento seja possível é necessário recorrer aos Sistemas Periciais, que incorporam o conhecimento do perito.

A utilização de Sistemas Periciais em Controlo é recente. Não sendo uma metodologia a aplicar na generalidade, pode no entanto identificar-se um conjunto de razões que aconselham a sua utilização [31]:

- Um sistema pericial está livre de fadiga, excesso de confiança e impaciência, características inerentes aos operadores humanos.
- Em processos contínuos em que um operador está presente por turnos, a estratégia de controlo varia em função do operador. Independentemente da qualidade dos operadores, resultam daí variações indesejáveis no desempenho do processo.
- Existe conhecimento dos operadores que não pode ser posto na forma algorítmica, necessitando antes de uma representação qualitativa ou simbólica, facilmente proporcionada pelo sistema pericial.
- Difícil ou incompleta modelização do processo.
- Fácil acesso e modificação, pelos engenheiros de controlo de processos, das estratégias implementadas.

Quanto às aplicações mais comuns de Sistemas Periciais na Indústria citam-se [29]:

- Diagnóstico – inferindo a causa de avarias ou do mau funcionamento de um equipamento.
- Prescrição – recomendando reparações para o sistema avariado, ou a actuação conveniente em cada momento.

- Análise da Situação – observação dos dados e da informação disponível, inferindo por análise, o estado do sistema.
- Predição - inferindo as consequências possíveis de uma acção ou de um conjunto de acções.
- Selecção - escolhendo a melhor hipótese entre um número fixo de possibilidades.
- Projecto - configurando as diversas peças de um sistema sujeito a restrições, de modo a cumprir as especificações do sistema.
- Planeamento e Sequenciamento - desenvolvendo uma sequência de acções temporizadas para obter o resultado desejado, num determinado instante.
- Controlo - combinando as tarefas de Análise de Situação, Diagnóstico e Prescrição, resolver problemas existentes no funcionamento das cadeias de controlo.

O tipo de inferência a utilizar depende do problema a resolver. Por exemplo, no caso de diagnóstico de falhas, deve ser usada inferência para trás, uma vez que o objectivo consiste na determinação da falha verificada e das suas causas possíveis. Já no caso de se pretender fazer prescrição, a inferência para a frente é a mais útil.

No caso geral de aplicação de Sistemas Periciais e na sua aplicação a problemas da área de Controlo em particular, que incorporam várias tarefas das citadas anteriormente, a melhor solução é utilizar inferência para a frente e para trás conjuntamente.

Em [16] é proposta uma arquitectura para um supervisor de processos, baseado num sistema pericial, a aplicar a um forno de vidro (ver Figura 2.2).

O Supervisor além de incorporar um sistema pericial, em tudo semelhante aos de uso geral, é composto ainda por dois blocos auxiliares de grande importância para a interacção com o sistema físico – o Conversor Numérico / Simbólico (CNS) e o Executor de Tarefas (ET).

O conversor numérico para simbólico é constituído por um conjunto de algoritmos de processamento de baixo nível [24], que detectam situações anómalas em variáveis do processo (alarmes) e um conjunto de algoritmos especializados, que evocados pelos primeiros,

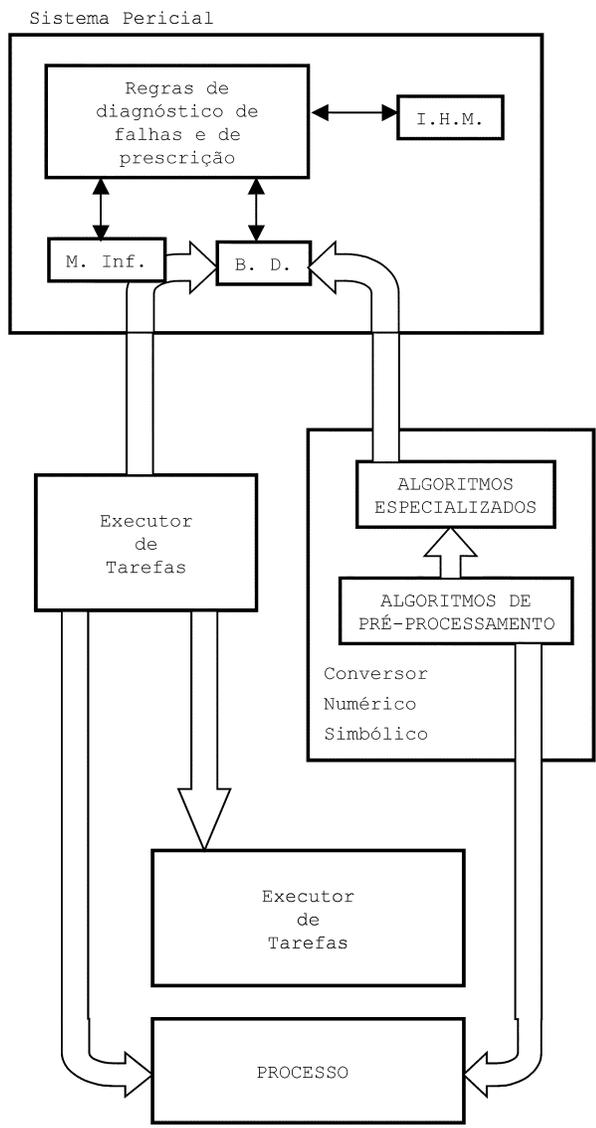


Figure 2.2: Arquitectura de um Supervisor de Processos

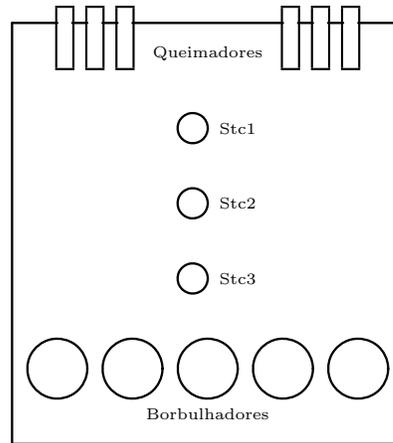


Figure 2.3: Planta do Forno, com indicação da posição dos sensores de temperatura

determinam o contexto em que se deu o alarme e acrescentam à base de dados informação sobre o mesmo.

No sistema pericial existem dois conjuntos distintos de regras, o primeiro dos quais para prescrição e o segundo para diagnóstico de falhas. O conjunto de regras de prescrição, usado por um processo de inferência para a frente, refere-se, nas suas premissas, ao conjunto de diagnóstico, a funcionar em inferência para trás. As premissas deste segundo conjunto serão emparelhadas (*match*) com os factos presentes na base de dados, (caso tenham sido introduzidas pelos algoritmos especializados) e se fôr provada alguma dessas regras (existência efectiva de um alarme) será necessário efectuar a prescrição correspondente. A prescrição diz respeito à execução de acções correctivas, da responsabilidade do executor de tarefas (ET).

2.7 Exemplo

Vejamos agora um exemplo concreto, respeitante à detecção no forno de vidro atrás citado, de um perfil de temperatura incorrecto.

Existem três sensores de temperatura na abóbada do forno, cujo posicionamento pode ser visto na Figura 2.7 e que medem as temperaturas T_{c1} , T_{c2} e T_{c3} respectivamente.

Associado a essas variáveis existe um algoritmo de baixo nível que verifica se os seus valores ultrapassam os limiares superior e inferior estabelecidos à *priori*.

No caso de tal acontecer, por exemplo para a variável T_{c1} , executa-se o algoritmo especializado, que verifica a consistência do valor lido, nomeadamente a consistência temporal (verificação se o valor lido não é espúrio) e a consistência espacial (por comparação com as outras medidas da temperatura da abóbada, T_{c2} e T_{c3}). Caso o valor lido seja consistente acrescenta-se um facto à base de dados, indicando a violação do limiar respectivo:

$$T_{c1} > \tau_{c1max}$$

A regra de diagnóstico, relacionada com tal alarme é:

Perfil.de.Temperatura.Incorrecto

Se

$$T_{c1} > \tau_{c1max}$$

Ou

$$T_{c1} < \tau_{c1min}$$

Ou

$$T_{c2} > \tau_{c2max}$$

Ou

...

E a regra de prescrição é:

Se

Perfil.de.Temperatura.Incorrecto

Então

Corrigir.Perfil.de.Temperatura.

A acção no lado direito da regra anterior será executada pelo Executor de Tarefas, por forma a tentar corrigir o perfil actual.

Chapter 3

Controlo Difuso

3.1 Evolução histórica do Controlo Difuso

A aplicação da Teoria clássica do Controlo pressupõe a existência de modelos matemáticos que capturem o essencial da fenomenologia presente. Em sistemas complexos como é frequente encontrar por exemplo na Indústria de Processos tais modelos são difíceis ou mesmo impossíveis de estabelecer. Mesmo quando é possível estabelecer um modelo formal, este revela-se muitas vezes altamente não linear, variante no tempo e com incertezas associadas. No entanto, constatou-se ser possível o controlo de alguns desses processos por operadores humanos. Para poder formalizar o conhecimento do perito, com o objectivo de melhorar o desempenho do sistema controlado, têm-se procurado estabelecer novos métodos para a síntese de controladores.

A lógica difusa, inicialmente proposta por Zadeh [37] em 1963, revelou ser uma ferramenta que permite por um lado captar o conhecimento humano (com as incertezas associadas) e por outro gerar decisões baseadas nesse conhecimento (devido ao mecanismo de inferência difusa). A aplicação da lógica difusa ao controlo de processos complexos tem tido nos últimos anos resultados promissores.

A investigação sobre a aplicação de lógica difusa a controlo de processos foi iniciada em 1974, por Mandani (referido em [32]). Ainda do mesmo autor, outros trabalhos descrevem a aplicação do controlo difuso a sistemas piloto [11]. Posteriormente muitas outras

aplicações foram concretizadas, entre as quais algumas das mais representativas são o controlo de temperatura num sistema de aquecimento de água [10], o controlo do processo de fabricação de cimento [12], o controlo de servo-sistemas [15], o controlo de um reactor [6] ou ainda o controlo de um comboio eléctrico [25].

3.2 Conceitos de Controlo Difuso

Um controlador difuso é composto por um conjunto de regras de actuação, baseadas no conhecimento do operador de processos. As *regras*, que se escrevem na forma,

Se

<premissas>

Então

<conclusão>.

são também entendidas como regras linguísticas.

Para que o conhecimento do operador possa ser utilizado no controlador, para além das regras também os valores conhecidos das variáveis de entrada têm de ser previamente codificados nos *termos linguísticos* usados pelo operador para descrever as premissas e as conclusões.

Por aplicação das regras de inferência difusas obtém-se um subconjunto difuso, que pretende expressar a acção a desencadear. Esta que tem de ser definida por um valor preciso, e não por um subconjunto difuso, obriga à existência de um processo de *descodificação* vulgarmente conhecido também por *passagem a um número* (*defuzzification*).

Estes conceitos são aprofundados no Apêndice A, onde se expõem algumas propriedades da lógica difusa, bem como a sua utilização em aplicações de controlo.

3.3 Motivação

Uma das vantagens do controlo difuso reside na possibilidade de se poder expressar e codificar, em regras, o conhecimento humano do operador do processo. Também o conhecimento do engenheiro de processos tem de ser incorporado, nomeadamente no que diz

respeito à forma de codificação das variáveis de entrada e aos valores possíveis de actuação.

Os resultados obtidos na prática, permitem atestar a capacidade da lógica difusa para descrever o conhecimento humano, no que diz respeito ao controlo de processos. Acresce que, não estando o controlador difuso sujeito a factores humanos tais como o cansaço, o esquecimento, a distração, a mudança de turno, etc, conduz a melhor desempenho que o controlo humano.

Outras vantagens [32], dizem respeito à facilidade de incorporar no controlador objectivos múltiplos (segurança, poupança de energia, estabilidade de operação, etc) e à possibilidade de utilizar variáveis que não podem ser medidas (estado de operação actual e anteriores, descrições qualitativas, etc), e que, por esse motivo não podem ser usadas no controlo clássico.

A robustez é também uma das vantagens do controlo difuso. Neste caso é necessária a introdução de uma estratégia de adaptação ao processo a controlar, que vai ser discutida em detalhe no próximo capítulo. As desvantagens do controlo difuso podem ser resumidas num único ponto – a existência de poucas ferramentas analíticas e teóricas para a sua utilização.

Já existem alguns estudos, com resultados interessantes. Em [7] estuda-se a consistência dos controladores e analisa-se a estabilidade em cadeia fechada, resultante da ligação de um controlador difuso (sistema não linear) a um sistema a controlar (linear). Em [1], a estabilidade é avaliada através de índices que indicam a estabilidade global de uma cadeia de controlo contínua resultante da ligação de um controlador difuso a um sistema linear ou não linear. Os controladores analisáveis resumem-se no entanto àqueles que têm como entradas as variáveis de estado ou de fase. Em [34], é feita a comparação entre controladores difusos e controladores lineares clássicos (P, PI ou PD).

Nesta tese discutem-se e aplicam-se técnicas de controlo difuso a sistemas simulados e a um sistema piloto à escala, e estuda-se o seu desempenho quando aplicado a sistemas não lineares, de fase não mínima ou com variações bruscas na dinâmica.

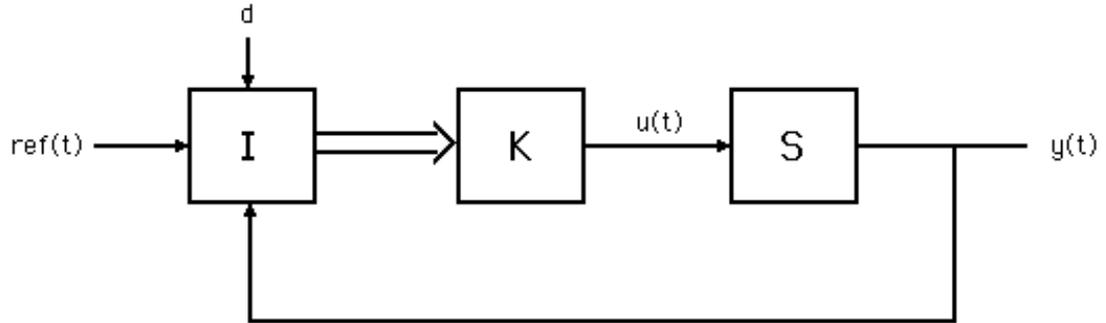


Figure 3.1: Estrutura da cadeia de controlo

3.4 Controlo Difuso Directo

3.4.1 Estrutura do Controlador Difuso

Na Figura 3.1 ilustra-se a estrutura de uma cadeia de controlo, incorporando o sistema a controlar (**S**), o controlador difuso (**K**) e o bloco de cálculo das variáveis de entrada do controlador (**I**). Nesta cadeia de controlo, de estrutura semelhante à clássica, $ref(t)$ representa a referência a seguir, d os sinais de perturbação conhecidos *a priori*, $u(t)$ o sinal de controlo a aplicar e $y(t)$ a saída do sistema a controlar.

As entradas no controlador difuso podem resultar da amostragem de sinais físicos, da incorporação de perturbações conhecidas ou ainda da incorporação de informação, numérica ou simbólica, relevante para o controlo.

Identificam-se em seguida algumas grandezas que resultam indirecta ou directamente da amostragem de sinais físicos:

- **erro**, dado pela diferença entre a referência e a saída do sistema a controlar.

$$e_t = ref(t) - y(t) \quad (3.1)$$

- **variação no erro**, dado pela diferença entre o erro actual e o erro anterior.

$$\Delta e_t = e_t - e_{t-1} \quad (3.2)$$

- **integral do erro**, aproximado no caso discreto pelo somatório dos erros desde $t = t_0$.

$$sum_e(t) = sum_e(t - 1) + e_t, \quad t \geq t_0 \quad (3.3)$$

- **variáveis de estado ou de fase**, no caso das mesmas estarem disponíveis.

As entradas dos controladores difusos, representando perturbações conhecidas ou informação sobre o processo, variam conforme o sistema a controlar e os sensores disponíveis em cada caso.

Utilizando as variáveis referidas, os controladores difusos podem implementar funções de controlo semelhantes às dos controladores clássicos ou dos controladores por *realimentação de variáveis de estado*. Representando por $\phi(\cdot)$ a função implementada pelo controlador, obtém-se, nas diversas situações controladores do tipo:

- **proporcional**, (P) usando o erro como variável de entrada

$$u(t) = \phi(e_t) \quad (3.4)$$

- **proporcional-derivativo**, (PD) usando o erro e a sua variação como variáveis de entrada

$$u(t) = \phi(e_t, \Delta e_t) \quad (3.5)$$

- **proporcional-integral**, (PI) usando o erro e o seu integral como variáveis de entrada

$$u(t) = \phi(e_t, sum_e(t)) \quad (3.6)$$

- **proporcional-integral-derivativo**, (PID) usando o erro, o seu integral e a sua variação como variáveis de entrada

$$u(t) = \phi(e_t, sum_e(t), \Delta e_t) \quad (3.7)$$

- **realimentação de variáveis de estado**

$$u(t) = \phi(x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt}) \quad (3.8)$$

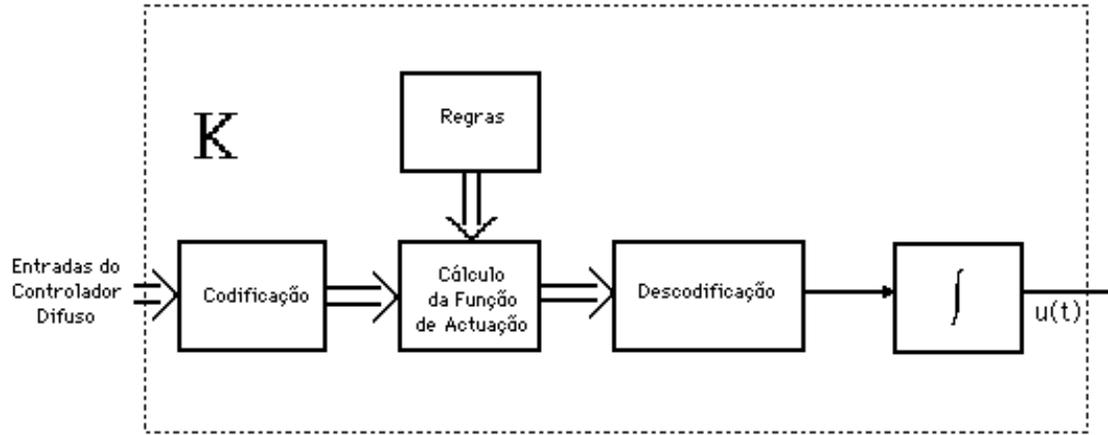


Figure 3.2: Componentes de um controlador difuso

O controlador difuso é basicamente composto por 5 blocos (Figura 3.2). O primeiro bloco codifica as n variáveis de entrada do controlador nos subconjuntos difusos, que vão servir como base ao processo de inferência difusa. A codificação é feita recorrendo às funções de pertença associadas a cada variável de entrada e que pretendem captar a possibilidade de a mesma pertencer a um determinado subconjunto difuso. Segundo diferentes autores, as funções de pertença podem apresentar características particulares, pelo que os mesmos escolhem funções lineares [33], triangulares monótonas [32], potências [10], exponenciais [14] e outras [37]. Estas funções, definidas normalmente pelo engenheiro de processos, tentam qualificar cada entrada. Para cada variável de entrada, devem existir tantas funções, quantos os termos linguísticos associados a essa mesma variável (por exemplo *positivo grande*, *positivo médio*, *positivo pequeno*, *zero*, etc.).

Nos controladores difusos, a forma das funções de pertença não é crítica, existindo um compromisso entre precisão e simplicidade [7]. Uma regra geral na construção das funções de pertença, sugere a utilização de funções que expressem maior precisão na proximidade dos pontos de equilíbrio e outras mais ambíguas, mas de aplicação mais geral, nas regiões mais afastadas desses pontos (Figura 3.3) [7]. As funções que denotam maior precisão são assim mais parecidas com as utilizadas com lógica binária, ou seja com um grau de

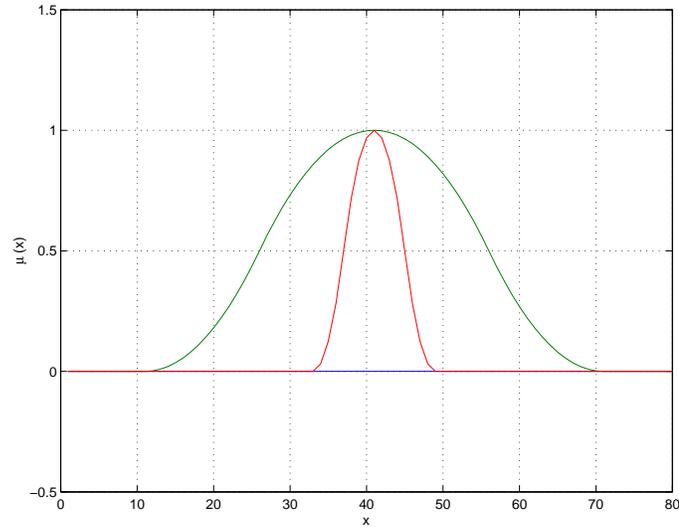


Figure 3.3: Precisão expressa na forma da função de pertença

pertença nulo nos pontos que não pertencem ao conjunto e com uma variação brusca no grau de pertença, para um, nos pontos que pertencem ao conjunto.

O conjunto de regras, na forma **Se condições Então ação**, deve ser construído por forma a:

- utilizar subconjuntos difusos mais precisos nos pontos de equilíbrio e noutros pontos importantes de funcionamento.
- cobrir toda a gama possível de cada variável de entrada, a qual pode ser entendida como um subconjunto de R^n .
- criar grupos de regras aplicáveis a pontos de equilíbrio sub-óptimos (por exemplo para obrigar a abandonar um mínimo local) e à existência de ciclos limite.
- prever situações anormais de funcionamento, como sejam evitar pontos de fraco desempenho ou que podem conduzir a situações de alarme.

Além disso o conjunto de regras deve ser consistente [7] ou seja não devem existir regras contraditórias no mesmo subconjunto R^n das variáveis de entrada.

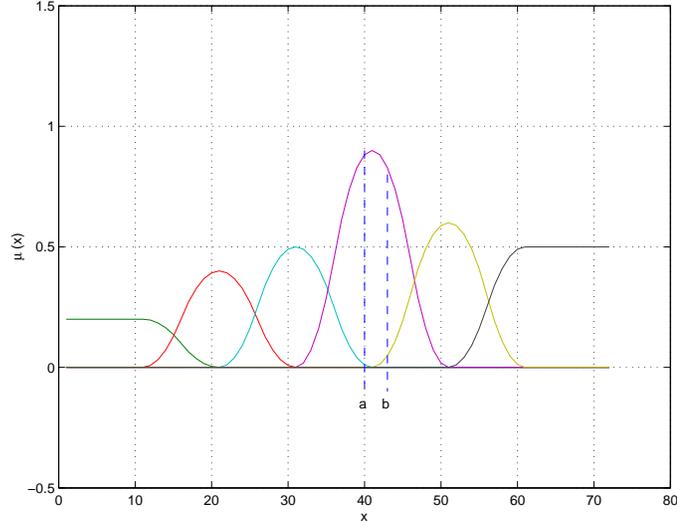


Figure 3.4: Exemplo de função de actuação inferida

Tendo disponíveis as entradas codificadas e o conjunto de regras, a função de actuação calcula-se através do mecanismo de inferência, baseado na regra de inferência composicional – **CRI**, [10] (ver Apêndice A).

Como resultado da aplicação da CRI, obtém-se uma função de actuação difusa (Figura 3.4), onde se observam a influência das diversas regras existentes. Esta função de actuação não pode ser aplicada directamente ao processo tendo de ser decodificada num valor numérico preciso. A decodificação é feita escolhendo simplesmente a abcissa correspondente ao valor máximo da função (ponto (a) da Figura 3.4) ou a abcissa correspondente ao centro de massa da função (ponto (b) da Figura 3.4). No caso destas funções de pertença serem simétricas em relação a um ponto (\bar{V}_{Or}), o cálculo do centro de massa

$$u = \frac{\int_r V_{Or}(y) \mu_{B'}(y) dy}{\int_r \mu_{B'}(y) dy}$$

(ver Apêndice A) pode ser aproximado por:

$$u = \frac{\sum_r \bar{V}_{Or} \mu_{B'}(y)}{\sum_r \mu_{B'}(y)} \quad (3.9)$$

Quando os sistemas a controlar não têm um integrador na cadeia de acção e se pretende um erro de seguimento nulo o controlador é desenhado partindo da hipótese que se

acrescenta um integrador à saída e consequentemente calculam-se incrementos na variável de actuação ($\Delta u(t)$).

Globalmente, e à excepção do integrador, um controlador difuso pode ser pensado como uma tabela indexada, que a cada conjunto de valores de entrada associa um valor de actuação. Assim o controlador pode ser sintetizado de duas formas distintas:

- executando todos os passos anteriores em tempo real. Equivale a calcular em tempo real qual o valor que deveria estar no ponto correspondente da tabela.
- executando, numa primeira fase, todos os passos anteriores para cada conjunto de entradas. Na fase de controlo em tempo real, acede-se apenas à tabela para obter o valor da actuação. Este procedimento equivale a preencher toda a tabela na primeira fase e a consultá-la na fase posterior.

Ao primeiro dos métodos corresponde um maior tempo de cálculo com reduzida utilização de memória e ao segundo corresponde um menor tempo de cálculo em tempo real, embora com uma maior ocupação de memória. Além disso, como este último implica a discretização das variáveis de entrada, os erros associados a esta operação propagam-se até à actuação, o que conduz a um pior desempenho do controlador assim sintetizado. Como no entanto existem formas de atenuar este efeito (interpolação nos valores de actuação da tabela indexada) [7], ele é o método a utilizar sempre que existam fortes restrições ao intervalo de amostragem. Nos exemplos de aplicação de controladores descritos nesta tese é usado o cálculo da actuação em tempo real, por não existirem restrições fortes ao intervalo de amostragem.

3.4.2 Exemplo de aplicação do Controlo Difuso

Nesta secção descreve-se a construção de um controlador difuso para aplicar ao Sistema 1, que se encontra descrito no Apêndice B e que é descrito pela seguinte dinâmica inicial:

$$y(t) = 1.06y(t-1) - 0.22y(t-2) + 0.0199u(t-1) + 0.0199u(t-2)$$

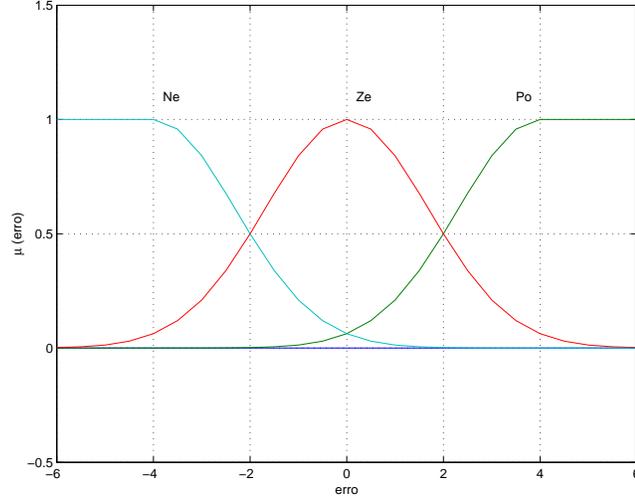


Figure 3.5: Funções de pertença associados aos termos linguísticos da variável erro

Esta dinâmica sofre uma variação brusca no instante 500, passando a ser descrita por:

$$y(t) = 0.9y(t-1) - 0.22y(t-2) + 0.0199u(t-1) + 0.0199u(t-2).$$

As variáveis de entrada, e_t e Δe_t , são codificadas em 3 termos linguísticos (*positivo*, *zero* e *negativo*), com funções de pertença

$$\mu_{positivo}(e_t) = \begin{cases} 1 & \text{se } e_t \geq 2 \\ 2^{-(e_t - 2)^2} & \text{se } e_t < 2 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\mu_{zero}(e_t) = 2^{-e_t^2} \quad (3.11)$$

$$\mu_{negativo}(e_t) = \begin{cases} 1 & \text{se } e_t \leq -2 \\ 2^{-(e_t + 2)^2} & \text{se } e_t > -2 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\mu_{positivo}(\Delta e_t) = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta e_t \geq 1 \\ 2^{-(\Delta e_t - 1)^2} & \text{se } \Delta e_t < 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\mu_{zero}(\Delta e_t) = 2^{-\Delta e_t^2} \quad (3.14)$$

$$\mu_{negativo}(\Delta e_t) = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta e_t \leq -1 \\ 2^{-(\Delta e_t + 1)^2} & \text{se } \Delta e_t > -1 \end{cases} \quad (3.15)$$

representadas nas Figuras 3.5 e 3.6.

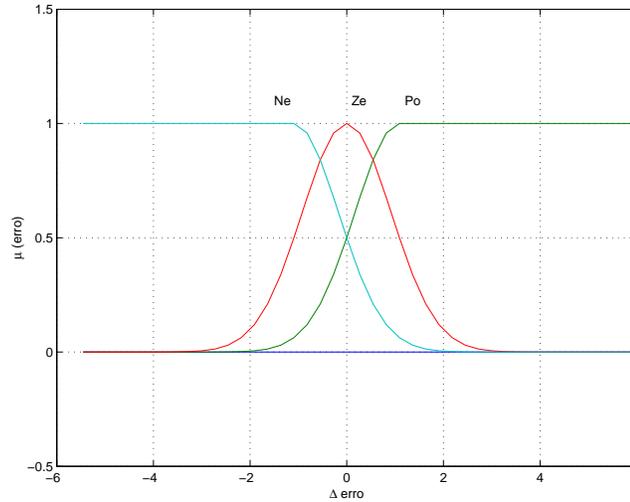


Figure 3.6: Funções de pertinência associados aos termos linguísticos da variável variação no erro

O protocolo de controlo, estendido como o conjunto das 9 regras, é dado por

R1– Se e_t é positivo e Δe_t é positivo Então Δu é positivo grande

R2– Se e_t é positivo e Δe_t é zero Então Δu é positivo médio

R3– Se e_t é positivo e Δe_t é negativo Então Δu é negativo pequeno

R4– Se e_t é zero e Δe_t é positivo Então Δu é positivo médio

R5– Se e_t é zero e Δe_t é zero Então Δu é zero

R6– Se e_t é zero e Δe_t é negativo Então Δu é negativo médio

R7– Se e_t é negativo e Δe_t é positivo Então Δu é positivo pequeno

R8– Se e_t é negativo e Δe_t é zero Então Δu é negativo médio

R9– Se e_t é negativo e Δe_t é negativo Então Δu é negativo grande.

		$\Delta erro$		
		Po	Ze	Ne
<i>Erro</i>	Po	PG	PM	NP
	Ze	PM	ZE	NM
	Ne	PP	NM	NG

Table 3.1: Regras de actuação

Este conjunto de regras está descrito de uma forma mais compacta na Tabela 3.1.

À variável de actuação estão associados 7 termos linguísticos, cujas funções de pertença têm o centro em:

$$\mathbf{PG} - \textit{positivo grande} = 3.5$$

$$\mathbf{PM} - \textit{positivo médio} = 1.65$$

$$\mathbf{PP} - \textit{positivo pequeno} = 0.76$$

$$\mathbf{ZE} - \textit{zero} = 0$$

$$\mathbf{NP} - \textit{negativo pequeno} = -0.76$$

$$\mathbf{NM} - \textit{negativo médio} = -1.65$$

$$\mathbf{NG} - \textit{negativo grande} = -3.5$$

Estes valores foram determinados depois de realizado um processo de afinação. Este processo é discutido no capítulo seguinte, pelo que se remete para esse ponto a compreensão da escolha destes valores.

Nas Figuras 3.7 e 3.8 podem-se ver respectivamente uma representação a 3 dimensões do controlador sintetizado e as curvas de nível associadas ao mesmo.

Foi ainda utilizado um integrador à saída do controlador, para possibilitar um erro estático de posição nulo.

Na Figura 3.9 representam-se, em sobreposição os sinais de referência e saída, no gráfico (a), e o sinal de controlo, no gráfico (b), para uma situação em que a dinâmica foi bruscamente alterada no instante de simulação $t = 500$. De notar que embora o controlador

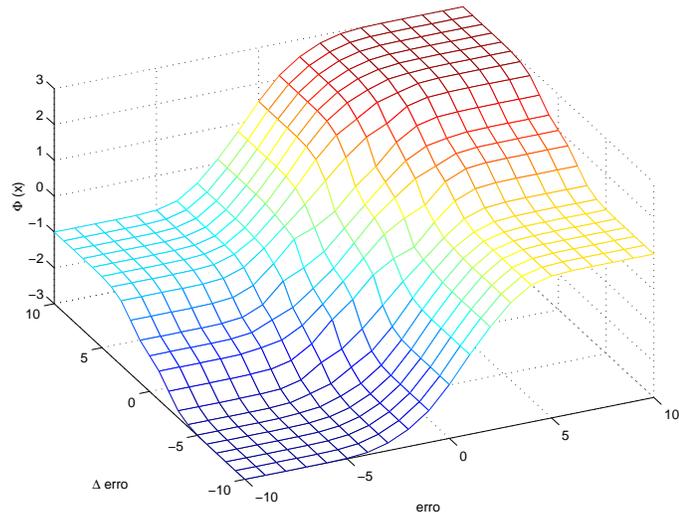


Figure 3.7: Representação do protocolo em 3D.

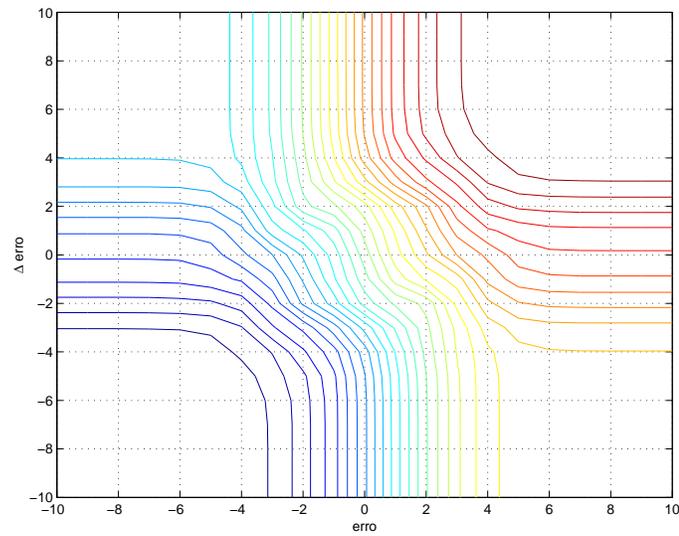
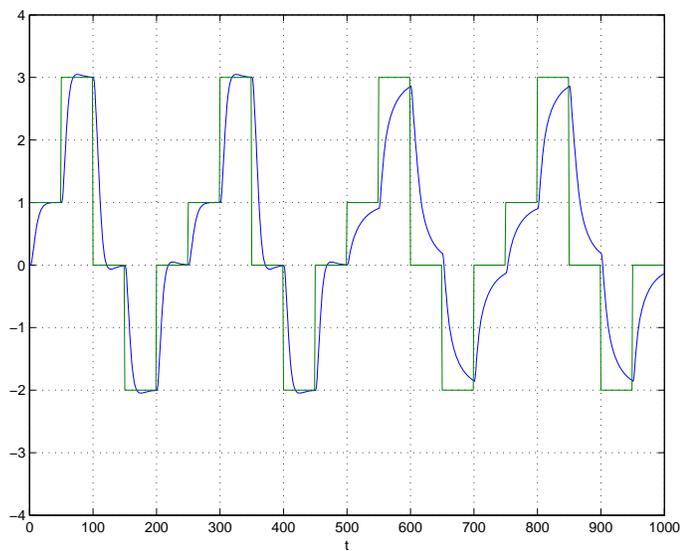
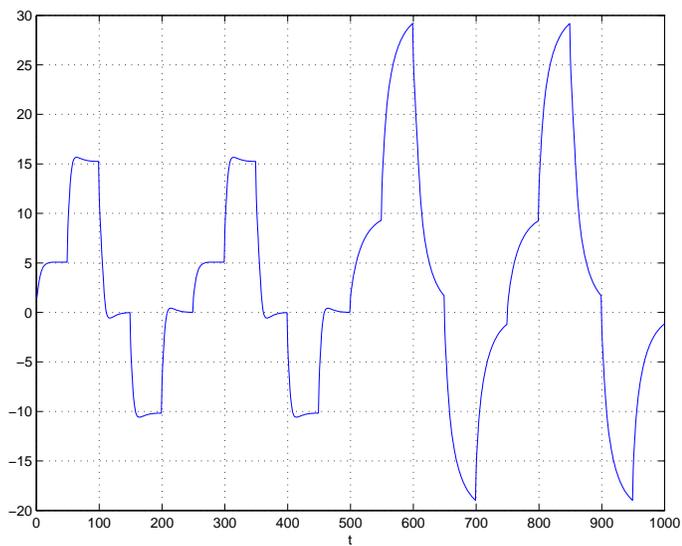


Figure 3.8: Linhas de nível do protocolo.



a) saída e referência



b) controle

Figure 3.9: Resultados da aplicação do controlador difuso

apresente inicialmente um bom seguimento, a partir do momento em que a dinâmica muda o desempenho é fraco. Para que o desempenho do sistema controlado se mantenha, o controlador terá de ser afinado para o novo sistema. Tal será possível através da utilização de supervisão, a discutir no capítulo seguinte.

3.5 Equivalência entre os Controladores Difusos e os Controladores Lineares Clássicos

Em [34], descreve-se a técnica de dimensionamento de um controlador linear clássico do tipo PI ou PD que seja equivalente a um controlador difuso (sintetizado como anteriormente se indicou). Esse método é utilizado em seguida no projecto de um controlador PI equivalente ao calculado na secção anterior.

O dimensionamento dos ganhos de um controlador PI ou PD a partir de um controlador difuso é útil porque permite comparar resultados obtidos com os dois tipos de controladores. Além disso, permite analisar o comportamento de um controlador difuso, por interpretação do lugar geométrico dos polos e zeros do controlador linear equivalente.

Os ganhos K_P , K_I e K_D de um controlador PID definido por:

$$u(t) = K_P \left(e(t) + K_I \sum_{t_0}^t e(t) + K_D \Delta e(t) \right) \quad (3.16)$$

são calculados tomando em consideração o controlador difuso.

Na síntese deste último, assumem-se os seguintes pressupostos:

- Em todas as variáveis do controlador, os níveis de quantificação aproximam-se de zero.
- O protocolo de controlo é tal que, em torno da origem, as curvas de nível da função de actuação, aproximam-se de rectas.

Para o método de síntese do controlador difuso apresentado na secção anterior, os níveis de quantificação são nulos, pelo que o primeiro destes pressupostos é cumprido.

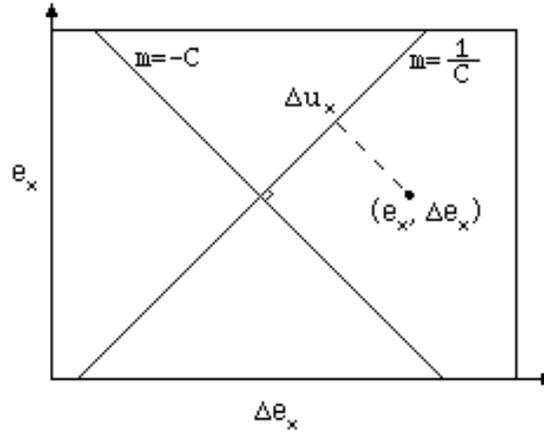


Figure 3.10: Curvas de nível do protocolo e sua relação com a variável de actuação.

O segundo pressuposto depende do conjunto de regras utilizado. Considerando por exemplo a parte central da Figura 3.8, verifica-se que é cumprido, desde que as amplitudes das variáveis de entrada não atinjam a zona não linear do controlador.

Partindo de um controlador difuso com entradas e_x e Δe_x , calculam-se os declives das rectas tangente ($-C$) e perpendicular ($\frac{1}{C}$) às curvas de nível associadas com a variável de actuação [34]. Constroem-se seguidamente as rectas correspondentes, que passam no ponto $(e_x, \Delta e_x)$ com inclinação $-C$ e no origem com inclinação $\frac{1}{C}$. Estas rectas são descritas pelas equações:

$$-C = \frac{e - e_x}{\Delta e - \Delta e_x} \quad (3.17)$$

$$\frac{e}{\Delta e} = \frac{1}{C} \quad (3.18)$$

Com base em (3.17) e (3.18) e atendendo à estrutura linear da actuação, o controlo é dado por (ver Figura 3.10):

$$\Delta u_x = \frac{P}{\sqrt{1+C^2}} [e_x + C\Delta e_x] \quad (3.19)$$

onde P é uma constante de proporcionalidade que traduz o factor de escala das variáveis de entrada ou de actuação, sendo igual 1 sempre que aquelas não se escalem.

Se à saída do controlador difuso existir um integrador então de (3.19) podem identificar-se os ganhos de um PI, dados por:

$$K_P = \frac{CP}{\sqrt{1+C^2}} \quad (3.20)$$

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{1+C^2}}. \quad (3.21)$$

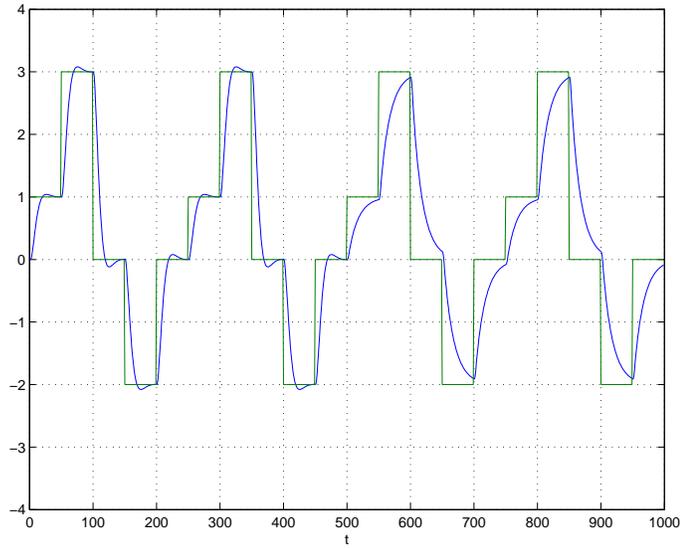
No caso da não existência do integrador, a comparação pode ser feita com um PD, em que os ganhos são dados por:

$$K_P = \frac{P}{\sqrt{1+C^2}} \quad (3.22)$$

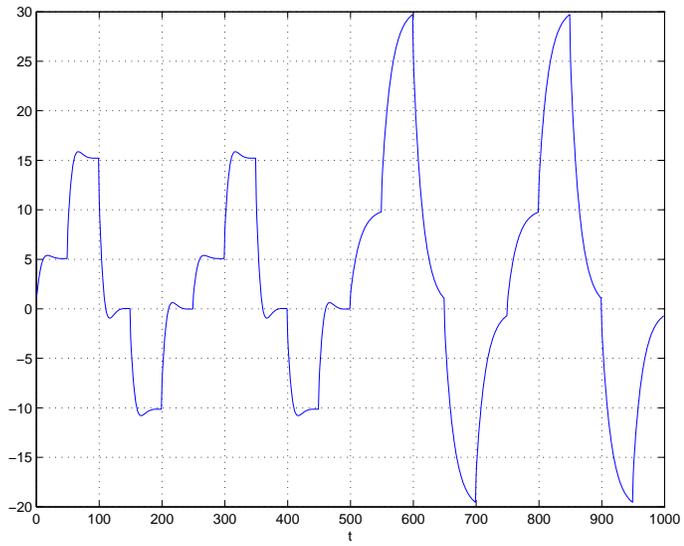
$$K_D = \frac{PC}{\sqrt{1+C^2}}. \quad (3.23)$$

Para validar este método, encontraram-se os ganhos de um PI, partindo do controlador difuso sintetizado na secção anterior. Tomando o valor aproximado de $C = -1.4$ para o declive das curvas de nível, obtêm-se os valores $K_I = 0.53$ e $K_P = 0.81$.

Na Figura 3.11 apresentam-se os resultados obtidos, nas mesmas condições que a do exemplo da secção anterior. De realçar a grande semelhança nos resultados, o que confirma a validade do método de equivalência apresentado.



a) saída e referência



b) controlo

Figure 3.11: Resultados da aplicação de um PI equivalente ao controlador difuso apresentado na secção anterior.

Chapter 4

Supervisão de Controladores

4.1 Introdução

Em sistemas complexos ou de difícil modelização, o funcionamento dos controladores tem de ser vigiado, sendo necessário afinar os seus parâmetros e decidir sobre os instantes de alteração do regime de funcionamento (alteração de referências, ligação de máquinas).

Enumeram-se em seguida algumas características geralmente associadas a sistemas reais complexos:

- existência de várias cadeias de controlo interactuando entre si,
- existência de fortes não linearidades,
- existência de dinâmicas variantes no tempo,
- a necessidade de, para melhorar o desempenho do sistema, executar uma série de acções complexas, que requerem um planeamento correcto,
- a necessidade de escolher os instantes de actuação e de fiscalizar as consequências da actuação.

Neste cenário, a intervenção de operadores humanos é absolutamente necessária. A supervisão de controladores pretende substituir os operadores humanos por um mecanis-

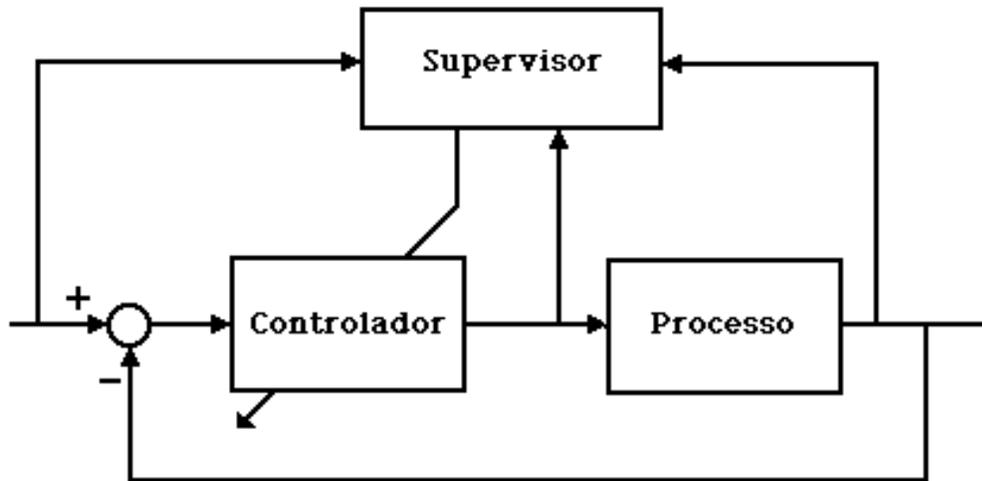


Figure 4.1: A supervisão como uma cadeia de nível superior

mo automático, em que seja também possível incorporar o conhecimento necessário ao correcto funcionamento do sistema a controlar.

A supervisão pode pois ser entendida como uma cadeia de controlo de nível superior que, tomando em consideração os resultados que estão a ser obtidos *conclui* sobre quais as alterações ou afinações a fazer, por forma a melhorar o desempenho do sistema (Figura 4.1).

Este processo de adaptação é distinto do utilizado em controlo adaptativo, onde se identifica o processo a controlar, sendo depois calculados os parâmetros do controlador que minimizam uma determinada funcional. A supervisão permite, para além da alteração dos ganhos em controladores, incorporar mecanismos de escolha e selecção de parâmetros (mudanças nas referências, arranque de subsistemas) ou mesmo a alteração da estrutura dos controladores a utilizar (ver [20]).

Neste capítulo discutem-se arquitecturas distintas de supervisão baseadas em Lógica Difusa, para aplicação a controladores PI e a controladores difusos.

A lógica difusa permite incorporar o conhecimento do operador, na forma de regras, e medidas das variáveis do processo, na forma de factos. Com o auxílio do processo de

inferência difusa é possível deduzir informação acerca do processo controlado.

A estratégia de implementação de supervisores pode ser **local** ou **global**. Numa estratégia local, em cada instante de amostragem compara-se a saída real com a saída pretendida, servindo esta diferença como medida do desempenho no último período de amostragem, o que provocará a alteração da regra ou regras mais importantes ou a adição de regras que reforcem ou atenuem o efeito das existentes.

Na estratégia global as decisões são tomadas com base em características (*features*) temporais da resposta. A actuação sobre o sistema estará assim baseada em informação semelhante àquela que o operador humano utiliza para tomar decisões (características dos sinais relevantes, observadas num troço temporal).

Na estratégia local, a interacção com o controlador é feita em todos os intervalos de amostragem, não se assemelhando portanto à que um operador humano tem relativamente ao controlador. Este facto é uma limitação deste tipo de estratégia. Acresce que em processos com atraso ou com não linearidades a estratégia local pode conduzir a decisões “precipitadas” com conseqüente degradação do desempenho de todo o sistema.

Na síntese do supervisor baseado em lógica difusa, pode usar-se uma abordagem **auto organizativa** ou de **adaptação**. Na abordagem auto-organizada pretende-se descobrir quais das regras existentes se devem utilizar ou modificar. Na abordagem de adaptação a perspectiva é diferente, alterando-se o comportamento do controlador por modificação das funções de pertença das variáveis de entrada ou de actuação.

Há, no entanto, três restrições quanto ao uso da abordagem auto-organizada:

- Não é correcto modificar as regras, uma vez que elas expressam o conhecimento que o operador tem sobre os procedimentos de afinação do controlador.
- Devem ser cumpridas restrições de simetria. Isto significa que modificar uma regra com determinadas premissas obriga a alterar a regra com premissas simétricas [7].
- Devem ser cumpridas restrições de estabilidade. Embora este assunto não esteja completamente esclarecido (ver [7]) é claro que a actuação não pode actuar em sentido contrário à reacção que é esperada do sistema a controlar.

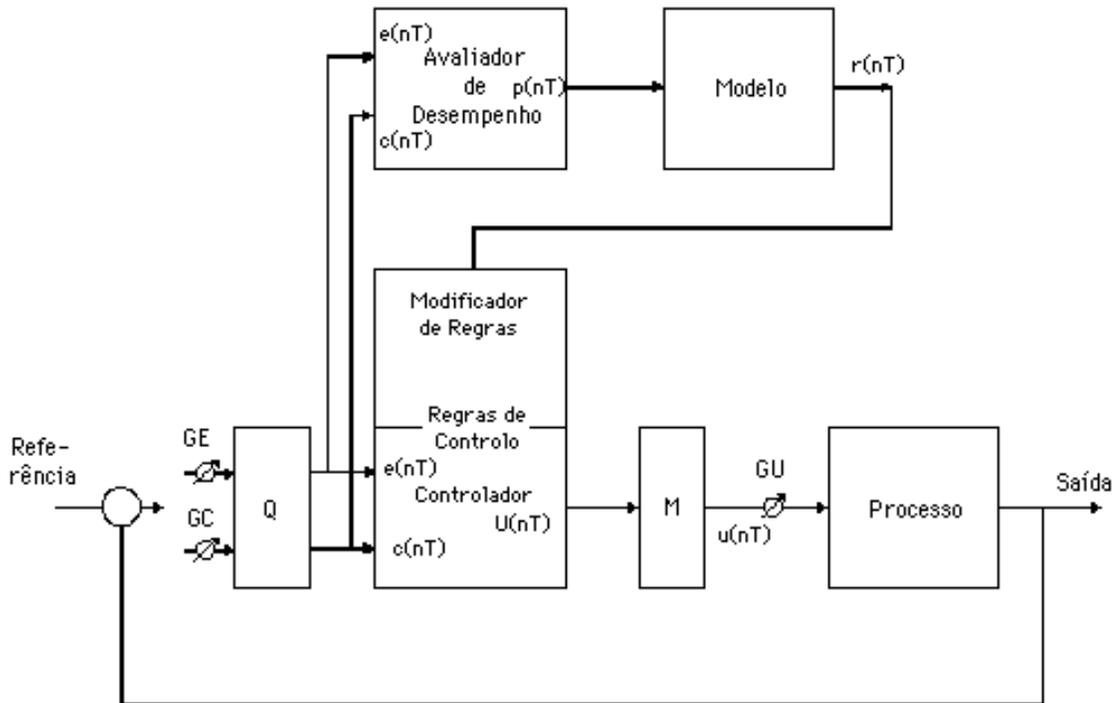


Figure 4.2: Estrutura geral de supervisão utilizada por Procyk

Optou-se, nas arquitecturas propostas nesta tese, por estratégias de adaptação, que cumprindo as restrições de simetria e estabilidade [7], apresentam um número infinito de possibilidades (alteração de funções) no controlador obtido. Além disso, a alteração das funções de pertinência não invalida o conhecimento do operador de processos, expresso nas regras utilizadas no controlador.

Em [27] encontra-se a descrição de um supervisor auto-organizado, que utiliza uma estratégia local e cuja estrutura se representa na Figura 4.2. Neste, existe uma cadeia de controlo ligeiramente diferente da descrita no capítulo anterior pois contém três ganhos – GE, GC e GU – associados respectivamente às variáveis de entrada $e(nT)$ e $\Delta e(nT)$ e à variável de actuação $u(nT)$ e além disso não tem o integrador à saída do controlador.

A cadeia de supervisão, tendo acesso às mesmas entradas que o controlador difuso, *avalia o desempenho* da actuação por comparação com a saída pretendida (exterior ao

processo), e com base num *modelo* incremental do processo, calcula o reforço a fazer nas regras. Nesta estrutura são patentes alguns inconvenientes:

- o modelo incremental pode ser difícil ou mesmo impossível de determinar.
- no final do processo de aprendizagem o número de regras é muito grande, podendo chegar à centena. Isto torna o processo de inferência lento e impossibilita a compreensão do protocolo estabelecido.
- tomada a decisão de alterar o comportamento do controlador, não fica claro qual ou quais as regras a modificar, mesmo tomando em conta uma estimativa do atraso no sistema.

Em [7] encontra-se também o exemplo de um supervisor, na forma auto-organizada, com uma estratégia global e cuja estrutura se representa na Figura 4.3. Neste caso a cadeia de controlo é semelhante à descrita no capítulo anterior, diferindo apenas no facto de o controlador difuso ser implementado na forma de uma tabela de actuação.

A cadeia de supervisão é constituída por vários blocos em cascata:

- O *modelo de referência* constituído por um mapa de trajectórias padrão.
- O *avaliador de trajectórias* que estima a separação das trajectórias reais relativamente às de referência, quer sejam trajectórias completas ou troços temporários das mesmas.
- O *modificador das regras* que, baseado na informação do avaliador, gera as acções oportunas sobre o protocolo.
- O *mecanismo de inferência* que tomando as *regras* modificadas, calcula a nova tabela de actuação ($\phi(x)$).

Dadas as restrições de estabilidade e simetria, o pequeno número de protocolos diferentes é uma limitação desta filosofia. Também o conjunto de trajectórias padrão, ao ser construído sem se ter em conta o processo que vai ser controlado, limita ou inviabiliza a possibilidade de um ajuste adequado, a um sistema particular.

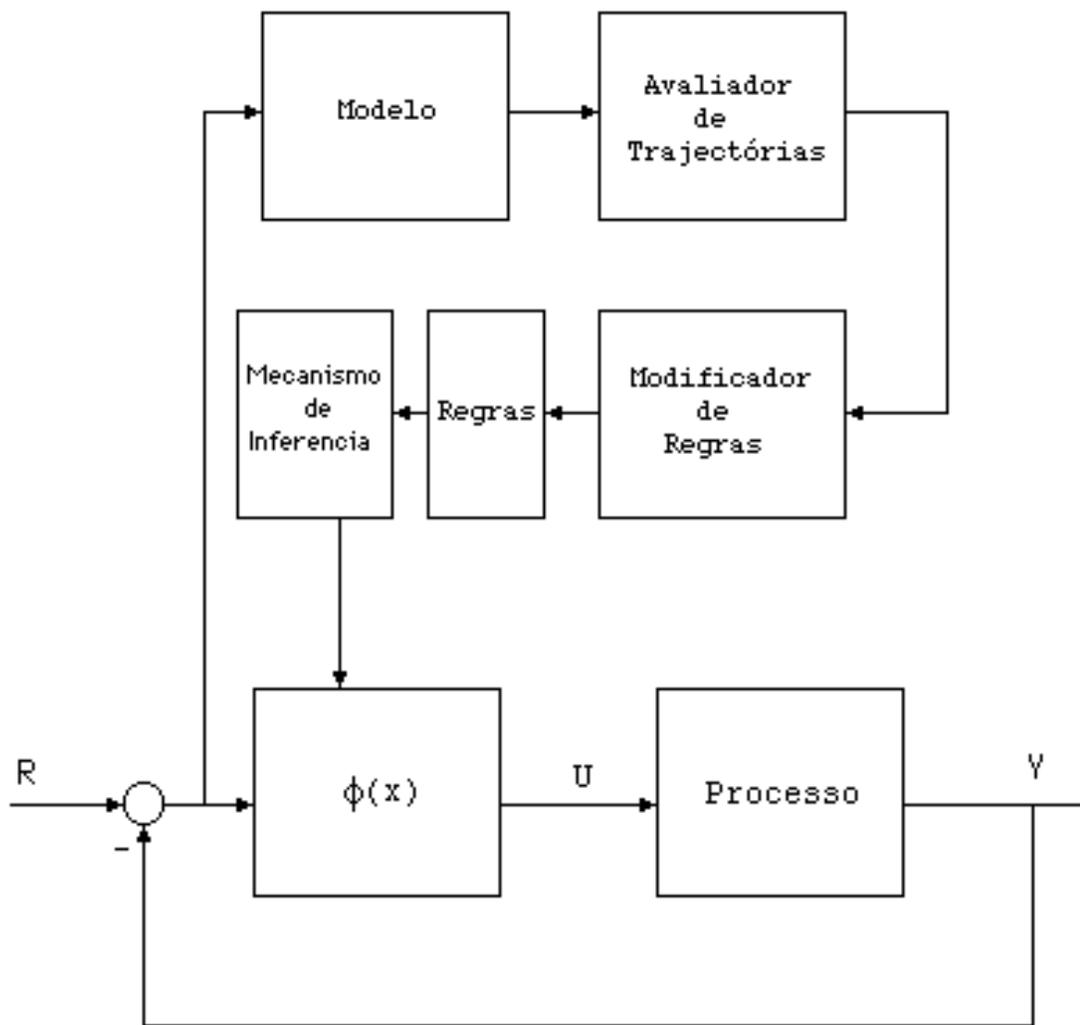


Figure 4.3: Estrutura geral para supervisão utilizada por Cerezo

Embora os dois trabalhos referidos apresentem soluções interessantes para a construção de um supervisor, outras estratégias alternativas que não partilham algumas das desvantagens citadas, devem ser exploradas.

Nas secções seguintes deste capítulo apresentam-se três estratégias para a construção de supervisores para controladores PI e controladores difusos directos. Estas arquitecturas de supervisão pretendem resolver o problema abordado, sem os inconvenientes referidos para os dois trabalhos referidos. A primeira diz respeito à supervisão, baseada em lógica difusa, dos parâmetros de um PI e que vai ser denominada, de forma abreviada por SPI. Seguidamente estuda-se a supervisão de um controlador difuso, que baseada num algoritmo modifica o centro das funções de pertença da variável de actuação, e é denominada SAD. Finalmente apresenta-se um supervisor onde o algoritmo utilizado no SAD é traduzido num controlador difuso e denominado por SDD.

4.2 Supervisão Difusa de um PI – SPI

4.2.1 Estrutura do SPI

Na Figura 4.4 representa-se a arquitectura do primeiro supervisor implementado, um supervisor difuso para um controlador PI, denominado SPI.

Nesta arquitectura, para além da cadeia de controlo de baixo nível existe também uma cadeia de alto nível, responsável pela supervisão. A cadeia de baixo nível, incorporando um PI, tem uma estrutura igual à descrita no capítulo anterior, como se pode ver na Figura 4.4.

Os sistemas aos quais se pode aplicar este supervisor restringem-se aos que podem ser estabilizados por um PI. Esta restrição advém unicamente do controlador utilizado e não da filosofia de supervisão.

O supervisor vai corrigir os ganhos K_I e K_P , tendo em consideração características das respostas temporais parciais. Além disso, a actuação do supervisor permite resolver outros problemas, como sejam o controlo de sistemas não lineares e/ou variantes no tempo. Não é necessário que os ganhos iniciais estejam afinados, para que o supervisor funcione. É

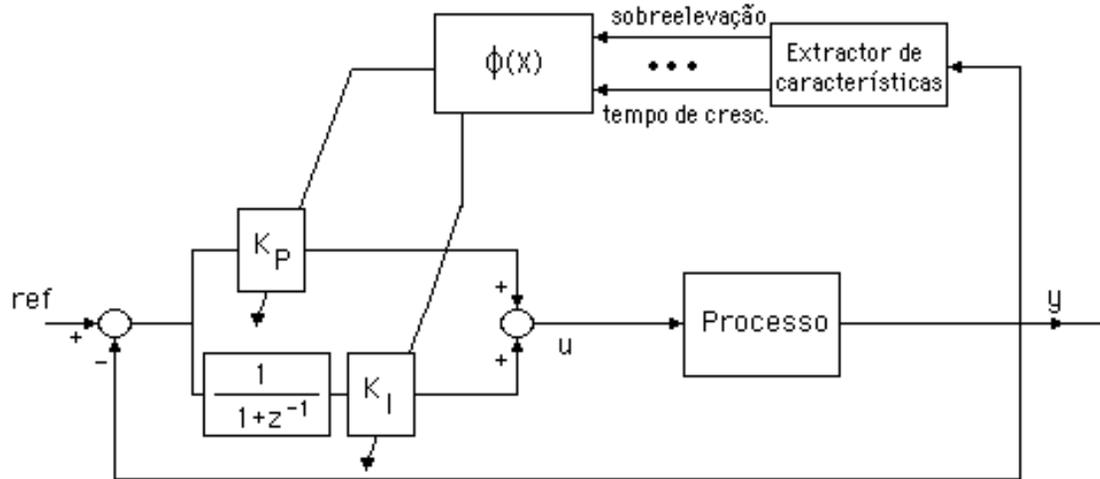


Figure 4.4: Arquitectura do controlador e do supervisor difuso de um PI

no entanto aconselhável que a cadeia de baixo nível não seja inicialmente instável, por exemplo devido a troca de sinal dos ganhos ou a desafinação.

As características da resposta temporal a utilizar no supervisor dependem da(s) funcional(is) a minimizar. Algumas mais significativas são a sobrelevação, o tempo de crescimento, o tempo de estabelecimento, o erro de posição, a actividade no controlo, etc.

Nos exemplos apresentados nesta secção, as entradas do supervisor são (ver Figura 4.5) a sobrelevação ($S\%$) e o tempo de crescimento (t_c). A sobrelevação é dada por

$$S\% = 100 \frac{y_{max} - y_{final}}{ref - ref_{ant}}$$

onde y_{max} é o valor máximo atingido pela resposta e y_{final} é o valor atingido em regime estacionário, após uma mudança na referência de ref_{ant} para ref .

O tempo de crescimento (t_c), tomado como se vê na Figura 4.5, é o número de intervalos de amostragem que a saída do sistema leva a atingir, pela primeira vez, o novo valor da referência ref , com um erro menor que δ .

A síntese do supervisor difuso, que tem como entradas a sobrelevação $S\%$ e o tempo de crescimento t_c , poderia ter sido realizada, para um sistema a controlar, por observação

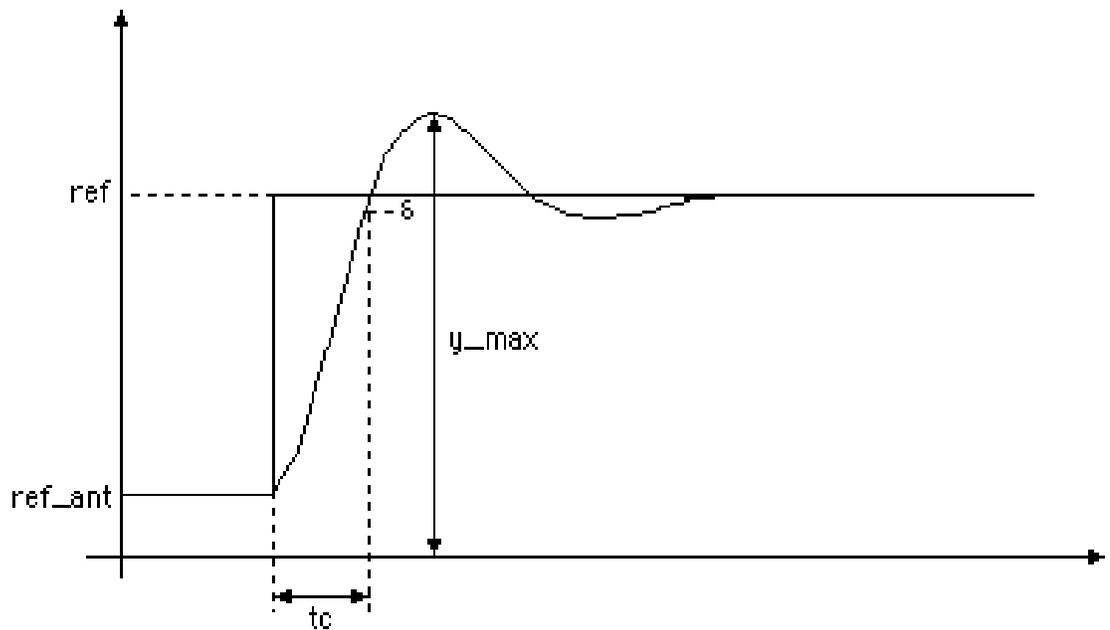


Figure 4.5: Cálculo das características da resposta

das relações dessas grandezas com K_I e K_P . Tal não é possível pois o modelo do sistema a controlar nem sempre é completamente conhecido. Mesmo no casos em que se conhece o modelo do sistema a controlar, as relações entre as características de entrada e os ganhos do controlador são difíceis ou mesmo impossíveis de obter, devido à estrutura complexa do problema. Aconselha-se a utilização da seguinte metodologia:

- Realizar experiências com o sistema a controlar, variando os parâmetros do controlador e observando as alterações nas características a utilizar. Quando tal não for viável, utilizar um modelo, tão correcto quanto possível do sistema a controlar.
- Sintetizar as funções de pertinência, que descrevem as modificações a efectuar nos ganhos dos controladores, para obter as alterações pretendidas na características utilizadas.
- Construir um conjunto de regras que sintetize as conclusões obtidas das experiências referidas no primeiro *item* da metodologia.

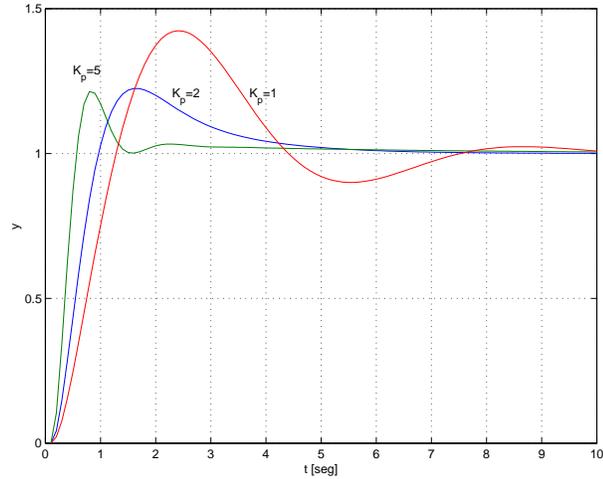


Figure 4.6: Respostas obtidas com $K_I = 0.4$, variando K_P

		t_c		
		Pg	Pm	Pp
S%	Pg	NGi	NMi	NPi
	Pm	ZEi	ZEi	ZEi
	Pp	PPi	PMi	PGi

Table 4.1: Protocolo de variação do ganho K_I

Optou-se assim neste trabalho pela realização de experiências com vários sistemas, que embora simples, permitem concluir acerca das relações entre a variação dos ganhos do controlador e as características atrás mencionadas. Nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam-se os resultados obtidos numa dessas experiências, usando o sistema

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{5}{s(s+5)}$$

nas seguintes condições:

- $K_I = 0.4$, variando K_P (Figura 4.6).
- $K_P = 2$, variando K_I (Figura 4.7).
- Condições iniciais nulas.

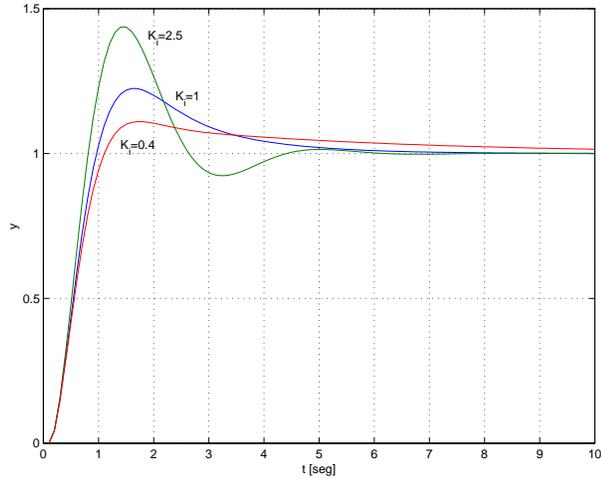


Figure 4.7: Respostas obtidas com $K_P = 2$, variando K_I

		t_c		
		Pg	Pm	Pp
$S\%$	Pg	PGp	ZE _p	NP _p
	Pm	PM _p	ZE _p	NM _p
	Pp	PP _p	ZE _p	NL _p

Table 4.2: Protocolo de variação do ganho K_P

- Resposta a escalões na entrada de referência.

Da observação dos resultados obtidos conclui-se facilmente que para o sistema considerado o aumento de K_P implica a diminuição de t_c e a diminuição de K_I implica a diminuição de $S\%$. Baseados nestes factos, foram construídos dois protocolos para variação dos ganhos K_I e K_P , descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Para a escolha dos instantes de actuação do supervisor, foram consideradas várias opções:

1. Instante de supervisão constante e muito superior ao intervalo de amostragem (por exemplo dez vezes).
2. Instante de supervisão variável, conforme as modificações na referência.

3. Instante de supervisão variável, depois de se terem disponíveis as características de entrada. O extractor de características tem pois de detectar a passagem pelo valor da referência e pelo máximo da saída.
4. Instante de supervisão variável, dado por um *time-out*, caso as características de entrada no supervisor ainda não estejam disponíveis.

As duas primeiras opções foram abandonadas por não serem de aplicação geral, falhando por exemplo no caso de sistemas lentos. As duas últimas opções foram implementadas conjuntamente. Esta filosofia foi adoptada pois no caso da resposta do sistema ser muito lenta as características de entrada não estão acessíveis em tempo útil. Assim, no caso de sistemas com sobrelevação ou com uma resposta rápida o primeiro dos mecanismos funciona. No caso de sistemas muito lentos a supervisão é forçada (caso de excepção).

No instante de actuação do supervisor, o extractor de características calcula os valores das características da entrada ($S\%$ e t_c) e com base nestes valores o supervisor decide qual a alteração a introduzir nos ganhos do controlador. A amplitude desta variação depende dos valores centrais das funções de pertença das variáveis de actuação, para o ganho K_I e K_P , denominadas respectivamente \bar{V}_{xxi} e \bar{V}_{xpp} . Existe assim um compromisso entre a velocidade de convergência dos parâmetros e a sua oscilação.

4.2.2 Resultados com o SPI

Apresentam-se agora os resultados obtidos na aplicação do SPI aos sistemas descritos no Apêndice B.

\bar{V}_{PGi}	\bar{V}_{PMi}	\bar{V}_{PPi}	\bar{V}_{ZEi}	\bar{V}_{PGp}	\bar{V}_{PMp}	\bar{V}_{PPp}	\bar{V}_{ZEp}	δ	K_P	K_I
0.4	0.3	0.2	0.0	1.0	0.6	0.3	0.0	0.05	1.0	0.5

Table 4.3: Parâmetros de configuração do SPI, na aplicação ao Sistema 1.

Na aplicação ao Sistema 1 (sistema estável, de fase mínima com uma variação brusca na dinâmica), a cadeia de controlo incorporando o controlador PI é igual à descrita no Capítulo 3, Secção 4 e os parâmetros iniciais de configuração do SPI encontram-se na

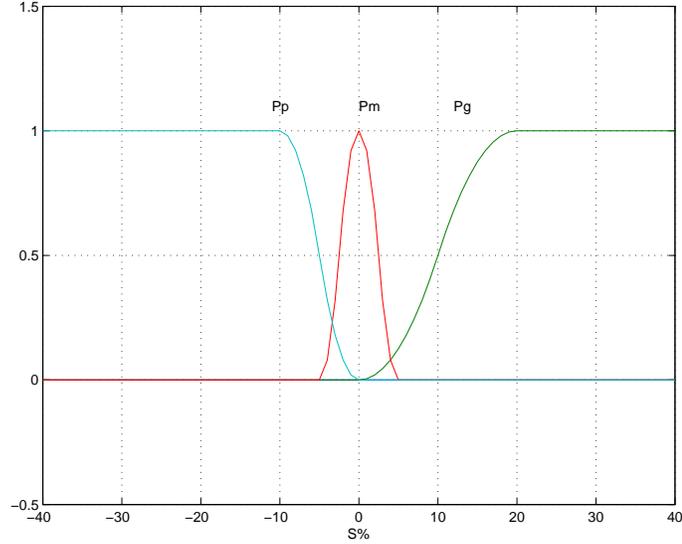


Figure 4.8: Funções de quantificação da sobrelevação $S\%$.

\bar{V}_{PGi}	\bar{V}_{PMi}	\bar{V}_{PPi}	\bar{V}_{ZEi}	\bar{V}_{PGp}	\bar{V}_{PMp}	\bar{V}_{PPp}	\bar{V}_{ZEp}	δ	K_P	K_I
0.02	0.01	0.005	0.0	0.02	0.01	0.005	0.0	0.05	0.01	0.25

Table 4.4: Parâmetros de configuração do SPI, na aplicação ao Sistema 2.

Tabela 4.3.

As entradas no supervisor, $S\%$ e t_c , são codificadas com auxílio das funções apresentadas respectivamente nas Figuras 4.8 e 4.9.

Na Figura 4.10 apresentam-se os resultados obtidos para o Sistema 1. Na Figura 4.10 a) apresenta-se a referência e a saída e em b) apresentam-se os valores de K_P e K_I . Estes valores, inicialmente incorrectos, são afinados devido ao funcionamento do SPI, tendo em vista melhorar o desempenho do sistema. No instante de simulação 500 o sistema sofre uma mudança na dinâmica, ficando por isso desafinados os valores de K_P e K_I . O processo de afinação prossegue, agora para novos valores de K_P e K_I . No final da simulação e devido ao processo de adaptação o desempenho do sistema melhora.

Na aplicação ao Sistema 2 (sistema de fase não mínima), a cadeia de controlo incorporando o controlador PI é também igual à descrita no Capítulo 3 e os parâmetros iniciais

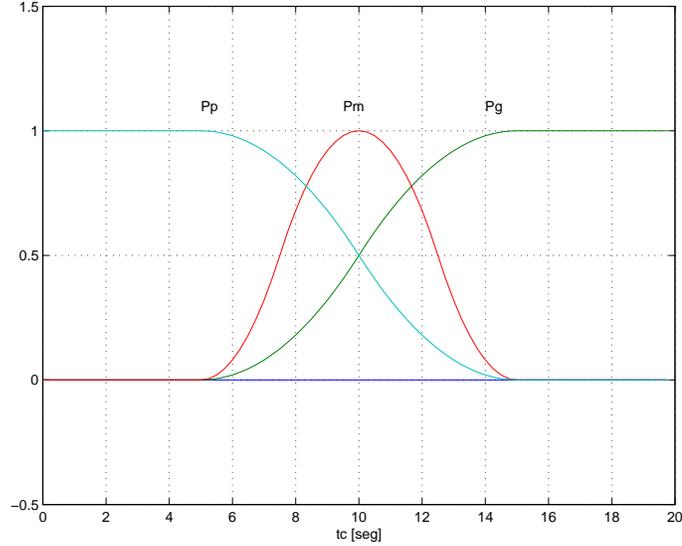


Figure 4.9: Funções de quantificação do tempo de crescimento t_c .

\bar{V}_{PGi}	\bar{V}_{PMi}	\bar{V}_{PPi}	\bar{V}_{ZEi}	\bar{V}_{PGp}	\bar{V}_{PMp}	\bar{V}_{PPp}	\bar{V}_{ZEp}	δ	K_P	K_I
0.15	0.10	0.05	0.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.05	4.0	0.3

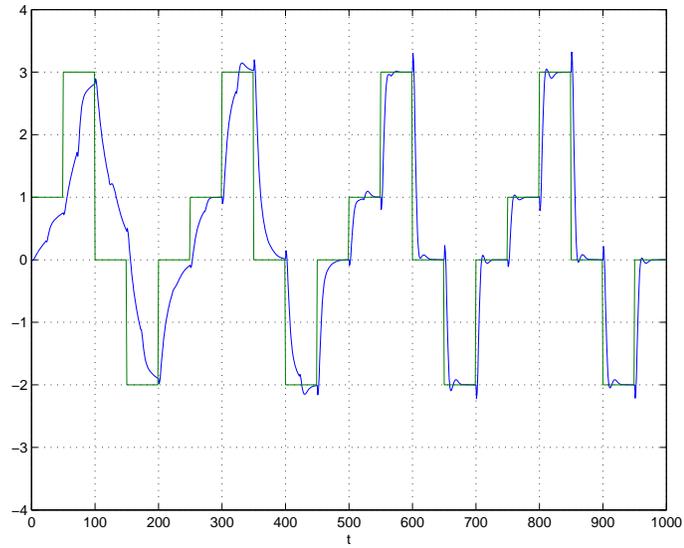
Table 4.5: Parâmetros de configuração do SPI, na aplicação ao Sistema 3.

de configuração do SPI encontram-se na Tabela 4.4.

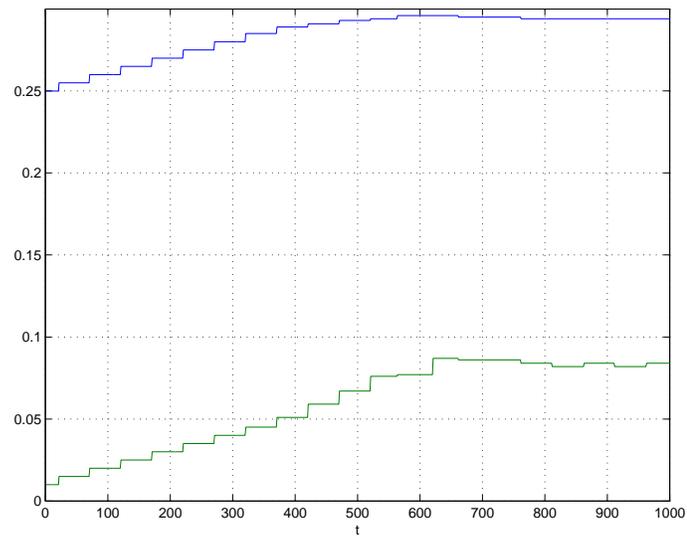
As entradas no supervisor, $S\%$ e t_c são ainda codificadas com auxílio das funções apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente. Na Figura 4.11 a) apresenta-se a referência e a saída e em b) apresentam-se os valores de K_P e K_I . Os valores iniciais do PI, foram escolhidos com algum cuidado, devido ao carácter particular do sistema em questão (fase não mínima), sendo depois afinados devido ao funcionamento do SPI (Figura 4.11 b)). No final da simulação e devido ao processo de adaptação o desempenho do sistema melhora.

Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos por aplicação do SPI ao Sistema 3 (sistema piloto para controlo de nível de água num tanque). Os parâmetros iniciais de configuração do SPI encontram-se na Tabela 4.5.

As entradas no supervisor, $S\%$ e t_c são codificadas com auxílio das funções apresentadas



a) saída e referência



b) Valores de K_P e K_I .

Figure 4.11: Resultados do SPI aplicado ao Sistema 2

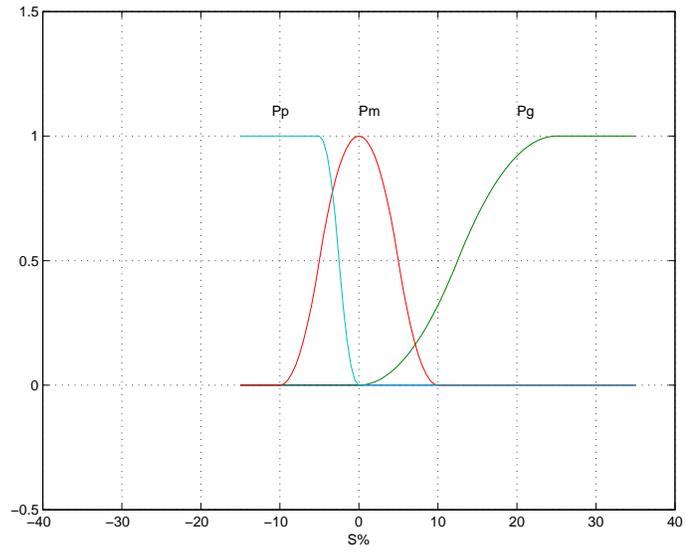


Figure 4.12: Funções de quantificação da sobre-elevação $S\%$.

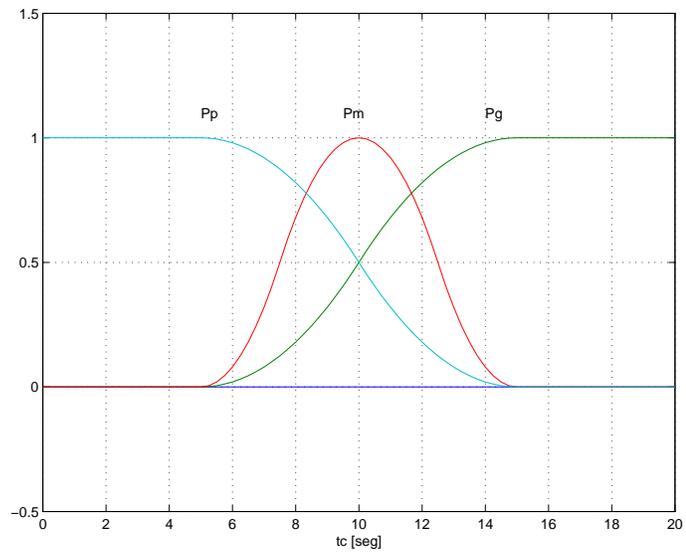


Figure 4.13: Funções de quantificação do tempo de crescimento t_c .

nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente.

Na Figura 4.14 a) apresenta-se a referência e a saída e em b) apresentam-se os valores de K_P e K_I .

4.2.3 Comentários

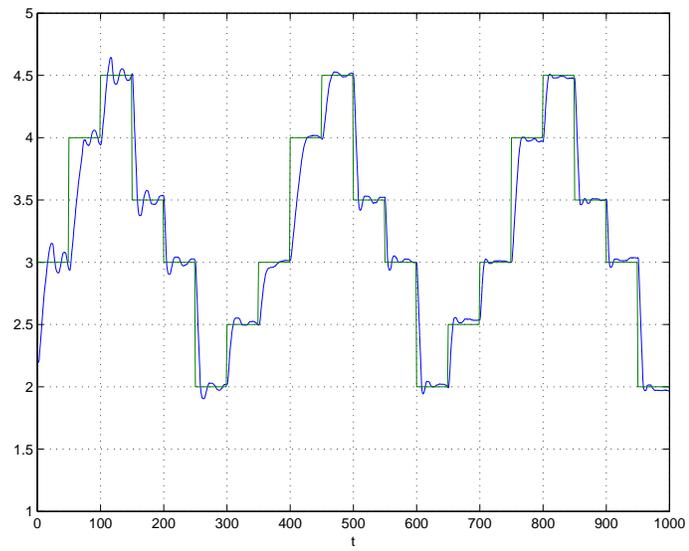
Nas três experiências apresentadas as características, da resposta temporal, utilizadas como entradas no SPI foram as mesmas (sobreelevação e tempo de crescimento). Isto deve-se ao facto de se pretender, nas aplicações descritas, que os sistemas apresentem sobreelevação nula com um menor tempo de crescimento possível. Se outros critérios fossem seguidos também as características a utilizar seriam diferentes.

O protocolo utilizado no supervisor foi sempre o mesmo, devido à semelhança das características dos sistemas a controlar (sistemas de segunda ordem, sem atraso). Para sistemas com atraso significativo, por exemplo, o protocolo seria diferente, mas a estrutura do supervisor manter-se-ia. A síntese do protocolo, sendo dependente do sistema em consideração, deve pois traduzir as operações de afinação correctas para cada caso.

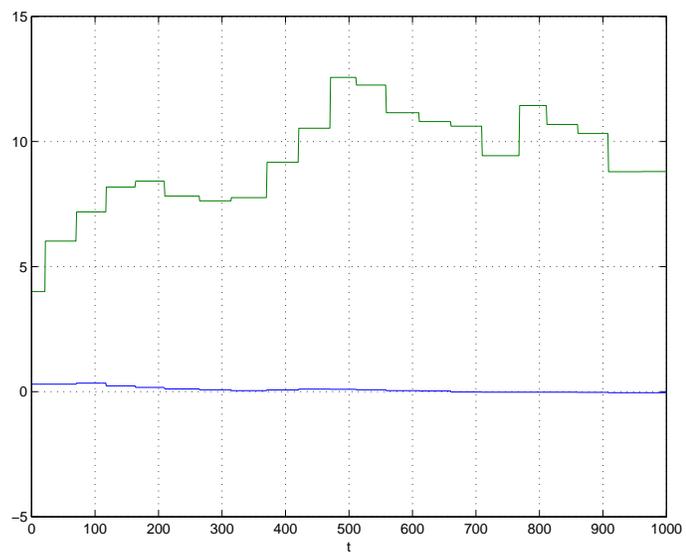
A imposição de um determinado valor para o tempo de crescimento é importante pois condiciona a convergência dos resultados da supervisão. No caso extremo de se pretender um tempo de crescimento muito pequeno, impossível de se obter sem sobreelevação com um dado sistema, os valores de K_P oscilariam entre os limites mínimo (para evitar a sobreelevação) e máximo (para tentar diminuir o tempo de crescimento). É aconselhável na fase inicial da implementação do supervisor, não ser demasiado exigente na escolha das funções de pertinência associadas a este parâmetro (ver metodologia apresentada). Este problema agrava-se no caso de processos reais, onde não se pode tolerar sobreelevação e onde não são desejáveis oscilações no desempenho do sistema.

Um restrição importante diz respeito aos valores iniciais dos ganhos do controlador pois a tarefa do supervisor é ineficaz no caso de sistemas instáveis ou com um desempenho muito pobre. Estes valores devem pois resultar de experiências prévias efectuadas com o sistema em causa.

Dos resultados obtidos e dos comentários anteriores pode concluir-se da melhoria no



a) saída e referência



b) Valores de K_P e K_I .

Figure 4.14: Resultados do SPI aplicado ao Sistema 3

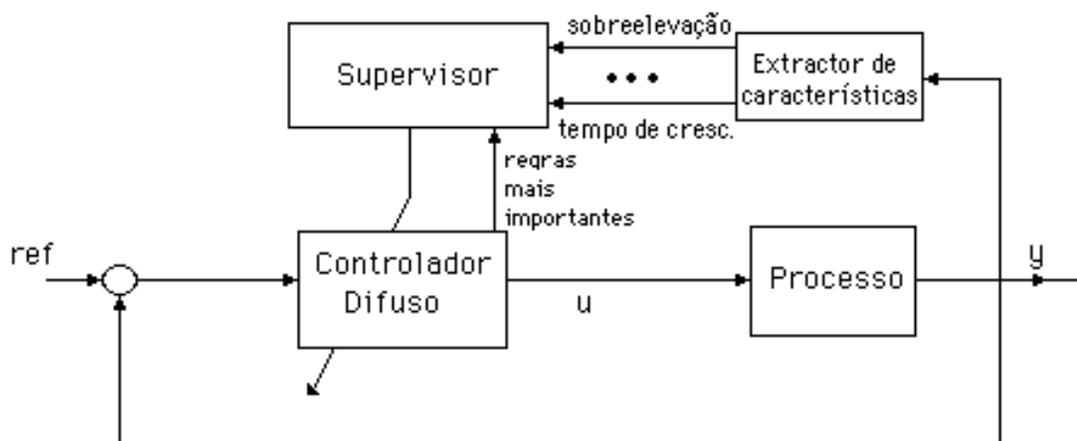


Figure 4.15: Arquitectura do controlador e do supervisor algorítmico SAD

desempenho do controlador, devido á sua afinação pelo supervisor.

4.3 Supervisão Algorítmica de um Controlador Difuso – SAD

4.3.1 Estrutura do SAD

Nesta secção apresenta-se a arquitectura para um supervisor algorítmico de um controlador difuso – **SAD** (ver Figura 4.15).

É essencialmente uma arquitectura hierárquica de dois níveis, com uma cadeia básica de controlo difuso semelhante à descrita no capítulo anterior e com uma cadeia de supervisão, no nível mais elevado. Assume-se, salvo afirmação em contrário, que a cadeia de controlo de baixo nível é exactamente igual à do capítulo anterior (Capítulo 3, Secção 4).

O sistema a ser controlado é um sistema SISO, em relação ao qual não existem restrições à partida, excepto no facto de se assumir que o operador deve ter conhecimento sobre o comportamento desse sistema.

A cadeia de supervisão tenta resolver alguns problemas como sejam o controlo de sistemas não lineares e/ou variantes no tempo ou a afinação, no controlador difuso, dos

Decisão: Aumentar **Regras mais importantes:** 1,2,5

Regra 1: Se Erro é PG e Δ Erro é PG Então Control é PG

Regra 2: Se Erro é PG e Δ Erro é ZE Então Control é PM

Regra 5: Se Erro é ZE e Δ Erro é ZE Então Control é ZE

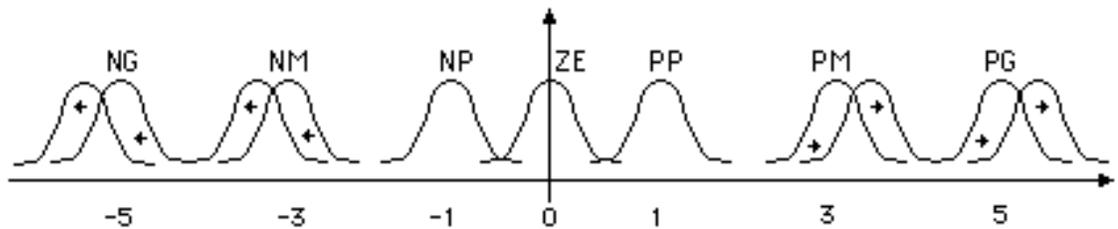


Figure 4.16: Exemplo de actuação do supervisor

termos linguísticos dados pelo perito.

Segundo o ponto de vista do controlador difuso, o supervisor tem uma tarefa de afinação, baseado nas características observadas da resposta temporal. As características plausíveis de se utilizarem como entradas do supervisor, são, entre outras, a sobreelevação, o tempo de crescimento, o tempo de estabelecimento, o erro de posição, a actividade do controlo, etc. Devido ao processo de inferência difuso, também o conjunto de regras com maior contribuição ao longo do intervalo de tempo entre dois instantes de supervisão, será fornecido ao supervisor. Estas são as regras que o supervisor modificará, baseado na comparação entre as características observadas e as desejadas.

A modificação a fazer está associada às funções de pertinência que descrevem os termos linguísticos da variável de actuação nas regras mais importantes. Mais precisamente, tomada a decisão de incrementar ou diminuir a actuação, a modificação faz-se alterando o centro dessas funções (ver Figura 4.16).

Existem no entanto algumas restrições que devem ser respeitadas [7]:

- Se a função associada a um termo linguístico muda, a sua simétrica deve mudar

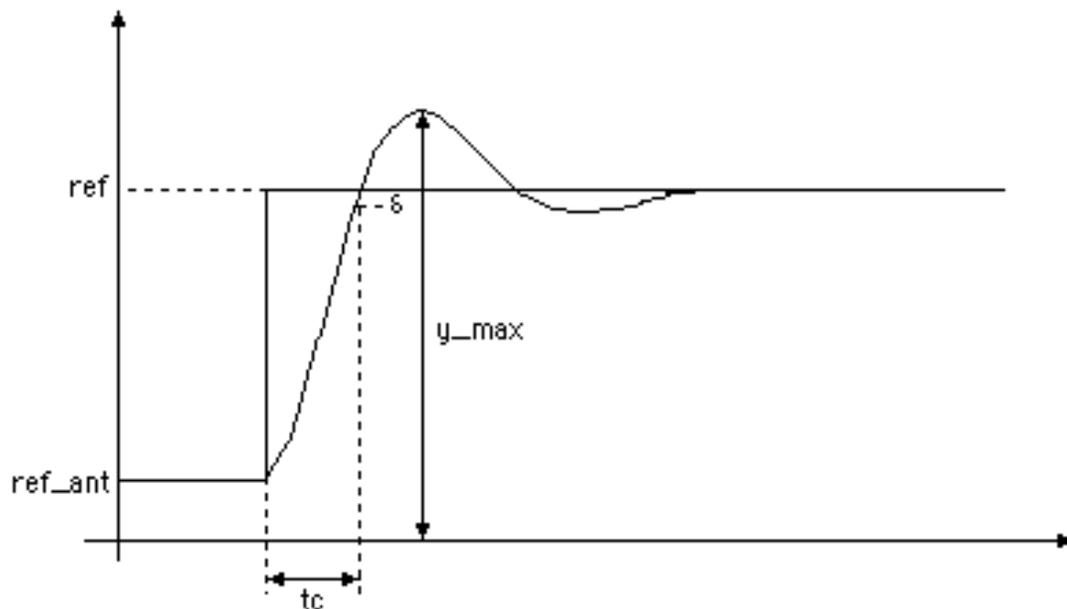


Figure 4.17: Cálculo das características da resposta

igualmente (restrição de simetria)

$$\bar{V}_{Px} = -\bar{V}_{Nx},$$

- A função do termo linguístico **Zero (ZE)** deve estar sempre centrada em 0

$$\bar{V}_{ZE} = 0,$$

- Para manter a consistência, os centros das funções associadas a **Positivo Grande (PG)**, **Positivo Médio (PM)** e **Positivo Pequeno (PP)** devem obedecer a:

$$\bar{V}_{PG} \geq \bar{V}_{PM} \geq \bar{V}_{PP} \geq \bar{V}_{ZE}.$$

Estas restrições têm como objectivo efectuar mudanças “naturais”, preservando o significado linguístico das regras e mantendo estreita relação com as acções do operador.

Nos exemplos apresentados nesta secção, as entradas do supervisor são (ver Figura 4.17) a sobrelevação ($S\%$), calculada como no SPI e dada por

$$S\% = 100 \frac{y_{max} - y_{final}}{ref - ref_{ant}}$$

e o tempo de crescimento ($t_c\%$), aproximado pelo intervalo de tempo que a saída leva a atingir a nova referência (mais precisamente quando atinge a referência com um erro menor que δ). Este valor é percentual, por comparação com uma estimativa prévia do tempo de crescimento desejado para o sistema.

Para a escolha dos instantes de actuação do supervisor, várias opções foram consideradas:

1. Instante de supervisão constante e superior pelo menos dez vezes ao intervalo de amostragem.
2. Instante de supervisão variável, relacionado com as modificações na referência.
3. Instante de supervisão variável, depois de a saída estabilizar.

A última das opções foi a escolhida, por ser a que está mais directamente relacionada com os instantes em que fica disponível nova informação, sobre as características da resposta temporal.

Em cada instante de actuação do supervisor são calculados os valores das características de entrada ($S\%$ e $t_c\%$) bem como o conjunto das regras mais importantes, durante o intervalo considerado. Baseado nestes valores, o supervisor decide qual a alteração a fazer nos valores centrais das funções de pertença da actuação. A amplitude da modificação é dependente desses valores e de um parâmetro que faz variar a velocidade de adaptação (ϵ). As leis de variação implementadas para incremento ou decremento do valor central das funções de pertença foram respectivamente

$$\bar{V}_{xx} = \bar{V}_{xx}(1 + \epsilon.S\%)$$

e

$$\bar{V}_{xx} = \bar{V}_{xx}(1 - \epsilon^2.t_c\%)$$

Outra alternativa para essas leis de variação seria

$$\bar{V}_{xx} = \bar{V}_{xx}K_{xx}$$

com

$$K_{xx} = K_{xx} + \epsilon \cdot S\%$$

$$K_{xx} = K_{xx} - \epsilon^2 \cdot t_c\%$$

respectivamente. Esta última alternativa foi abandonada por conduzir, experimentalmente, aos mesmos resultados que a anterior. Apresenta no entanto a vantagem de se ver claramente que uma modificação em \bar{V}_{xx} produz uma modificação no ganho total do controlador.

Estas modificações cumprem as restrições enunciadas anteriormente. O valor de ϵ é importante, porque permite resolver o compromisso entre a velocidade de convergência e a oscilação na convergência. Valores elevados de ϵ provocam uma convergência que tenta ser rápida mas que pode apresentar oscilações. Valores baixos de ϵ não provocam oscilações mas conduzem a uma convergência lenta.

4.3.2 Resultados com o SAD

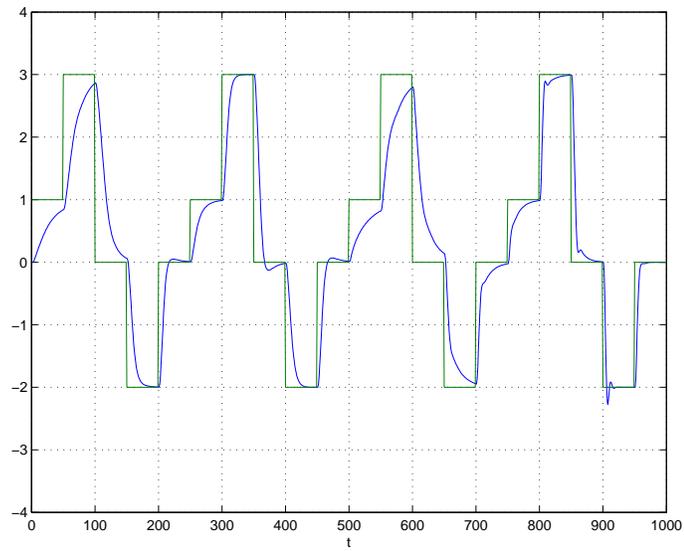
Em seguida apresentam-se os resultados obtidos na aplicação do SAD aos sistemas descritos no Apêndice B.

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	δ	ϵ	t_c estimado
1.0	0.5	0.3	0.0	0.05	0.35	10

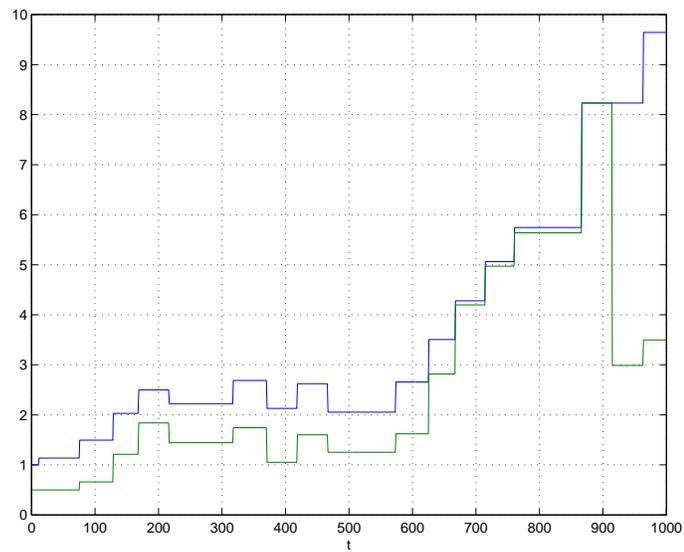
Table 4.6: Parâmetros de configuração do SAD, na aplicação ao Sistema 1.

Na aplicação ao Sistema 1 (sistema estável, de fase mínima, com uma mudança brusca na dinâmica), a cadeia de controlo incorporando o controlador difuso é igual à descrita no Capítulo 3 e os parâmetros iniciais de configuração do SAD encontram-se na Tabela 4.6.

Na Figura 4.18 apresentam-se os resultados da supervisão do Sistema 1 com $\epsilon = 0.35$. Na Figura 4.18 a) representa-se a referência e a saída e em b) representam-se os valores de \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM} . De notar que estes valores, inicialmente incorrectos, são afinados devido ao funcionamento do SAD, o que conduz à melhoria do desempenho do sistema. No instante de simulação 500 o sistema sofre uma mudança na dinâmica continuando activo o processo de afinação, agora para novos valores de \bar{V}_{xx} . Com a mudança na dinâmica o



a) saída e referência



b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.18: Resultados do SAD aplicado ao SISTEMA 1, com $\epsilon = 0.35$

ganho estático do sistema diminuiu (de 0.24 para 0.124) e conseqüentemente os valores de \bar{V}_{xx} devem aumentar, o que é confirmado nos resultados obtidos. No final da simulação, e depois do processo de adaptação concluído, tem-se novamente um bom desempenho do sistema como era desejado.

Na Figura 4.19 representam-se os resultados obtidos com o mesmo sistema, mas com o parâmetro de adaptação ϵ igual a 0.25. Confirma-se pois que, a menores valores de ϵ correspondem menores oscilações de \bar{V}_{xx} (ver Figura 4.19 b)), sem que haja diferenças significativas no desempenho dos controladores.

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	δ	ϵ	t_c estimado
0.3	0.2	0.1	0.0	0.05	0.25	15

Table 4.7: Parâmetros de configuração do SAD, na aplicação ao Sistema 2.

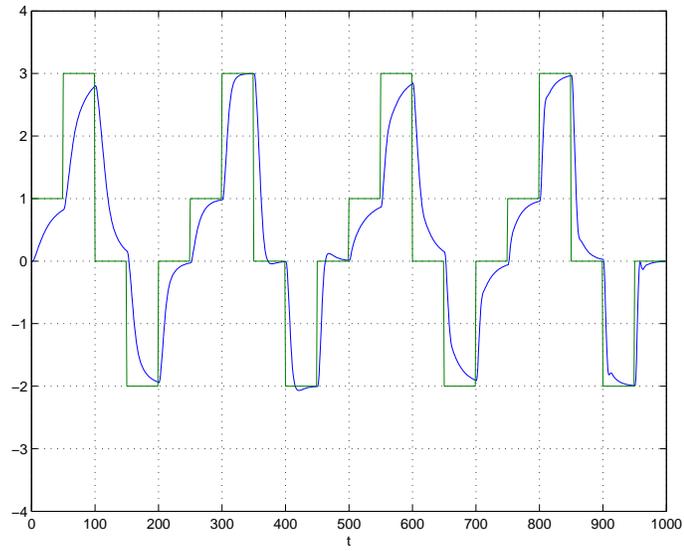
Na aplicação ao Sistema 2 (sistema de fase não mínima), a cadeia de controlo incorporando o controlador difuso é também igual à descrita no Capítulo 3 e os parâmetros iniciais de configuração do SAD encontram-se na Tabela 4.7.

Os resultados da simulação apresentam-se na Figura 4.20. A saída e a referência encontram-se na Figura 4.20 a) e os valores de \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM} em b).

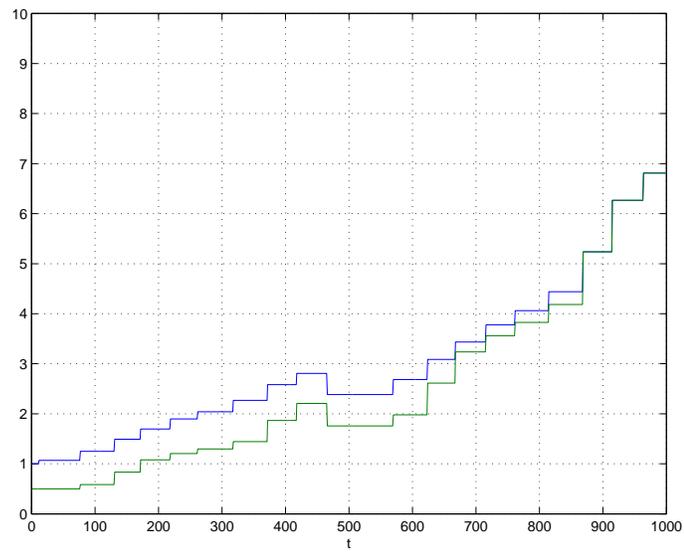
Na resposta do sistema pode observar-se o comportamento típico de um sistema de fase não mínima. Quando a referência muda, a saída varia inicialmente em direcção contrária e só depois tende para o valor da referência. Este comportamento, ainda que inicialmente com \bar{V}_{xx} incorrectos, não influencia o desempenho do sistema depois de afinado.

Como este sistema tem um ganho estático de posição (6.6) muito superior ao do Sistema 1 (0.24 ou 0.124) escolheram-se os valores iniciais de \bar{V}_{xx} para valores muito menores que os escolhidos para o Sistema 1.

Na Figura 4.23 apresentam-se os resultados da aplicação do SAD ao Sistema 3 (sistema piloto, para controlo de nível de água num tanque). Neste caso a cadeia de controlo é semelhante à do Capítulo 3, diferindo nas funções que descrevem os termos linguísticos associados às variáveis de entrada $e(t)$ e $\Delta e(t)$, apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22, respectivamente.



a) saída e referência

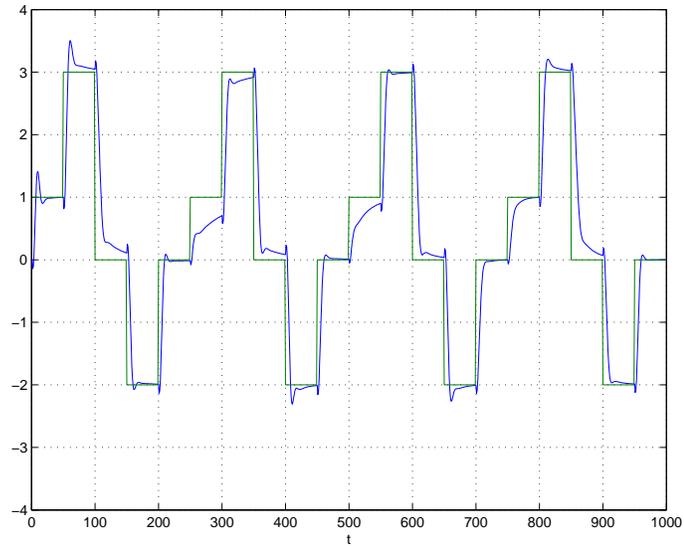


b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

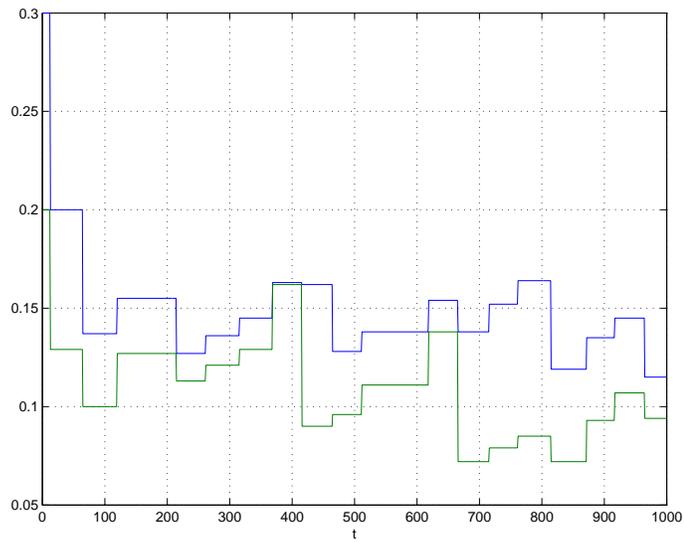
Figure 4.19: Resultados do SAD aplicado ao Sistema 1, com $\epsilon = 0.25$

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	δ	ϵ	t_c estimado
8.0	5.0	3.0	0.0	0.05	0.25	5

Table 4.8: Parâmetros de configuração do SAD, na aplicação ao Sistema 3.



a) saída e referência



b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.20: Resultados do SAD aplicado ao Sistema 2

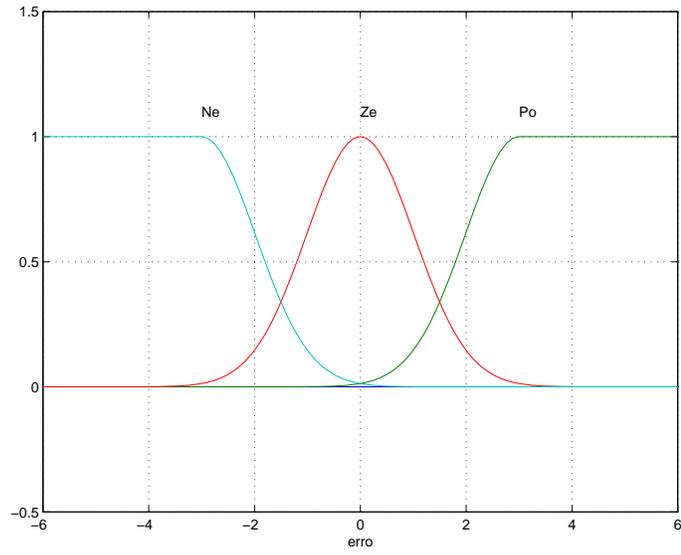


Figure 4.21: Funções de pertença de $e(t)$ na aplicação do SAD ao Sistema 3

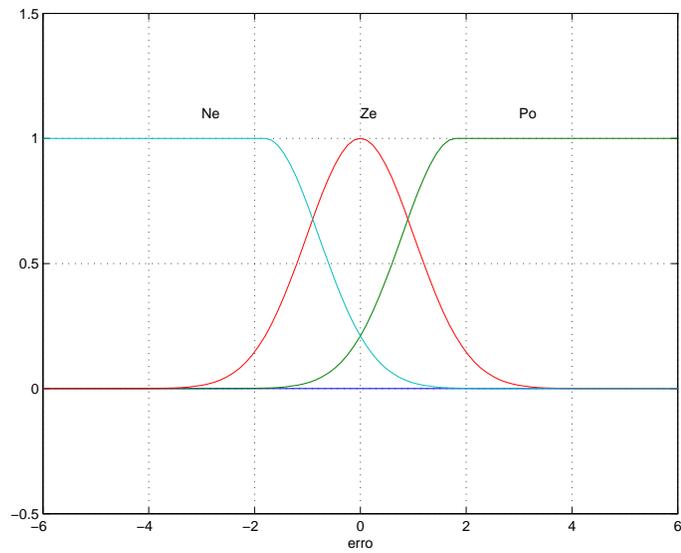
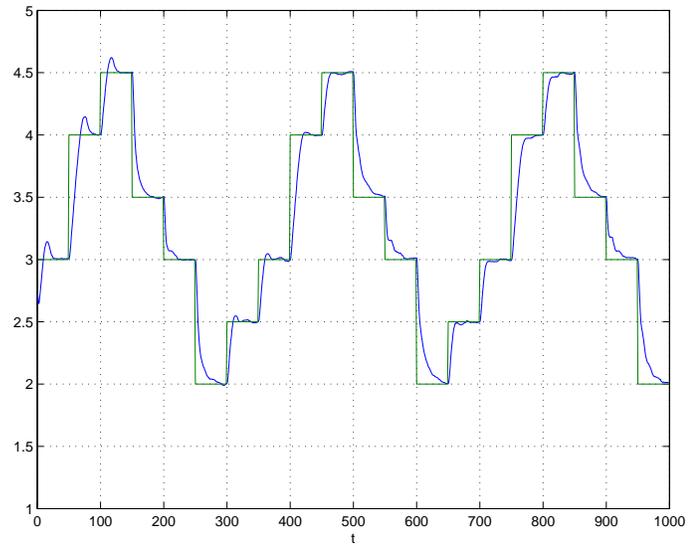
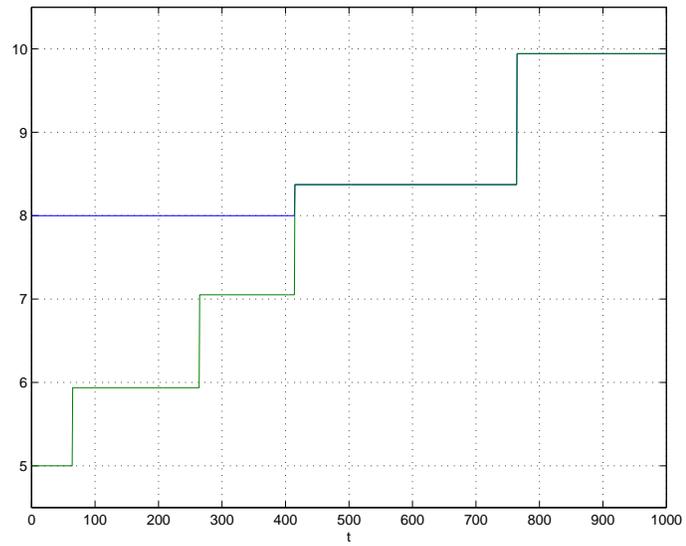


Figure 4.22: Funções de pertença de $\Delta e(t)$ na aplicação do SAD ao Sistema 3



a) saída e referência



b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.23: Resultados do SAD aplicado ao Sistema 3

Os parâmetros iniciais de configuração do SAD encontram-se na Tabela 4.8.

4.3.3 Comentários

Nas várias experiências efectuadas as características da resposta temporal utilizadas como entradas no SAD foram as mesmas (sobreelevação e tempo de crescimento). Isto deve-se ao facto de se pretender, em geral, que o sistema apresente sobreelevação nula com o menor tempo de crescimento possível. Outras características poderiam ter sido utilizadas, se outros critérios fossem seguidos. Por exemplo, pretendendo-se erro estático de posição nulo e a menor actividade possível no controlo, poderiam ser utilizados, em cada período, o somatório dos erros estáticos e a actividade no controlo calculada utilizando

$$act = \sum |u(t) - u(t - 1)|.$$

O protocolo utilizado também foi sempre o mesmo, uma vez que as características dos sistemas a controlar são semelhantes. Se estes tivessem atraso significativo ou outras características diferentes, o protocolo seria diferente, mas o supervisor manter-se-ia.

Os problemas antes enunciados em relação aos sistemas reais, onde não se pode tolerar sobreelevação e onde não são desejáveis oscilações no desempenho do sistema, levam a que se devam escolher valores pequenos para ϵ .

Da observação dos resultados obtidos, confirma-se a dependência do ganho do controlador relativamente aos valores de \bar{V}_{xx} . Esta relação não sendo linear e devido à forma de *passagem a um número* (*defuzzification* pelo método do centro de massa, faz com que o ganho seja menor que \bar{V}_{PG} . Não é pois de estranhar que a utilização de $\bar{V}_{PG} = 8$, no caso de aplicação ao Sistema 3, não provocasse a saturação no controlo (em 5 Volts) durante longos períodos.

Dos resultados obtidos e dos comentários anteriores pode pois concluir-se também da melhoria ao longo do tempo no desempenho do controlador, quando provido com esta estratégia de supervisão (SAD).

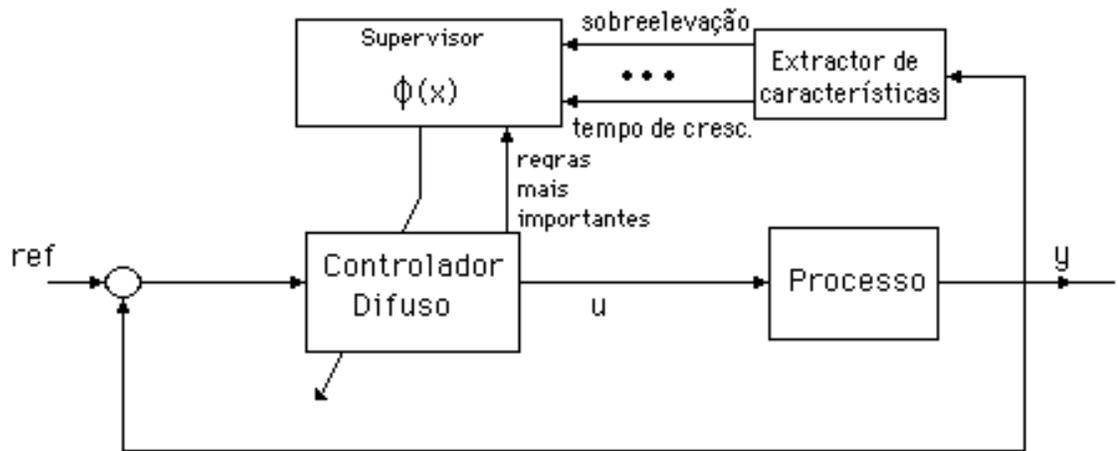


Figure 4.24: Arquitectura do controlador e do supervisor difuso SDD

4.4 Supervisão Difusa de um Controlador Difuso – SDD

4.4.1 Estrutura do SDD

Nesta secção apresenta-se a arquitectura para um supervisor difuso de um controlador difuso – **SDD**, esquematicamente representado na Figura 4.24.

Esta arquitectura, também constituída por duas cadeias distintas, pretende ter na cadeia de supervisão a mesma funcionalidade que o supervisor apresentado na secção anterior (SAD). A cadeia de controlo, incorporando o controlador e o sistema a controlar (de baixo nível) é igual à descrita no capítulo anterior. Apresenta-se seguidamente a implementação do SAD, com um supervisor difuso.

As entradas no SDD são a sobreelevação, o tempo de crescimento e o conjunto de regras mais importantes durante o intervalo de tempo considerado, as quais são as mesmas que as utilizadas no SAD. A actuação faz-se modificando as funções de pertença que descrevem os termos linguísticos da variável de actuação, dessas mesmas regras (ver figura 4.16).

As restrições, relativas a simetria e consistência, e enunciadas na secção anterior mantêm-se e são cumpridas devido à actuação do SDD.

Nos exemplos apresentados nesta secção, as entradas do supervisor são (ver figura 4.25)

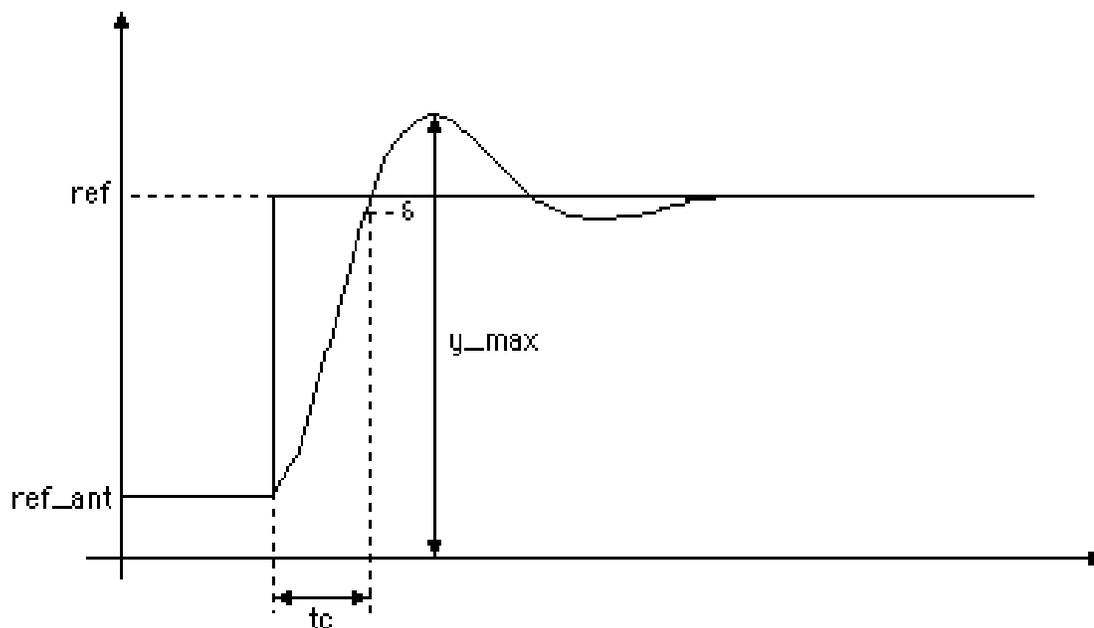


Figure 4.25: Cálculo das características da resposta

a sobrelevação ($S\%$), dada por

$$S\% = 100 \frac{y_{max} - y_{final}}{ref - ref_{ant}}$$

e o erro no tempo de crescimento ($et_c\%$), dado por

$$et_c\% = 100 \left(\frac{t_c}{t_{cestimado}} - 1 \right)$$

Este valor é um erro percentual, por comparação com uma estimativa prévia do tempo de crescimento desejado para o sistema.

A filosofia de escolha do instante de supervisão é a mesma que na secção anterior, ou seja, dado por um determinado tempo (tipicamente alguns períodos de amostragem) depois da saída estabilizar. Considera-se que a saída estabilizou a partir do momento em que a regra central do protocolo de controlo (erro nulo e variação no erro nula) passa a ser a mais importante.

Em cada instante de actuação do supervisor, são calculados os valores das características

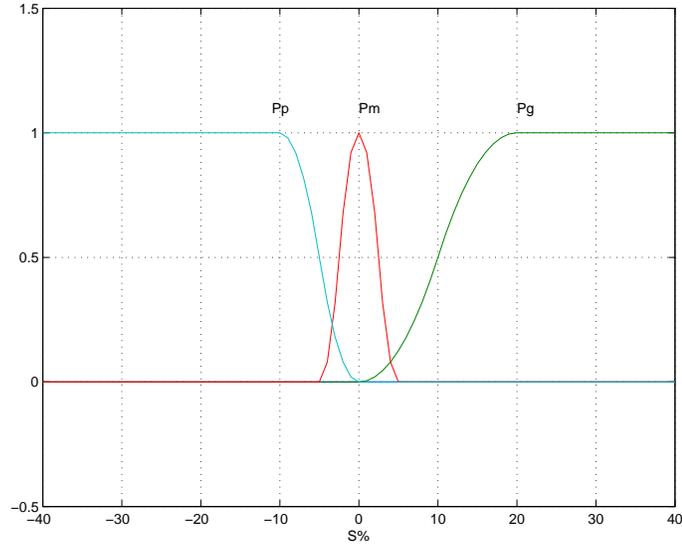


Figure 4.26: Funções de pertinência associadas à $S\%$

		$et_c\%$		
		Pg	Pm	Pp
$S\%$	Pg	PPs	NMs	NGs
	Pm	PMs	ZEs	NMs
	Pp	PGs	PMs	NPg

Table 4.9: Protocolo de variação de $\bar{V}_{xx} - \Delta\bar{V}$

de entrada ($S\%$ e $et_c\%$) e o conjunto das regras mais importantes, durante o intervalo a considerar.

Os valores de $S\%$ e de $et_c\%$ são quantificados com o auxílio das funções de pertinência que se apresentam nas Figuras 4.26 e 4.27, respectivamente.

Em seguida, baseado no protocolo da Tabela 4.9, calcula-se o valor da variação ($\Delta\bar{V}$) a introduzir nos valores centrais das funções de pertinência das regras mais importantes (\bar{V}_{xx}). Os novos valores de \bar{V}_{xx} são finalmente calculados como

$$\bar{V}_{xx} = \bar{V}_{xx}(1 + \Delta\bar{V}),$$

mantendo-se as restrições antes enunciadas

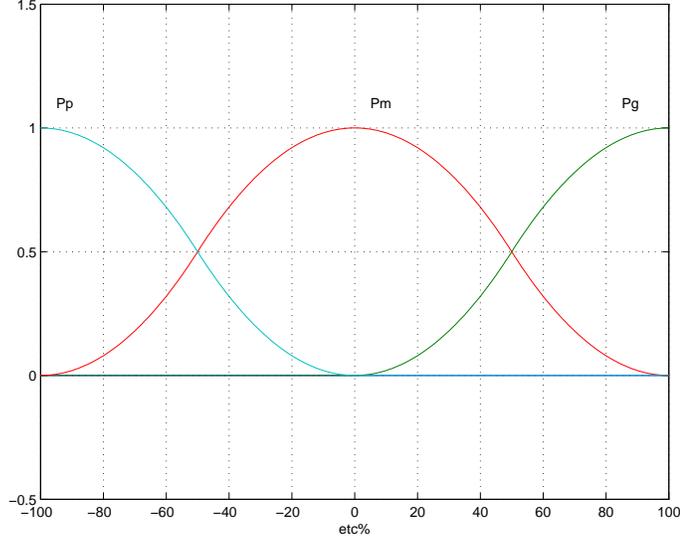


Figure 4.27: Funções de pertinência associadas ao $et_c\%$

- $\bar{V}_{Px} = -\bar{V}_{Nx}$.
- $\bar{V}_{ZE} = 0$.
- $\bar{V}_{PG} \geq \bar{V}_{PM} \geq \bar{V}_{PP} \geq \bar{V}_{ZE}$.

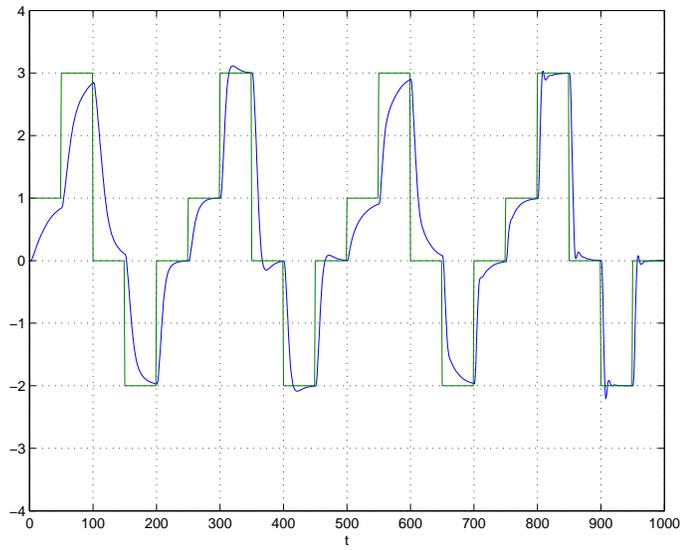
A amplitude da variação está relacionada com a amplitude dos valores centrais das funções de pertinência de $\Delta\bar{V}$ do supervisor \bar{V}_{xzs} , valores estes que provocam um fenómeno equivalente ao associado ao parâmetro ϵ no SAD.

4.4.2 Resultados com o SDD

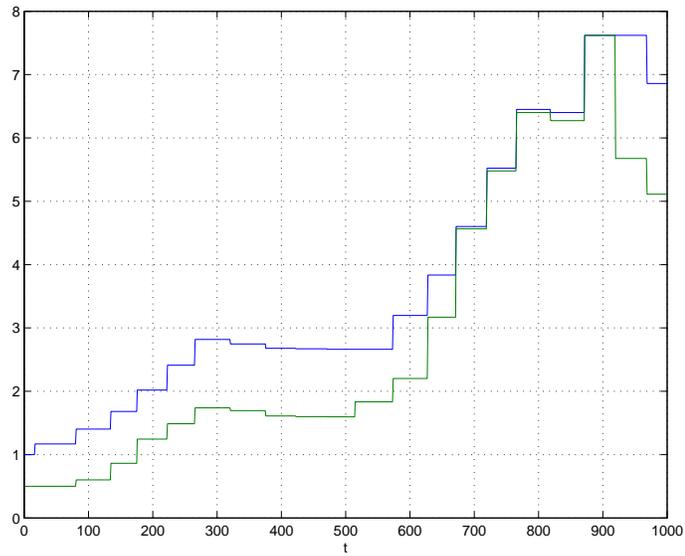
Apresentam-se em seguida os resultados obtidos na aplicação do SDD aos sistemas descritos no Apêndice B, em que se pode constatar a semelhança com os resultados apresentados na secção anterior.

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	\bar{V}_{PGs}	\bar{V}_{PMs}	\bar{V}_{PPs}	\bar{V}_{ZEs}	δ	t_c estimado
1.0	0.5	0.3	0.0	0.20	0.10	0.05	0.0	0.05	10

Table 4.10: Parâmetros de configuração do SDD, na aplicação ao Sistema 1.



a) saída e referência



b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.28: Resultados do SDD aplicado ao Sistema 1

Na Figura 4.28 apresentam-se os resultados obtidos na aplicação ao Sistema 1. Os parâmetros iniciais de configuração do SDD encontram-se na Tabela 4.10. Na Figura 4.28 a) apresenta-se a referência e a saída e em b) representam-se os valores de \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM} . De notar que também neste caso e apesar da mudança na dinâmica, o desempenho é melhorado ao longo do tempo, devido á actividade do supervisor.

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	\bar{V}_{PGs}	\bar{V}_{PMs}	\bar{V}_{PPs}	\bar{V}_{ZEs}	δ	t_c estimado
0.3	0.2	0.2	0.0	0.20	0.10	0.05	0.0	0.05	15

Table 4.11: Parâmetros de configuração do SDD, na aplicação ao Sistema 2.

Os resultados da aplicação ao Sistema 2 (sistema de fase não mínima) estão representados na Figura 4.29, nomeadamente a saída e a referência em a) e os valores de \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM} em b). Os parâmetros iniciais de configuração do SDD encontram-se na Tabela 4.11.

Dos resultados obtidos conclui-se também que o comportamento do sistema de fase não mínima não influencia o desempenho do sistema depois de afinado.

Na Figura 4.30 apresentam-se os resultados da aplicação do SDD ao Sistema 3. Os parâmetros iniciais de configuração do SDD encontram-se na Tabela 4.12.

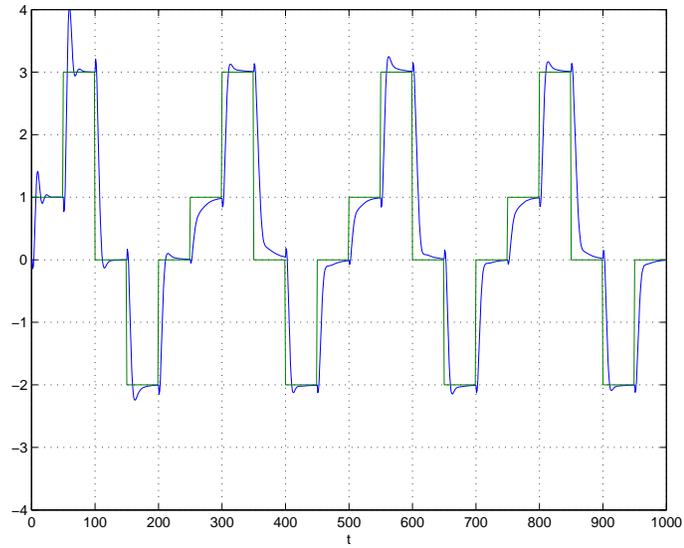
4.4.3 Comentários

Dos resultados obtidos com o SDD pode verificar-se que foi conseguida a mesma funcionalidade que tinha o SAD. Assim, resultados semelhantes foram obtidos, embora no primeiro caso devido a um algoritmo e no segundo fazendo uso de um supervisor baseado na lógica difusa.

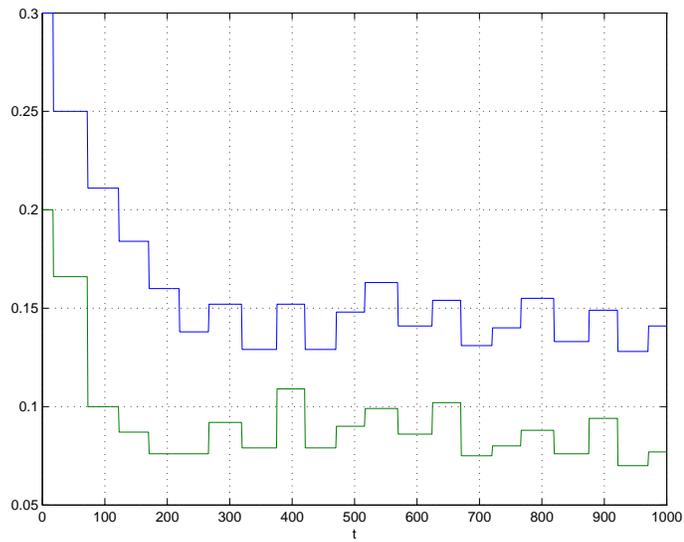
O SDD apresenta como vantagem a facilidade de incorporação no supervisor do procedimento de afinação, quer seja o conhecimento adquirido pela construção do algoritmo SAD, quer seja com base no conhecimento de operadores humanos.

\bar{V}_{PG}	\bar{V}_{PM}	\bar{V}_{PP}	\bar{V}_{ZE}	\bar{V}_{PGs}	\bar{V}_{PMs}	\bar{V}_{PPs}	\bar{V}_{ZEs}	δ	t_c estimado
8.0	5.0	3.0	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0	0.05	5

Table 4.12: Parâmetros de configuração do SDD, na aplicação ao Sistema 3.

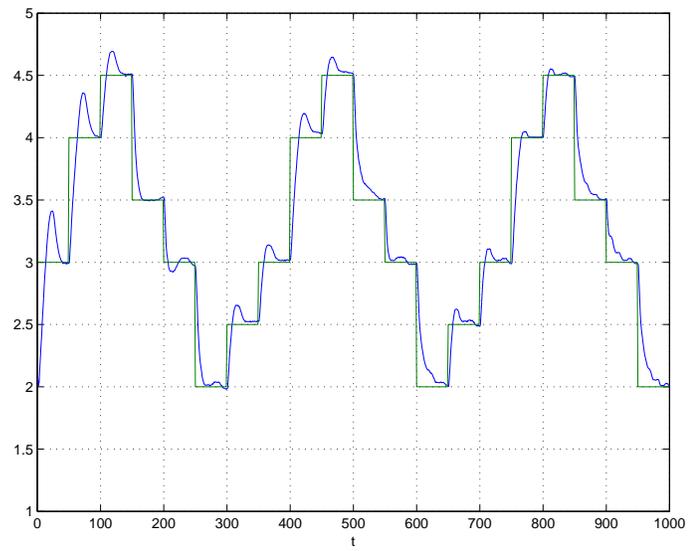


a) saída e referência

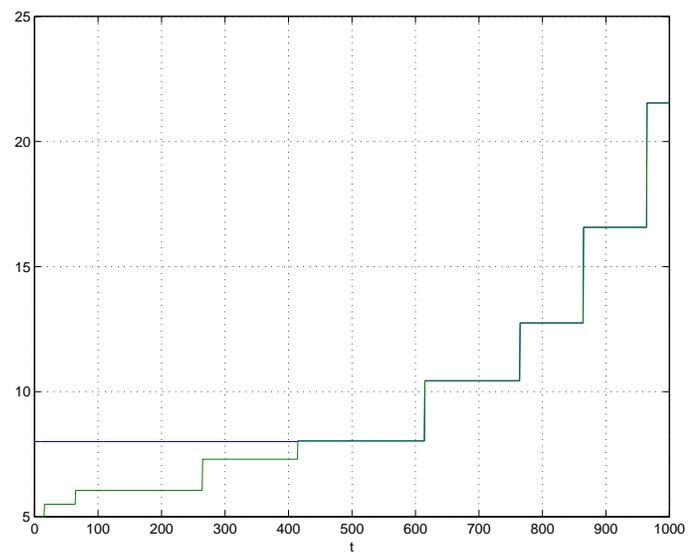


b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.29: Resultados do SDD aplicado ao Sistema 2



a) saída e referência



b) Centros das funções de pertinência \bar{V}_{PG} e \bar{V}_{PM}

Figure 4.30: Resultados do SDD aplicado ao Sistema 3

Os cuidados referidos, na secção anterior, em relação à escolha do tempo de crescimento desejado, mantêm-se e os respeitantes ao parâmetro ϵ do SAD dizem agora respeito aos valores de \bar{V}_{xss} . Note-se que são estes últimos que determinam a amplitude da variação ou mais precisamente o valor de $\Delta\bar{V}$.

Dos resultados obtidos, e à semelhança do SAD, pode pois concluir-se da melhoria no desempenho do controlador quando provido desta estratégia de supervisão (SDD).

Chapter 5

Conclusões

5.1 Comentários aos Resultados Obtidos

A supervisão de processos tem em vista a automatização das tarefas de operação de processos e supervisão de controladores, até agora efectuadas por operadores humanos.

Os sistemas periciais permitem efectuar essa substituição, tendo sido apresentada a arquitectura de um sistema pericial para aplicação à operação, tendo em conta a interacção com o processo a funcionar em tempo real.

No que diz respeito à supervisão de controladores, a lógica difusa tem vantagens, devido à forma como capta o conhecimento humano, a qual ficou demonstrada com os resultados obtidos.

Um controlador difuso pode ser implantado de duas formas distintas: como controlador digital directo ou como supervisor de controladores.

A equivalência entre os controladores digitais directos baseados em controladores difusos e em controladores PI, leva a uma melhor compreensão do bom funcionamento dos controladores difusos. Nos casos em que não é possível utilizar PIs como controladores de processos, ou porque é necessário incorporar conhecimento humano ou porque as variáveis de entrada acessíveis são qualitativas, é promissora a utilização de controladores difusos.

Os resultados obtidos na supervisão de um controlador PI, um dos mais utilizados no controlo de processos industriais, confirmam as vantagens em efectuar a supervisão

com base em características do processo e em controladores difusos. Na aplicação de um supervisor a controladores PI industriais é aconselhável uma fase prévia de aquisição do conhecimento dos operadores de processos, ou caso este não esteja disponível, obtê-lo por simulação, o mais fiel possível, do comportamento do processo face a variações nos parâmetros do controlador. No entanto, nos exemplos apresentados foram obtidos resultados semelhantes, utilizando o mesmo protocolo nos três casos. O conhecimento deve depois ser incorporado associando funções de pertença conservadoras às variáveis de actuação, para evitar oscilações indesejáveis no desempenho do processo.

No caso da supervisão de controladores difusos a incorporação do conhecimento do operador humano começa a ser feita ao nível do controlador digital directo. A supervisão, com uma função semelhante à do engenheiro de processos, só vai modificar a influência de cada regra, por forma a obter os melhores resultados. Também neste caso a amplitude de variação deve ser escolhida de uma forma conservativa.

A facilidade de captar o conhecimento humano, por parte da lógica difusa, ficou bem demonstrada nos casos descritos ao longo desta tese, nomeadamente:

- na síntese de um controlador difuso directo.
- na incorporação da informação obtida por simulação de variações nos parâmetros de um controlador PI.
- na incorporação do algoritmo de supervisão utilizado na SAD (supervisor algorítmico de um controlador difuso) num supervisor difuso utilizado no SDD (supervisor difuso de um controlador difuso).

Além disso é facilmente compreendida a informação representada em tais protocolos e é fácil a alteração destes.

Os sistemas utilizados, dois obtidos por simulação de sistemas de segunda ordem e o outro constituído por um processo piloto, à escala, embora sendo sistemas com uma complexidade reduzida, foram usados tendo em vista a validação das arquitecturas de supervisão propostas. No futuro será interessante aplicar estas ferramentas a sistemas mais complexos.

Os resultados obtidos na supervisão de controladores PI e difusos, não deixam no entanto quaisquer dúvidas em relação à substituição eficaz do operador humano por um processo automático.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

O conhecimento do comportamento, no que respeita à estabilidade e à convergência, da cadeia de controlo incorporando um controlador difuso está ainda muito incompleto e o da cadeia de supervisão de controladores é totalmente desconhecido, sendo no entanto imprescindível para a síntese correcta de controladores/supervisores óptimos. Tal estudo poderá ser feito utilizando ferramentas para análise de sistemas não lineares, como por exemplo o segundo método de Lyapunov.

A supervisão de processos restringiu-se à apresentação de metodologias de abordagem do problema a sistemas simples. Falta a concretização, com casos práticos e o estudo da mesma, por forma a garantir-se o desempenho conveniente, em ambientes mais realistas.

Appendix A

Fundamentos de Controlo Difuso

A área denominada por Controlo Difuso¹ suporta-se num conjunto de conceitos oriundos da Lógica Difusa, inicialmente formalizada por Zadeh em 1963 [37]. Neste anexo introduzem-se alguns desses conceitos e refere-se a sua aplicação a problemas de controlo [10, 11, 12].

A.1 Fundamentos de Lógica Difusa

A lógica difusa pode entender-se como uma extensão à lógica binária clássica, em que a noção de conjunto deixa de ter um carácter rígido.

Na lógica clássica, os elementos x de um universo \mathcal{U} são ou não membros de um conjunto A . Esta relação pode ser representada por uma função característica,

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

que faz corresponder a cada elemento x do universo \mathcal{U} um valor no conjunto $\{0, 1\}$,

$$\mu_A(x) : \mathcal{U} \rightarrow \{0, 1\}. \quad (\text{A.2})$$

São conhecidas as propriedades da lógica clássica e dos conjuntos assim definidos. Na lógica difusa, a diferença básica reside na função característica, que é substituída por uma **função de pertença**:

¹Fuzzy Control na denominação anglo-saxónica.

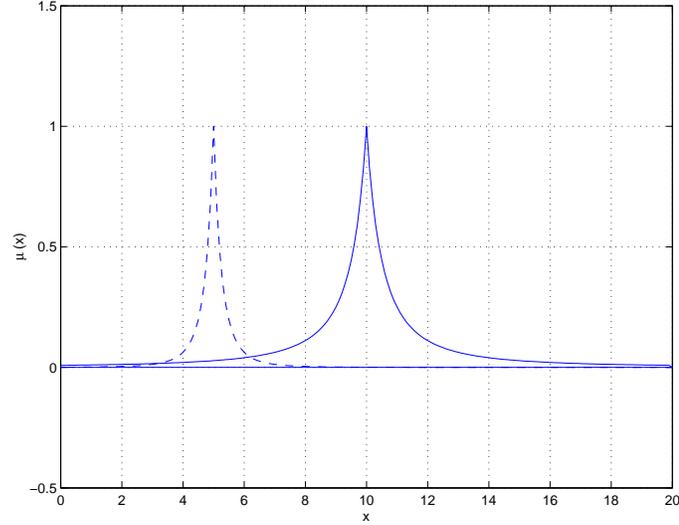


Figure A.1: Funções de pertença obtidas com a fórmula A.4. A função a traço contínuo foi obtida com $a = 1$, $\alpha = 2.0$ e $x_0 = 10.0$. A função a traço descontinuo foi obtida com $a = 1$, $\alpha = 4.0$ e $x_0 = 5.0$.

$$\mu_A(x) : \mathcal{U} \rightarrow [0, 1] \quad (\text{A.3})$$

Nos conjuntos difusos não existe a noção rígida de membro. Um elemento x , do universo \mathcal{U} , tem como grau de pertença a um conjunto difuso um valor no intervalo $[0, 1]$.

Na lógica difusa, as funções de pertença podem ser definidas de duas formas:

- Explicitando uma função geral, que para cada elemento x do universo, fornece o grau de pertença.

Exemplos:

(i)

$$\mu(x) = \left(\frac{a}{|x - x_0| + a} \right)^\alpha \quad (\text{A.4})$$

(ii)

$$\mu(x) = \beta^{-\frac{|x-x_0|}{a}} \quad (\text{A.5})$$

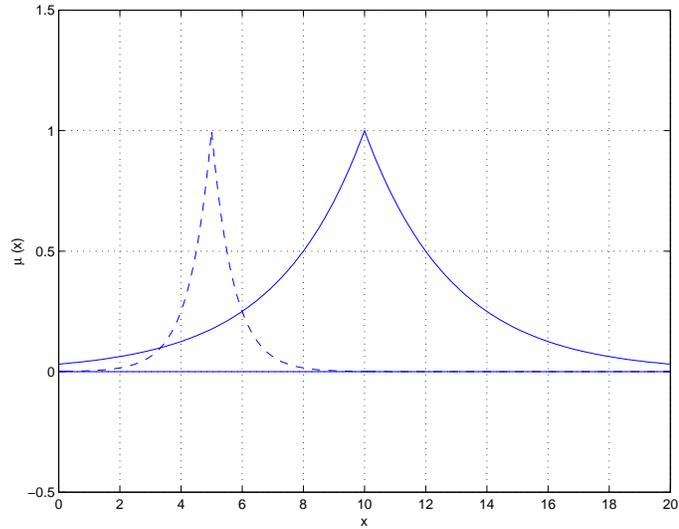


Figure A.2: Funções de pertinência obtidas com a fórmula A.5. A função a traço contínuo foi obtida com $\beta = 2.0$, $x_0 = 10.0$ e $a = 2.0$. A função a traço descontínuo foi obtida com $\beta = 4.0$, $x_0 = 5.0$ e $a = 1.0$.

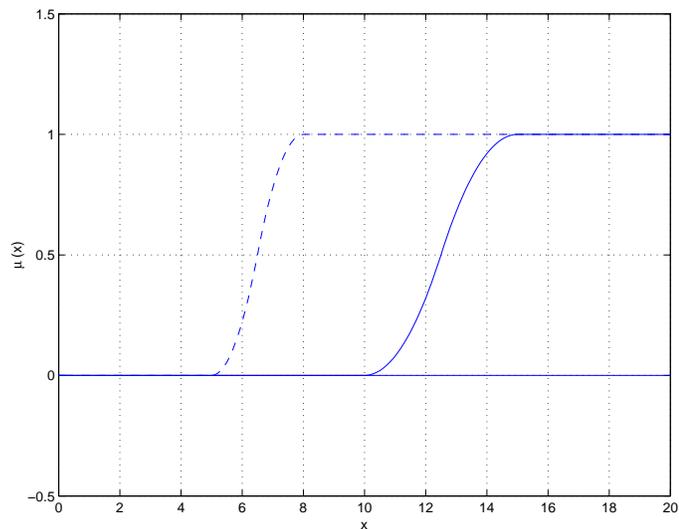


Figure A.3: Funções de pertinência obtidas com a fórmula A.6. A função a traço contínuo foi obtida com $\alpha = 10.0$ e $\gamma = 15.0$. A função a traço descontínuo foi obtida com $\alpha = 5.0$ e $\gamma = 8.0$.

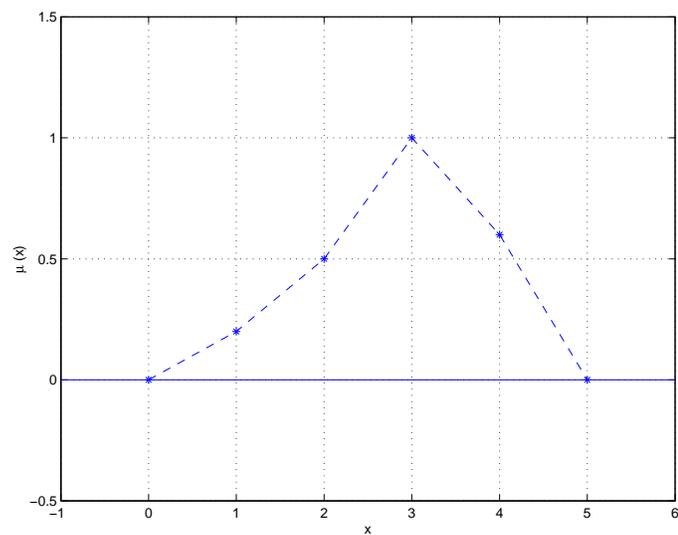


Figure A.4: Função de pertença obtida por enumeração dos seus elementos e do respectivo valor de pertença (A.4). Os asteriscos correspondem aos pontos enumerados e traço descontínuo representa-se a interpolação linear que permite a obtenção do grau de pertença de valores não enumerados .

(iii)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq \alpha \\ 2 \left(\frac{x-\alpha}{\gamma-\alpha} \right)^2 & \text{se } \alpha < x \leq \frac{\alpha+\gamma}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{x-\gamma}{\gamma-\alpha} \right)^2 & \text{se } \frac{\alpha+\gamma}{2} < x \leq \gamma \\ 1 & \text{se } x \geq \gamma \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Estas funções de pertença encontram-se representadas nas Figuras A.1, A.2 e A.3, respectivamente.

- Enumerando os elementos do universo \mathcal{U} conjuntamente com os graus de pertença.

Exemplo:

$$\mu(x) = \{(0, 0), (1, 0.2), (2, 0.5), (3, 1.0), (4, 0.6), (5, 0)\} \quad (\text{A.7})$$

em que os elementos nos pares ordenados são respectivamente os elementos do universo \mathcal{U} e os seus graus de pertença. Esta função encontra-se representada na Figura A.4. Para os elementos não enumerados, o grau de pertença pode ser obtido pela interpolação dos elementos mais próximos, conhecidos (representado a traçejado na figura).

As três operações básicas sobre conjuntos difusos podem ser definidas como:

- O **complementar** de um subconjunto difuso A é um subconjunto difuso, representado por $\neg A$, e cuja função de pertença é dada por

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) , x \in \mathcal{U} \quad (\text{A.8})$$

podendo ser expressa pelo termo linguístico de negação **Não**, aquando da construção das regras linguísticas.

- A **intersecção** dos subconjuntos difusos A e B é um subconjunto difuso, representado por $A \cap B$. A sua função de pertença é dada por

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] , x \in \mathcal{U} \quad (\text{A.9})$$

e pode ser expressa pela conjunção **E**.

- A **união** dos subconjuntos difusos A e B é um subconjunto difuso, representado por $A \cup B$, com uma função de pertença dada por

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] , x \in \mathcal{U} \quad (\text{A.10})$$

que pode ser expressa pelo termo linguístico de reunião **Ou**.

À semelhança da lógica clássica, muitas outras propriedades são conhecidas para a lógica difusa [13], não sendo aqui apresentadas, por não serem relevantes para o que em seguida se descreve.

A.2 Aplicação da Lógica Difusa ao Controlo

Um dos propósitos da lógica difusa é estabelecer um paralelismo entre as proposições da linguagem natural e os conjuntos difusos. Em lógica difusa, o valor lógico das proposições não é apenas verdadeiro (1) ou falso (0), mas pode ser qualquer valor no intervalo $[0, 1]$ traduzindo um certo grau de verdade. Para que esse paralelismo possa ser estabelecido, há que atribuir aos termos linguísticos das frases um subconjunto difuso (ver Figura A.5). Além disso, para melhor captar o significado das proposições, os qualificativos existentes nas mesmas também podem ser entendidos como operações sobre conjuntos difusos (ver Figura A.6).

Um controlador difuso é constituído por um grupo de regras, expressas na forma de frases condicionais:

Se

$$V_1 \text{ é } T_1$$

E

$$V_2 \text{ é } T_2$$

Então

$$V_o \text{ é } T_o$$

onde

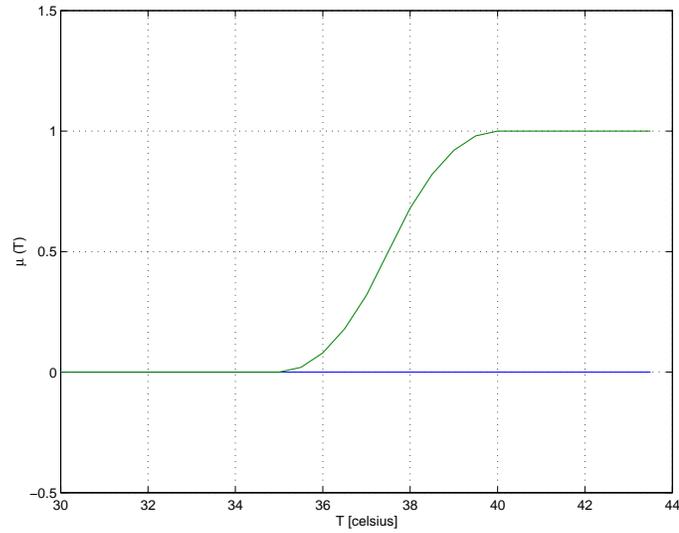


Figure A.5: Representação da proposição **Temperatura é alta**, onde 'alta' pode ser entendida como um subconjunto difuso, no universo das temperaturas.

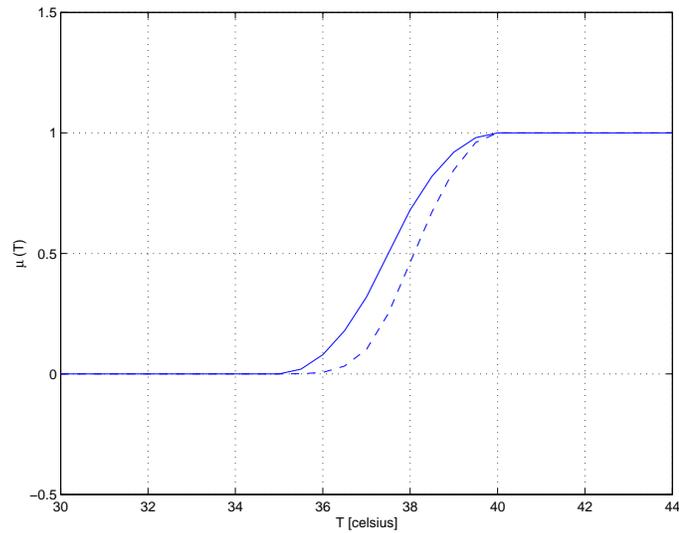


Figure A.6: Representação das proposições **Temperatura é alta** e **Temperatura é muito alta** (a tracejado), onde 'muito' transforma o grau de pertinência do subconjunto difuso 'alta' no universo das temperaturas.

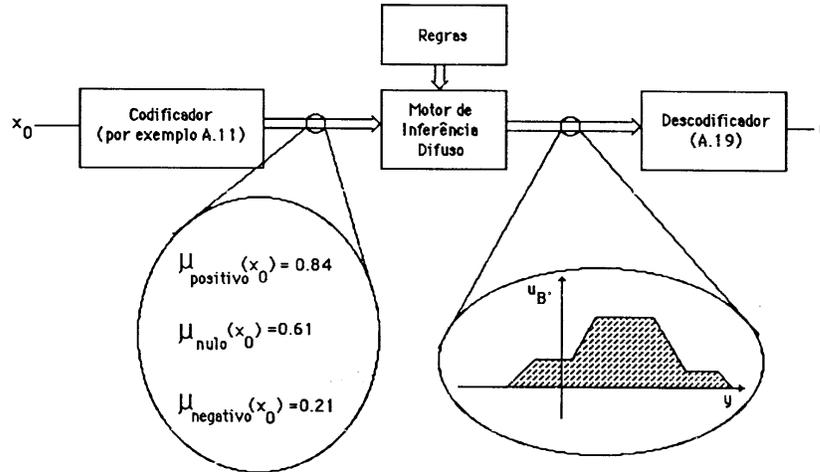


Figure A.7: Componentes de um controlador baseado em lógica difusa.

$V_i, i = 1, 2$ são as variáveis linguísticas das entradas;

$T_i, i = 1, 2$ são os termos linguísticos de V_i ;

V_o e T_o são respectivamente a variável linguística e o termo linguístico associados à saída.

As entradas de um controlador difuso são normalmente variáveis com significado físico (valores dos sensores, valores de variáveis de estado, variações dos valores dos sensores, etc). Para que possam ser utilizadas no processo de inferência difuso, cada entrada (variável linguística) tem de ser codificada como pertencendo a diferentes termos linguísticos (ver Figura A.7).

Em seguida exemplifica-se o uso destas noções. Considere-se a seguinte função de pertença:

$$\mu_{nulo}(erro) = e^{-\frac{|erro|}{2}} \quad \text{em que } erro \text{ é o erro de posição.} \quad (A.11)$$

Se o erro de posição medido fôr por exemplo de uma unidade então o seu grau de pertença ao subconjunto difuso ‘nulo’ é:

$$\mu_{nulo}(1) = e^{-\frac{1}{2}} = 0.61 .$$

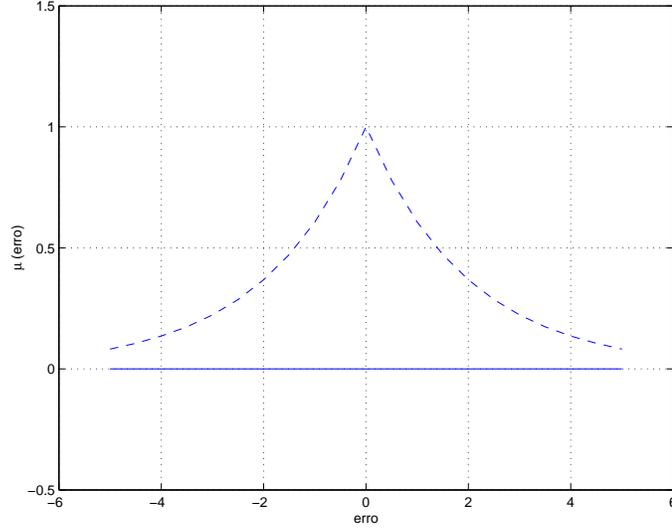


Figure A.8: Função de pertinência ao termo linguístico ‘nulo’ associado à variável linguística ‘erro na posição’

Dados os subconjuntos difusos A do universo \mathcal{U} e B do universo \mathcal{V} , a função de pertinência da relação R , expressa nas regras linguísticas do tipo **Se A Então B** , é definida como:

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)], x \in \mathcal{U}, y \in \mathcal{V} \quad (\text{A.12})$$

A função de pertinência do subconjunto B' , inferido a partir do subconjunto A' pela relação R é dada por

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)] \quad (\text{A.13})$$

por aplicação da regra de composição de inferência (**CRI**) [37].

As entradas dos controladores difusos não são conjuntos difusos, mas sim um subconjunto preciso (*crisp*) singular, $\{x_0\}$. Este conjunto deve ser transformado num subconjunto difuso, para que seja possível efectuar a inferência, através da função de pertinência

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x = x_0 \\ 0 & \text{se } x \neq x_0 \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

onde x_0 é a variável de entrada do controlador. É pois possível simplificar (A.13),

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min \begin{cases} [0, \mu_R(x, y)] & \text{se } x \neq x_0 \\ [1, \mu_R(x, y)] & \text{se } x = x_0 \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min \begin{cases} 0 & \text{se } x \neq x_0 \\ \mu_R(x, y) & \text{se } x = x_0 \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

ficando finalmente

$$\mu_{B'}(y) = \mu_R(x_0, y) = \min[\mu_A(x_0), \mu_B(y)] \quad (\text{A.17})$$

A função de inferência deduzida para uma regra (A.17) tem de ser aplicada ao conjunto das regras que constituem o controlador difuso. O conjunto das regras, também chamado de *protocolo* pode ser entendido como

Regra 1

Ou

Regra 2

Ou

...

Ou

Regra n

pelo que o subconjunto difuso de actuação tem de ser calculado como:

$$\mu_{B'}(y) = \max_r \min[\mu_A(x_0), \mu_B(y)] \quad (\text{A.18})$$

onde r representa o conjunto das regras.

A saída do controlador é um valor preciso, obtido a partir do subconjunto difuso calculado com (A.18) através de um processo de descodificação (*defuzzification*). Existem várias formas possíveis de realizar este processo, como sejam por exemplo o máximo do

subconjunto difuso inferido ou o centro de massa do mesmo. Nos controladores implementados neste trabalho a operação escolhida foi a do cálculo do centro de massa determinado por:

$$u = \frac{\int_r V_{O_r}(y) \mu_{B'}(y) dy}{\int_r \mu_{B'}(y) dy} \quad (\text{A.19})$$

onde $V_{O_r}(y)$ são as diferentes funções de pertinência dos termos linguísticos da variável de actuação e $\mu_{B'}(y)$ é o valor inferido dos antecedentes das regras.

Appendix B

Sistemas Utilizados

Seguidamente descrevem-se três sistemas, dois simulados e um à escala real, utilizados para avaliar as potencialidades dos supervisores no Capítulo 4. Assim, ao longo do texto, os sistemas utilizados nas experiências serão referidos apenas como Sistema 1, Sistema 2 e Sistema 3.

B.1 Sistema 1

O primeiro dos sistemas simulados é estável, de fase mínima e sofre num determinado instante uma mudança brusca na dinâmica. Inicialmente o sistema é descrito pela equação

$$y(t) = 1.06y(t - 1) - 0.22y(t - 2) + 0.0199u(t - 1) + 0.0199u(t - 2) \quad (\text{B.1})$$

com pólos em 0.65 e 0.4 e um zero em -1 . Após a alteração na dinâmica o sistema passa a ser descrito por:

$$y(t) = 0.9y(t - 1) - 0.22y(t - 2) + 0.0199u(t - 1) + 0.0199u(t - 2) \quad (\text{B.2})$$

ficando com dois pólos complexos conjugados em $0.45 \pm 0.14j$ e o zero na mesma localização (ver Figura B.1).

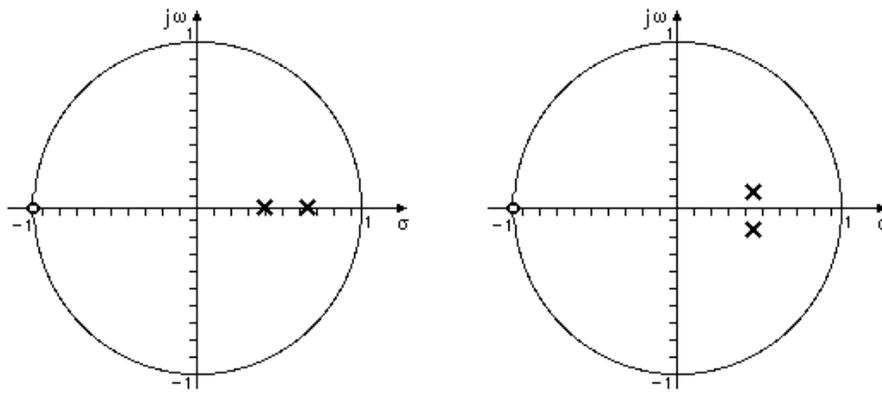


Figure B.1: Lugar geométrico dos pólos do Sistema 1, antes e depois da mudança na dinâmica.

B.2 Sistema 2

O segundo dos sistemas simulados é estável e de fase não mínima. O sistema é descrito pela equação

$$y(t) = 1.2y(t - 1) - 0.35y(t - 2) - u(t - 1) + 2u(t - 2) \quad (\text{B.3})$$

com pólos em 0.7 e 0.5 e um zero em 2.

B.3 Sistema 3

O sistema piloto é constituído por dois tanques acoplados. Este sistema é descrito em [2] e consiste em dois tanques ligados através de um orifício (Figura B.2). O líquido (água) é fornecido por uma bomba que trabalha a velocidade constante. O controlo é aplicado através da abertura de uma válvula motorizada, que comanda o fluxo de entrada (F_i). O fluxo de saída é fixado com válvulas manuais, sendo uma função não linear da altura de água no tanque (proporcional a \sqrt{h}). Um sensor de nível está acoplado a um dos tanques.

Configurou-se o sistema por forma a ser só utilizado o tanque de entrada, estando tapado o orifício que une os dois tanques. O sensor de nível foi colocado no tanque de entrada e é neste que se vai controlar o nível de água.

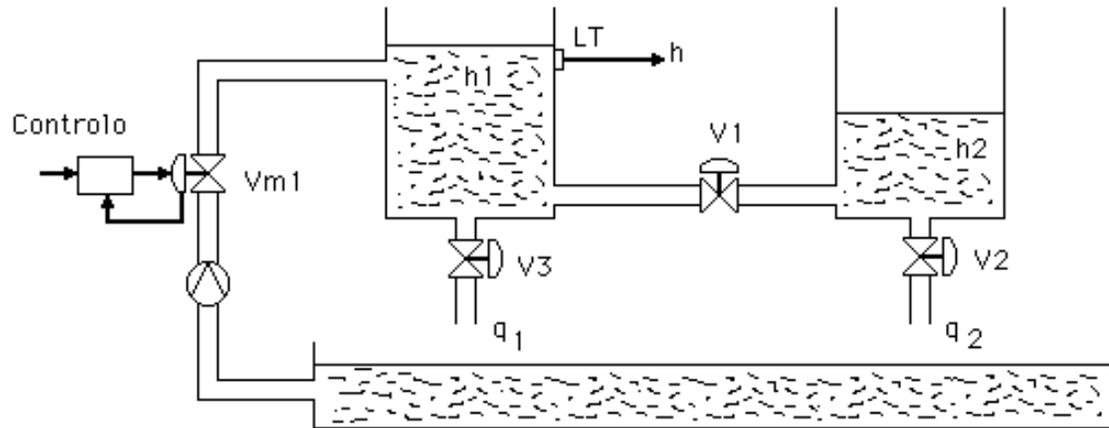


Figure B.2: Sistema de dois tanques acoplados

A equação que descreve o sistema é dado por:

$$A \frac{dh}{dt} + \beta \sqrt{h} = F_i \quad (\text{B.4})$$

Por ser uma aplicação em tempo real limitou-se o controlo entre 0 e 5 Volts. O intervalo de amostragem fixou-se em 2 segundos.

Bibliography

- [1] Aracil J., Ollero A. e Cerezo A. G. “Stability Indices for the Global Analysis of Expert Control Systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 19, N. 5, Sep/Oct, pp. 998-1007, 1989.
- [2] ARMFIELD. “Instruction Manual - Process Module PCT 9,” *Operating Instruments and Experiments*, 1987.
- [3] Åström K. J., Anton J. J. e Årzén K.-E. “Expert Control,” *Automatica*, vol. 22, N. 3, pp. 277-286, 1986.
- [4] Årzén K.-E. “An Architecture for Expert System Based Feedback Control,” *Automatica*, vol. 25, N. 6, pp. 813-817, 1989.
- [5] Bennet S. e Linkens D. A. (editors). “Computer Control of Industrial Processes,” 1982.
- [6] Bernard J. A. “Use of a Rule-Based System for Process Control,” *IEEE Control Systems Magazine*, October, 1988.
- [7] Cerezo A. J. G. “Aplicaciones del Razonamiento Aproximado en el Control y Supervision de Processos,” *Ph. D. Thesis*, ETSII de Vigo, Febrero, 1987.
- [8] Edgar T. F. “Current Problems in Process Control,” *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp. 13-15, 1987.
- [9] Fu K. S. “Stochastic automata, stochastic languages and pattern recognition,” *Journal of Cybernetics*, vol. 1, pp. 31-49, 1971.

- [10] Kickert W. J. M. e Van Nauta Lemke H. R. "Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant," *Automatica*, vol. 12, pp. 301-308, 1976.
- [11] King P. J. e Mandani E. H. "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes," *Automatica*, vol. 13, pp. 235-242, 1977.
- [12] King R. E. e Karonis F. C. "Multi-Level Expert Control of a Large-Scale Industrial Process," *Fuzzy Computing*, pp. 323-339, (1988).
- [13] Klir G. J. e Folger T. A. "Fuzzy Sets, Uncertainty, And Information," *Prentice-Hall International, Inc.* 1988.
- [14] Larsen P. M. "Industrial Applications of Fuzzy Logic Control," 1979.
- [15] Li Y. F. e Lau C. C. "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp. 65-72, 1989.
- [16] Lima P. e Oliveira P. (1990). "A Proposed Architecture for the Expert System to be implemented in Barbosa & Almeida," *Relatório interno no âmbito do projecto ESPRIT N. 2192 – AIMBURN*, Março, 1990.
- [17] Maiers J. e Sherif Y. S. "Applications of Fuzzy Set Theory," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, N. 1, Jan/Feb, pp. 175-189, 1985.
- [18] Maxwell J. C. *On Governors*, 1868.
- [19] Meystel A. "Intelligent control in robotic," *Journal Robotic Systems*, vol. 5, pp. 269-308, 1988.
- [20] Oliveira P. "Controlo Pericial de Processos," *Relatório interno do CAPS*, Abril, 1988.
- [21] Oliveira P., Lima P., Sentieiro J. J., Sanz R., Galan R. e Jimenes A. "An Architecture for the Supervision of Fuzzy Controllers," *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsuchiura, Julho 1990.

- [22] Oliveira P., Lima P. e Sentieiro J. J. "Fuzzy Supervision of Direct Controllers" *V IEEE Conference on Intelligent Control*, Filadélfia, Setembro 1990.
- [23] Oliveira P., Lima P. e Sentieiro J. J. "Fuzzy Supervision on Intelligent Control Systems" *European Control Conference*, Grenoble, a apresentar em Julho de 1991.
- [24] Oliveira P., Lima P. e Sentieiro J. "Notes on the implementation of the pre-processing algorithms to be incorporated in the Esprit project AIMBURN," *Relatório interno no ambito do projecto ESPRIT N. 2192 - AIMBURN*, Novembro, 1990.
- [25] Oshima H., Yasunobu S. e Sekino S. "Automatic Train Operation System Based on Predictive Fuzzy Control," *International Workshop on Artificial Inteligence for Industrial Applications*, pp. 485-489, 1988.
- [26] Pappis C. P. e Mandani E. H. "A Fuzzy Logic Controller for a Trafic Junction," *IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics*, vol. 7, N. 10, pp. 707-716, October, 1977.
- [27] Procyk J. J. e Mandani E. H. "A Linguistic Self-Organizing Process Controller," *Automatica*, vol. 15, pp. 15-30, 1979.
- [28] Rich E. "Artificial Inteligence," *Ed. McGraw-Hill*, 1983.
- [29] SanGiovanni J. P. e Romans H. C. "Expert Systems in Industry: A Survey," *Chemical Engineering Progress*, September, pp. 52-59, 1987.
- [30] Saridis G. N. "Knowledge Implementation: Structures of Intelligent Control Systems," *Journal of Robotic Systems*, April, pp. 255-267, 1988.
- [31] Shirley R. "Some Lessons Learned Using Expert Systems for Process Control," *Control Systems Magazine*, December, pp. 11-15, 1987.
- [32] Sugeno M. "An Introductory Survey of Fuzzy Control," *Information Sciences*, N. 36, pp. 59-83, 1985.

- [33] Takagi T. e Sugeno M. "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, N. 1, Jan/Feb, pp. 116-132, 1985.
- [34] Tang K. L. e Mulholland R. J. "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 17, N. 6, Nov/Dec, pp. 1085-1087, 1987.
- [35] Valavanis K. and Saridis G. "A Review of Intelligence Control Based Methodologies for Modeling and Analysis of Hierarchically Intelligent Systems," *Proceedings of the V International Symposium on Intelligent Control*, pp 15-20, 1990.
- [36] Wittenmark B. e Åström K. J. "Practical Issues in the Implementation of Self-tuning Control," *Automatica*, vol. 20, N. 5, pp. 595-605, 1984.
- [37] Zadeh, L. A. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, N. 1, January, 1973.
- [38] Ziegler J. G. e Nichols N. B. "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Transactions ASME*, N. 64, Nov, pp.759-768, 1942.